

# Planungshandbuch Thermische Netze

## Zweck und Motivation

Thermische Netze beschreiben eine leitungsgebundene Versorgung mehrerer Gebäude oder Verbraucher auf verschiedenen Grundstücken mit thermischer Energie. Zur Wärmeverteilung kommt meistens Wasser zum Einsatz. Eine Wärmeverteilung bei Temperaturen über 60°C entspricht einem klassischen Fernwärmenetz, das auch als Hochtemperaturnetz bezeichnet wird und eine direkte Versorgung von Gebäuden mit Heizwärme und Warmwasser ermöglicht. Ein Niedertemperaturnetz verteilt Wärme unter 60°C und kann je nach Temperaturniveau noch zur Gebäudeheizung oder als Quelle für Wärmepumpen und unter 20°C auch zur Direktkühlung genutzt werden. Thermische Netze umfassen sowohl Hochtemperaturnetze ab 60°C als auch Niedertemperaturnetze unter 60°C.

Der Einsatz von thermischen Netzen ermöglicht die Substitution fossiler Energieträger durch Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien. Daneben können thermische Netze im Sinne der Sektorkopplung zur zeitlichen Optimierung des Elektrizitätsverbrauchs beitragen. Dieser Effekt kann unter anderem durch Einbindung einer Wärmespeicherung noch erhöht werden.

Im Jahr 2017 hat das Autorenteam von QM Fernwärme das **Planungshandbuch Fernwärme** veröffentlicht und seit da periodisch aktualisiert und durch Zusatzdokumente ergänzt.

Das **Planungshandbuch Thermische Netze** ersetzt das Planungshandbuch Fernwärme und erweitert den Anwendungsbereich in den Bereichen der Netztemperatur und der Wärmeerzeugung.

## Zielpublikum

- Ingenieure und Planerinnen im Bereich Heizung, Kälte und Gebäudetechnik,
- Leitende Angestellte in Planungsfirmen für Heizung, Gebäudetechnik und Tiefbau,
- Betreiber von thermischen Netzen,
- Fachleute aus dem Tiefbau und Rohrleitungsbau.

## Geltungsbereich

Das Planungshandbuch beschreibt die Grundlagen zu Planung, Ausführung und Optimierung der **Wärmeverteilung** und **Wärmeübergabe** in **thermischen Netzen**. Der Begriff „Thermische Netze“ umfasst alle Anwendungen zur Verteilung von Wärme. Darin ist auch „Kälte“ eingeschlossen, was physikalisch Wärme bei Temperaturen unter der Umgebungstemperatur beschreibt.

Die Ausführungen beschränken sich auf Anwendungen mit flüssigen Wärmeträgermedien, in der Regel Wasser oder Wasser-Frostschutz-Gemische, je nach Temperaturniveau.

Daneben werden die Techniken zur Wärmeerzeugung und die Einflüsse zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung beschrieben. Die Auslegung der Wärmeerzeugung ist dagegen nicht Teil des vorliegenden Handbuchs.

## Inhalt

Das Planungshandbuch umfasst folgende Teile:

**Teil 1 Grundlagen** behandelt die Rahmenbedingungen, die Wärmebereitstellung, die Wärmeverteilung und die Wärmeübergabe.

**Teil 2 Planung, Betrieb und Optimierung** behandelt die für die Planung erforderliche Vorgehensweise, Informationen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sowie Ansätze zur Betriebsoptimierung.

Als Ergänzung zu den zwei Hauptteilen beinhaltet der **Anhang** wichtige Auslegungsdiagramme sowie Informationen zu Normen und Literatur.

## Verantwortlichkeiten und Anwendung

Das Planungshandbuch wurde auf Basis der Erfahrungen der Autoren und unter Verwendung der zitierten Fachliteratur erarbeitet. Bei der Erarbeitung haben zudem Vertreter der Fachverbände und Branche mitgewirkt. Obwohl die Informationen nach bestem Wissen aufbereitet wurden, wird für deren Anwendung keine Haftung übernommen. Das Planungshandbuch soll als Basis für die Aus- und Weiterbildung dienen und regelmässig aktualisiert werden. Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge werden gerne entgegengenommen.

## Version und Bezugsquelle

ISBN 3-908705-43-6 – Version 2.0 vom 03.12.2025

Download-Link: [www.qmthermischenetze.ch](http://www.qmthermischenetze.ch)

---

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.  
Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.**

### Adresse:

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern  
Infoline 0848 444 444; [energieschweiz@bfe.admin.ch](mailto:energieschweiz@bfe.admin.ch)  
[www.energieschweiz.ch](http://www.energieschweiz.ch); [www.energieschweiz.ch/beratung](http://www.energieschweiz.ch/beratung)

# Planungshandbuch Thermische Netze

## Autoren

Stefan Thalmann, Verenum AG, 8006 Zürich (Projektleiter)  
Prof. Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum AG, 8006 Zürich  
Daniel Zaugg, Verenum AG, 8006 Zürich  
Michael Cueni, Triplex Energieplaner AG, 4450 Sissach

## Auftraggeber

Bundesamt für Energie

## Patronat

|           |                                                         |
|-----------|---------------------------------------------------------|
| TNS       | Thermische Netze Schweiz                                |
| SVGW      | Fachverband für Wasser, Gas und Wärme                   |
| SWKI      | Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren   |
| suissetec | Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband |

## Mitarbeit als externe Experten (in alphabetischer Reihenfolge)

Niels Alter, Enerpipe GmbH, D-91161 Hilpoltstein  
René Bachmann, Fahrer AG, 8309 Nürens Dorf  
Matthias Bendig, Bundesamt für Energie, 3063 Ittigen  
Christian Bieri, Allotherm AG, 3645 Gwatt  
Igor Bosshard, die werke versorgung wallisellen ag, 8304 Wallisellen  
Christian Buchli, Energie 360° AG, 8010 Zürich  
Dominik Clauss, a energie ag, 3054 Schüpfen  
Robert Diana, Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (suissetec), 8021 Zürich  
Jean-Pierre Dreyer, Klinger Gysi AG, 5034 Suhr  
Christian Engel, Armacell Austria GmbH, A-9585 Villach  
Frank Espig, AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., D-60596 Frankfurt am Main  
Christoph Fischer, Klinger Gysi AG, 5034 Suhr  
David Füllemann, ewz, 8050 Zürich  
Reto Gadola, Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren SWKI, 6048 Horw  
Stefan Gemperle, Eicher+Pauli Olten AG, 4600 Olten  
Stefan Güpfert, Fachverband für Wasser, Gas und Wärme SVGW, 8027 Zürich  
Alexander Hobohm, Gerodur MPM Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG, D-01844 Neustadt in Sachsen  
Andreas Hurni, Thermische Netze Schweiz TNS, 3001 Bern  
Josef Timoteo Jenni, Jenni Energietechnik AG, 3414 Oberburg  
Andres Jenni, Ardens GmbH, 4410 Liestal  
Peter Keller, TMH Hagenbucher AG, 8050 Zürich  
Joachim Ködel, DE-79540 Lörrach  
Matthias Kolb, Anex AG, 8005 Zürich  
Thomas La Malfa, Brugg Pipesystems AG, 5314 Böttstein  
Pascal Leumann, ewz, 8050 Zürich  
Martin Liechti, Thermische Netze Schweiz TNS, 3001 Bern  
Matthias Mast, Amstein + Walthert AG, 8050 Zürich  
Thomas Müller, ewl energie wasser luzern, 6002 Luzern  
Urs Peter, Isoplus Schweiz GmbH, 8546 Gachnang  
Bernhard Jonas, Sysbo AG, 9434 Au  
Heinz Piller, PEWO Energietechnik Schweiz GmbH, 3280 Murten  
Palacios Ramon, Stadtwerke Winterthur, 8406 Winterthur  
Jakob Scherer, Anex AG, 8005 Zürich  
Simon Schoch, energienetz GSG AG, 9001 St.Gallen  
Hanspeter Speck, St.Galler Stadtwerke, 9001 St.Gallen  
Günther Storf, Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI), 8320 Fehraltorf  
Reto Storz, Anex AG, 8005 Zürich  
Stefan Treudler, Stadtwerke Winterthur, 8406 Winterthur  
Margarete van Aken, Logstor Schweiz AG, 8105 Regensdorf  
Dante Venafrò, ewz, 8050 Zürich  
Prof. Dr. Willy Villasmil, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw  
André Waller, Cowa Thermal Solutions AG, 6039 Root  
Thomas Wälti, Robera AG, 5303 Würenlingen  
Remo Waser, Cowa Thermal Solutions AG, 6039 Root

## Übersicht

### TEIL 1 – GRUNDLAGEN .....9

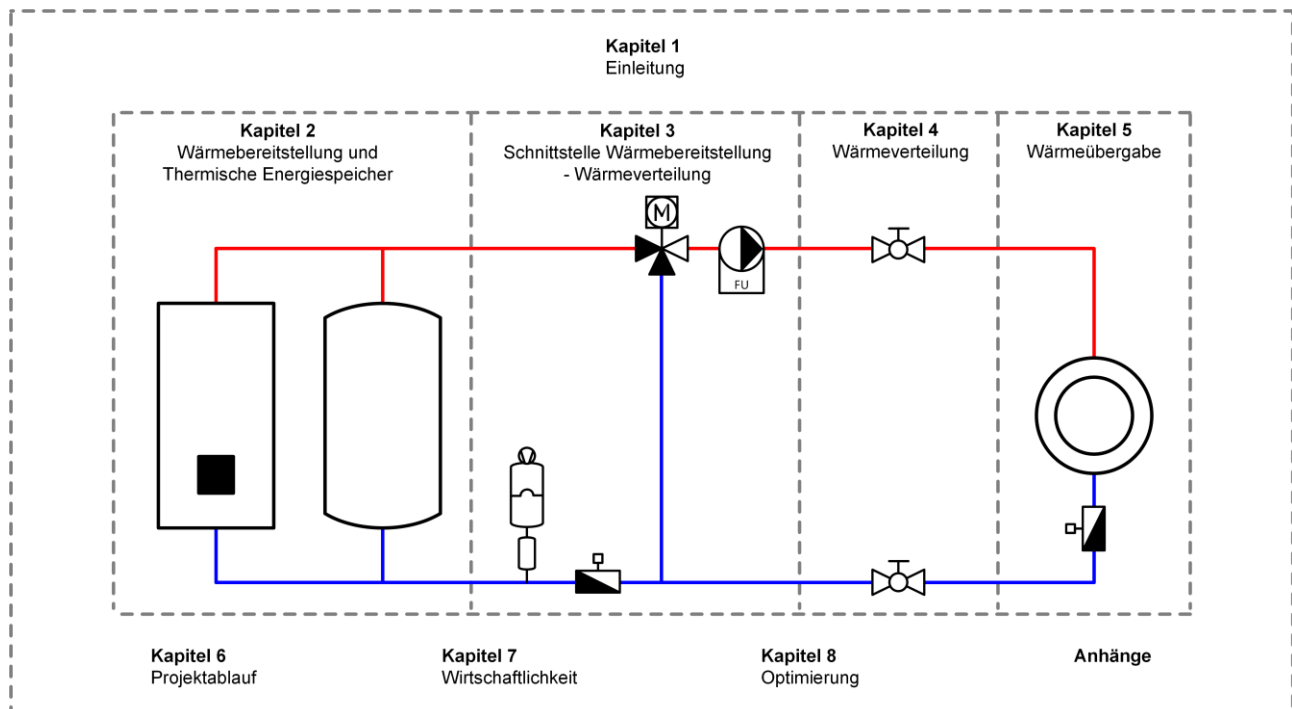
|   |                                                           |     |
|---|-----------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Einleitung .....                                          | 10  |
| 2 | Wärmebereitstellung und Thermische Energiespeicher .....  | 25  |
| 3 | Schnittstelle Wärmebereitstellung – Wärmeverteilung ..... | 81  |
| 4 | Wärmeverteilung .....                                     | 102 |
| 5 | Wärmeübergabe .....                                       | 163 |

### TEIL 2 – PLANUNG, BETRIEB UND OPTIMIERUNG      201

|   |                          |     |
|---|--------------------------|-----|
| 6 | Projektablauf .....      | 202 |
| 7 | Wirtschaftlichkeit ..... | 224 |
| 8 | Optimierung .....        | 235 |

### ANHANG .....251

|    |                                     |     |
|----|-------------------------------------|-----|
| 9  | Stoffwerte von Wasser .....         | 252 |
| 10 | Kenngrossen Rohrsysteme .....       | 254 |
| 11 | Richtpreise Leitungsbau .....       | 264 |
| 12 | Richtpreise Übergabestationen ..... | 269 |
| 13 | Symbole für Installationen .....    | 271 |
| 14 | Formelzeichen und Indizes .....     | 272 |
| 15 | Glossar .....                       | 276 |
| 16 | Quellenverzeichnis .....            | 282 |



# Inhalt

## TEIL 1 – GRUNDLAGEN .....9

### 1 Einleitung ..... 10

|       |                                                                     |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1   | Historische Entwicklung .....                                       | 10 |
| 1.2   | Thermische Netze in der Schweiz.....                                | 11 |
| 1.2.1 | Aktuelle Situation .....                                            | 11 |
| 1.2.2 | Räumliche Energieplanung.....                                       | 13 |
| 1.2.3 | Potenzial für thermische Netze und<br>Wärmequellen.....             | 14 |
| 1.2.4 | Potenzial für Kälteversorgung .....                                 | 15 |
| 1.3   | Grundlegende Unterscheidungsmerkmale<br>von thermischen Netzen..... | 16 |
| 1.3.1 | Betriebstemperatur .....                                            | 16 |
| 1.3.2 | Betriebsweise.....                                                  | 17 |
| 1.3.3 | CO <sub>2</sub> -Netz als Sonderfall.....                           | 18 |
| 1.4   | Vor- und Nachteile.....                                             | 20 |
| 1.5   | Effizienz und Kosten.....                                           | 20 |
| 1.6   | Organisatorische Aspekte .....                                      | 23 |

### 2 Wärmebereitstellung und Thermische Energiespeicher ..... 25

|         |                                                                                |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1     | Wärme- und Wärmeleistungsbedarf<br>einzelner Kunden.....                       | 25 |
| 2.1.1   | Raumwärme.....                                                                 | 25 |
| 2.1.2   | Warmwasser und Prozesswärme .....                                              | 25 |
| 2.1.3   | Temperaturbedarf .....                                                         | 26 |
| 2.1.4   | Vergleich Altbau und Neubau .....                                              | 26 |
| 2.2     | Wärmeleistungsbedarf des thermischen<br>Netzes .....                           | 28 |
| 2.3     | Auslegung Wärmeerzeuger.....                                                   | 30 |
| 2.3.1   | Leistungsbereich.....                                                          | 30 |
| 2.3.2   | Zwei Wärmeerzeuger.....                                                        | 30 |
| 2.3.3   | Grundlast- und Spitzenlast.....                                                | 30 |
| 2.3.4   | Drei Wärmeerzeuger.....                                                        | 31 |
| 2.3.5   | Holzessel-Kaskaden .....                                                       | 31 |
| 2.3.6   | Grosse Wärmespeicher .....                                                     | 31 |
| 2.3.7   | Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen und<br>Holzessel.....                           | 32 |
| 2.3.8   | Fossilfreie Wärmeerzeugung .....                                               | 36 |
| 2.4     | Definition von Wirkungsgraden und<br>Bewertung von Wärme und Elektrizität .... | 39 |
| 2.4.1   | Wirkungsgrad und Nutzungsgrad sowie brutto<br>und netto.....                   | 39 |
| 2.4.2   | Gesamtwirkungsgrad .....                                                       | 39 |
| 2.4.3   | Gewichtete Bewertung.....                                                      | 41 |
| 2.5     | Wärmeerzeugung .....                                                           | 43 |
| 2.5.1   | Allgemein .....                                                                | 43 |
| 2.5.2   | Reine Wärmeerzeugung (Heizwerke) .....                                         | 43 |
| 2.5.2.1 | Holzheizkessel .....                                                           | 43 |
| 2.5.2.2 | Direkt nutzbare Abwärme.....                                                   | 46 |
| 2.5.2.3 | Wärmepumpen.....                                                               | 47 |
| 2.5.2.4 | Solarthermie.....                                                              | 53 |
| 2.5.2.5 | Geothermie .....                                                               | 56 |

|         |                                                          |    |
|---------|----------------------------------------------------------|----|
| 2.5.3   | Wärme-Kraft-Kopplung.....                                | 58 |
| 2.5.3.1 | Prinzip.....                                             | 58 |
| 2.5.3.2 | Blockheizkraftwerke (BHKW).....                          | 58 |
| 2.5.3.3 | Dampfturbinen und Dampfmotoren<br>(Rankine-Prozess)..... | 59 |
| 2.5.3.4 | Organic Rankine Cycle (ORC).....                         | 60 |
| 2.5.3.5 | WKK und Wärmepumpe .....                                 | 60 |
| 2.5.3.6 | Systemvergleich .....                                    | 60 |
| 2.6     | Thermische Energiespeicher .....                         | 61 |
| 2.6.1   | Eigenschaften und Begriffe .....                         | 61 |
| 2.6.2   | Speichertechnologien .....                               | 63 |
| 2.6.2.1 | Sensible Wärmespeicherung .....                          | 63 |
| 2.6.2.2 | Latente Wärmespeicherung.....                            | 63 |
| 2.6.2.3 | Thermochemische Wärmespeicherung ....                    | 64 |
| 2.6.3   | Grundlagen der Energiespeicherung.....                   | 64 |
| 2.6.3.1 | Speichervorgang .....                                    | 64 |
| 2.6.3.2 | Thermische Energie .....                                 | 64 |
| 2.6.3.3 | Wärmedämmung .....                                       | 65 |
| 2.6.3.4 | Auskühlung über die Zeit.....                            | 66 |
| 2.6.4   | Speicherdesign und Auslegung.....                        | 68 |
| 2.6.4.1 | Be- und Entladungseinrichtung.....                       | 68 |
| 2.6.4.2 | Höhen-Durchmesser-Verhältnis .....                       | 69 |
| 2.6.4.3 | Serieller oder paralleler Betrieb .....                  | 69 |
| 2.6.4.4 | Transport .....                                          | 69 |
| 2.6.4.5 | Druckfestigkeit.....                                     | 70 |
| 2.6.5   | Wärmespeicher für thermische Netze .....                 | 70 |
| 2.6.5.1 | Stahltank drucklos .....                                 | 70 |
| 2.6.5.2 | Stahltank druckbehaftet.....                             | 71 |
| 2.6.5.3 | Betontank .....                                          | 72 |
| 2.6.5.4 | Erdbecken .....                                          | 73 |
| 2.6.5.5 | Erdsonden .....                                          | 74 |
| 2.6.5.6 | Aquifer .....                                            | 75 |
| 2.6.5.7 | Hydraulische- und regelungstechnische<br>Aspekte.....    | 76 |
| 2.6.5.8 | Kosten und Wirtschaftlichkeit.....                       | 77 |
| 2.6.5.9 | Systemintegration .....                                  | 78 |

### 3 Schnittstelle Wärmebereitstellung – Wärmeverteilung..... 81

|       |                                    |    |
|-------|------------------------------------|----|
| 3.1   | Netztemperaturen .....             | 81 |
| 3.1.1 | Vorlauftemperatur.....             | 81 |
| 3.1.2 | Rücklauftemperatur .....           | 82 |
| 3.1.3 | Temperaturspreizung .....          | 82 |
| 3.1.4 | Temperaturabsenkung .....          | 82 |
| 3.2   | Netzfahrweise .....                | 83 |
| 3.2.1 | Gleitende Fahrweise .....          | 83 |
| 3.2.2 | Gleitend-Konstante Fahrweise ..... | 83 |
| 3.2.3 | Konstante Fahrweise.....           | 84 |
| 3.3   | Pumpen.....                        | 84 |
| 3.3.1 | Bauarten.....                      | 84 |
| 3.3.2 | Energieeffizienz.....              | 85 |
| 3.4   | Pumpenauslegung .....              | 85 |
| 3.4.1 | Pumpenkennlinie.....               | 85 |
| 3.4.2 | Anlagenkennlinie .....             | 85 |
| 3.4.3 | Proportionalitätsgesetze .....     | 85 |
| 3.4.4 | Leistungsbedarf Pumpen .....       | 85 |
| 3.4.5 | Energiebedarf Pumpen .....         | 86 |
| 3.4.6 | Besonderheiten Auslegung .....     | 87 |

|          |                                                                                      |            |         |                                                                       |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5      | Pumpenregelung .....                                                                 | 88         | 4.3.2   | Netzstruktur .....                                                    | 122 |
| 3.6      | Pumpenschaltung .....                                                                | 89         | 4.3.2.1 | Hauptverteilung .....                                                 | 122 |
| 3.6.1    | Parallelschaltung .....                                                              | 89         | 4.3.2.2 | Unterverteilung und Hausanschlüsse .....                              | 122 |
| 3.6.2    | Serienschaltung .....                                                                | 90         | 4.3.2.3 | Entwicklung der Netzstruktur .....                                    | 123 |
| 3.6.3    | Redundanz und Ausbau .....                                                           | 90         | 4.3.3   | Entlüftung und Entleerung .....                                       | 124 |
| 3.6.4    | Schwachlast- / Sommerpumpe .....                                                     | 90         | 4.3.4   | Messeinrichtungen .....                                               | 124 |
| 3.6.5    | Pumpenregelung bei mehreren<br>Einspeisepunkten .....                                | 91         | 4.4     | Verlegung .....                                                       | 124 |
| 3.7      | Netzregelung .....                                                                   | 91         | 4.4.1   | Oberirdische Verlegung .....                                          | 124 |
| 3.7.1    | Regelkonzept .....                                                                   | 92         | 4.4.2   | Unterirdische Verlegung im Kanal .....                                | 124 |
| 3.7.2    | Messort der Differenzdruckregelung .....                                             | 92         | 4.4.3   | Unterirdische Verlegung im Graben .....                               | 124 |
| 3.7.3    | Thermische Netze mit stark variablem<br>Durchfluss und hoher Vorlauftemperatur ..... | 93         | 4.4.4   | Grabenlose Verlegung .....                                            | 125 |
| 3.7.4    | Getrennte Fernleitungsgruppen für Winter- und<br>Sommerbetrieb .....                 | 93         | 4.4.4.1 | Bodenverdrängungsverfahren .....                                      | 125 |
| 3.8      | Nenndruck .....                                                                      | 94         | 4.4.4.2 | Bodenentnahmeverfahren .....                                          | 125 |
| 3.9      | Druckverlauf im thermischen Netz .....                                               | 94         | 4.4.4.3 | Düker .....                                                           | 125 |
| 3.10     | Druckerhöhung und Netztrennung .....                                                 | 97         | 4.4.5   | Häufige Verlege-Situationen .....                                     | 126 |
| 3.11     | Druckhaltung .....                                                                   | 98         | 4.4.5.1 | Befestigte Oberflächen .....                                          | 126 |
| 3.11.1   | Druckhaltesysteme .....                                                              | 98         | 4.4.5.2 | Unbefestigte Oberflächen .....                                        | 126 |
| 3.11.2   | Einbindung der Druckhaltung .....                                                    | 99         | 4.4.5.3 | Führung an Geländeabschnitten .....                                   | 126 |
| 3.11.3   | Expansionsvolumen und Nachspeisemenge .....                                          | 100        | 4.4.5.4 | Privatgrundstücke .....                                               | 126 |
|          |                                                                                      |            | 4.4.5.5 | Nachträglich anzuschliessende Kunden .....                            | 126 |
| <b>4</b> | <b>Wärmeverteilung .....</b>                                                         | <b>102</b> | 4.4.6   | Berücksichtigung anderer leitungsgebundener<br>Sparten .....          | 127 |
| 4.1      | Entwicklung .....                                                                    | 102        | 4.5     | Tiefbau .....                                                         | 128 |
| 4.1.1    | Dampf-Verteilung .....                                                               | 103        | 4.5.1   | Allgemeines .....                                                     | 128 |
| 4.1.2    | Heisswasser-Verteilung .....                                                         | 104        | 4.5.2   | Trassenplanung .....                                                  | 129 |
| 4.1.3    | Warmwasser-Verteilung .....                                                          | 104        | 4.5.2.1 | Starre Rohrsysteme .....                                              | 129 |
| 4.1.4    | Niedertemperatur-Verteilung .....                                                    | 105        | 4.5.2.2 | Flexible Rohrsysteme .....                                            | 130 |
| 4.2      | Komponenten .....                                                                    | 105        | 4.5.2.3 | Bewilligungsverfahren .....                                           | 130 |
| 4.2.1    | Rohrsysteme .....                                                                    | 105        | 4.5.3   | Bauablauf .....                                                       | 131 |
| 4.2.1.1  | Kunststoffverbundmantelrohr (KMR) .....                                              | 106        | 4.5.3.1 | Grabenaushub .....                                                    | 131 |
| 4.2.1.2  | Metallmediumrohr (MMR) .....                                                         | 106        | 4.5.3.2 | Rohrleitungsbau .....                                                 | 132 |
| 4.2.1.3  | Kunststoffmediumrohr (PMR) .....                                                     | 107        | 4.5.3.3 | Grabenverfüllung .....                                                | 133 |
| 4.2.1.4  | Kunststoffrohr aus Polyethylen (PE-Rohr)<br>107                                      |            | 4.5.3.4 | Instandstellung .....                                                 | 134 |
| 4.2.1.5  | Duktile Gussrohre .....                                                              | 108        | 4.6     | Wasserqualität .....                                                  | 135 |
| 4.2.1.6  | Glasfaserverstärktes Kunststoffrohr (GFK-<br>Rohr) .....                             | 109        | 4.6.1   | Wasserarten .....                                                     | 135 |
| 4.2.1.7  | Stahlmantelrohr (SMR) .....                                                          | 109        | 4.6.1.1 | Flüssigkeitskategorie .....                                           | 135 |
| 4.2.1.8  | Doppelrohrausführung .....                                                           | 109        | 4.6.1.2 | Begriffe in der Gebäudetechnik .....                                  | 135 |
| 4.2.1.9  | Muffenverbindungen .....                                                             | 110        | 4.6.1.3 | Begriffe in thermischen Netzen .....                                  | 135 |
| 4.2.1.10 | Auswahl des Rohrsystems .....                                                        | 110        | 4.6.2   | Empfehlung an die Wasserbeschaffenheit in<br>thermischen Netzen ..... | 136 |
| 4.2.2    | Leckageüberwachung .....                                                             | 113        | 4.6.2.1 | Warmwasser bis 110°C .....                                            | 136 |
| 4.2.2.1  | Elektrische Überwachungssysteme .....                                                | 113        | 4.6.2.2 | Heisswasser ab 110°C .....                                            | 136 |
| 4.2.2.2  | Ortungsverfahren .....                                                               | 114        | 4.6.2.3 | Messgrössen .....                                                     | 137 |
| 4.2.2.3  | Dokumentation und Prüfung .....                                                      | 115        | 4.6.2.4 | Wasseraufbereitung .....                                              | 138 |
| 4.2.3    | Armaturen .....                                                                      | 115        | 4.6.2.5 | Wasserbehandlung – Konditionierung .....                              | 139 |
| 4.2.3.1  | Hähne .....                                                                          | 116        | 4.7     | Wärmeverluste .....                                                   | 140 |
| 4.2.3.2  | Schieber .....                                                                       | 117        | 4.7.1   | Übersicht und Grobe Beurteilung .....                                 | 140 |
| 4.2.3.3  | Klappen .....                                                                        | 118        | 4.7.2   | Oberirdische Leitungen .....                                          | 141 |
| 4.2.3.4  | Ventile .....                                                                        | 118        | 4.7.3   | Erdverlegte Leitungen .....                                           | 142 |
| 4.2.3.5  | Einsatzbereich .....                                                                 | 119        | 4.7.4   | Jährliche Wärmeverluste .....                                         | 144 |
| 4.2.3.6  | Betriebliche Hinweise .....                                                          | 119        | 4.8     | Temperaturabfall in Funktion der Distanz<br>.....                     | 145 |
| 4.2.3.7  | Kennzeichnung und Dokumentation .....                                                | 120        | 4.9     | Druckverlust .....                                                    | 146 |
| 4.3      | Netzaufbau .....                                                                     | 121        | 4.9.1   | Gerade Rohrleitungen .....                                            | 146 |
| 4.3.1    | Unterteilung nach Anzahl Leitungen .....                                             | 121        | 4.9.2   | Druckverlust von Wellrohren .....                                     | 147 |
|          |                                                                                      |            | 4.9.3   | Druckverlust von Rohrleitungseinbauten .....                          | 148 |
|          |                                                                                      |            | 4.10    | Rohrstatik .....                                                      | 149 |

|                                                                                                     |            |                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.10.1 Grundlagen der Rohrstatik .....                                                              | 149        | 5.3.2 Varianten der Warmwassererwärmung .....                                     | 175        |
| 4.10.1.1 Druckfestigkeit und Wandstärke .....                                                       | 149        | 5.3.3 Vorrang der Warmwassererwärmung .....                                       | 177        |
| 4.10.1.2 Biegespannung bei Rohren .....                                                             | 151        | 5.3.4 Legionellen .....                                                           | 177        |
| 4.10.1.3 Wärmedehnung und Wärmespannung .....                                                       | 151        | 5.4 Übergabestation .....                                                         | 178        |
| 4.10.1.4 Überlagerung von Spannungen .....                                                          | 151        | 5.4.1 Allgemein .....                                                             | 178        |
| 4.10.1.5 Statischer Nachweis .....                                                                  | 152        | 5.4.2 Übersicht .....                                                             | 178        |
| 4.10.2 Rohrstatistische Auslegungstemperatur .....                                                  | 153        | 5.4.3 Standard Übergabestation .....                                              | 178        |
| 4.10.3 Dehnungsaufnahme .....                                                                       | 153        | 5.4.4 Individuelle Übergabestation .....                                          | 179        |
| 4.10.4 Erdverlegte starre Leitungen .....                                                           | 154        | 5.4.5 Sonderanfertigungen .....                                                   | 179        |
| 4.10.4.1 Übersicht Verlegungsmethoden .....                                                         | 154        | 5.4.6 Minimalanforderungen Übergabestationen .....                                | 180        |
| 4.10.4.2 Kaltverlegung Methode 1 .....                                                              | 154        | 5.4.6.1 Allgemein .....                                                           | 180        |
| 4.10.4.3 Kaltverlegung Methode 2 .....                                                              | 155        | 5.4.6.2 Ausrüstung .....                                                          | 180        |
| 4.10.4.4 Thermische Vorspannung .....                                                               | 155        | 5.4.6.3 Druckverlust Übergabestation .....                                        | 181        |
| 4.10.4.5 Doppelrohre, Mehrfachrohre .....                                                           | 155        | 5.4.6.4 Maximale Strömungsgeschwindigkeit .....                                   | 181        |
| 4.10.5 Frei verlegte Leitungen .....                                                                | 155        | 5.4.6.5 Dokumentation .....                                                       | 181        |
| 4.10.5.1 Grundlagen .....                                                                           | 155        | 5.4.7 Komponenten und Funktionen .....                                            | 182        |
| 4.10.5.2 Abstützung .....                                                                           | 156        | 5.4.7.1 Allgemein .....                                                           | 182        |
| 4.10.5.3 Verlegung mit Vorspannung .....                                                            | 158        | 5.4.7.2 Ausrüstung Hausanschlussraum .....                                        | 182        |
| 4.10.5.4 Kunststoffleitungen .....                                                                  | 158        | 5.4.7.3 Wärmeübertrager .....                                                     | 182        |
| 4.11 Empfehlungen zur Dimensionierung der<br>Rohrleitungen .....                                    | 159        | 5.4.7.4 Regelventil .....                                                         | 184        |
| 4.11.1 Grundlegende Entscheidungskriterien .....                                                    | 159        | 5.4.7.5 Regelungstechnik .....                                                    | 184        |
| 4.11.2 Vorgehen .....                                                                               | 160        | 5.4.7.6 Datenerfassung und Fernüberwachung .....                                  | 185        |
| 4.11.3 Berechnungsmethoden .....                                                                    | 160        | 5.4.7.7 Wärmezähler .....                                                         | 185        |
| 4.12 Übergeordnete Entscheidungskriterien im<br>Leitungsbau .....                                   | 162        | 5.4.7.8 Druckabsicherung .....                                                    | 187        |
| <b>5 Wärmeübergabe .....</b>                                                                        | <b>163</b> | 5.4.7.9 Temperaturabsicherung .....                                               | 187        |
| 5.1 Begriffe .....                                                                                  | 163        | 5.4.7.10 Absperrarmaturen .....                                                   | 188        |
| 5.1.1 Hausanschlussleitung .....                                                                    | 163        | 5.4.7.11 Entleerung und Entlüftung .....                                          | 188        |
| 5.1.2 Hausanschlussraum .....                                                                       | 163        | 5.4.7.12 Schmutzfänger .....                                                      | 189        |
| 5.1.3 Hausstation .....                                                                             | 163        | 5.4.7.13 Temperatur- und Druckanzeigen .....                                      | 189        |
| 5.1.4 Übergabestation .....                                                                         | 164        | 5.4.7.14 Werkstoffe und Verbindungstechniken .....                                | 189        |
| 5.1.5 Hauszentrale .....                                                                            | 164        | 5.4.7.15 Wärmedämmung .....                                                       | 189        |
| 5.1.6 Gebäudeinstallation .....                                                                     | 164        | 5.4.7.16 Potentialausgleich .....                                                 | 189        |
| 5.2 Hydraulik .....                                                                                 | 165        | 5.4.8 Projektablauf .....                                                         | 190        |
| 5.2.1 Grundsaltungen .....                                                                          | 165        | 5.4.8.1 Planungsphase .....                                                       | 190        |
| 5.2.1.1 Beimischschaltung .....                                                                     | 165        | 5.4.8.2 Betriebsphase .....                                                       | 190        |
| 5.2.1.2 Einspritzschaltung mit Durchgangsventil .....                                               | 165        | 5.4.9 Auslegung und Anforderungen für eine<br>Übergabestation .....               | 191        |
| 5.2.1.3 Drosselschaltung .....                                                                      | 165        | 5.5 Standard-Schaltungen .....                                                    | 192        |
| 5.2.2 Anschlussvarianten .....                                                                      | 167        | 5.5.1 Direkter Anschluss .....                                                    | 192        |
| 5.2.2.1 Direkter Anschluss .....                                                                    | 167        | 5.5.2 Indirekter Anschluss .....                                                  | 193        |
| 5.2.2.2 Indirekter Anschluss .....                                                                  | 167        | 5.5.3 Warmwassererwärmung .....                                                   | 195        |
| 5.2.3 Regelventil .....                                                                             | 169        | 5.5.4 Strahlpumpe .....                                                           | 197        |
| 5.2.4 Ventilautorität .....                                                                         | 170        | 5.6 Ist-Analyse Kunde .....                                                       | 197        |
| 5.2.5 Systeme bei variablen Netzen .....                                                            | 171        | 5.7 Anforderungen an die Sekundärseite .....                                      | 198        |
| 5.2.5.1 Statischer hydraulischer Abgleich .....                                                     | 171        | <b>TEIL 2 – PLANUNG, BETRIEB UND<br/>OPTIMIERUNG .....</b>                        | <b>201</b> |
| 5.2.5.2 Hydraulischer Abgleich mit automatischen<br>Differenzdruckregler .....                      | 171        | <b>6 Projektablauf .....</b>                                                      | <b>202</b> |
| 5.2.5.3 Hydraulischer Abgleich mit<br>differenzdruckunabhängigem Regelventil<br>(Kombiventil) ..... | 172        | 6.1 Übersicht .....                                                               | 202        |
| 5.2.5.4 Hydraulischer Abgleich mit elektronisch<br>druckunabhängigem Regelventil .....              | 173        | 6.2 Qualitätssicherung .....                                                      | 202        |
| 5.2.5.5 Vergleich der Systeme zum hydraulischen<br>Abgleich .....                                   | 173        | 6.3 Unterschiede zwischen SIA 108 und<br>Planungshand-buch Thermische Netze ..... | 205        |
| 5.3 Warmwassererwärmung .....                                                                       | 174        | 6.4 Phase 1: Vorstudie .....                                                      | 205        |
| 5.3.1 Allgemein .....                                                                               | 174        | 6.4.1 Potenzielles Wärme- / Kälteversorgungsgebiet<br>.....                       | 205        |
|                                                                                                     |            | 6.4.2 Umfrage Schlüsselkunden .....                                               | 206        |
|                                                                                                     |            | 6.4.3 Aktualisieren Wärmeversorgungsgebiet .....                                  | 207        |

|          |                                                                     |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.4    | Erste wirtschaftliche Betrachtung.....                              | 208        |
| 6.5      | Phase 2: Entwurfsplanung .....                                      | 211        |
| 6.5.1    | Konkretisieren der Schlüssel-kunden.....                            | 211        |
| 6.5.2    | Umfrage Kleinkunden .....                                           | 211        |
| 6.5.3    | Festlegen Versorgungsgebiet .....                                   | 211        |
| 6.5.4    | Zweite wirtschaftliche Betrachtung.....                             | 212        |
| 6.5.5    | Akquisition.....                                                    | 212        |
| 6.6      | Phase 3: Planung, Ausschreibung und Vergabe .....                   | 214        |
| 6.6.1    | Auslegung thermisches Netz .....                                    | 214        |
| 6.6.2    | Spezifikation Übergabestation .....                                 | 214        |
| 6.6.3    | Baubewilligungsverfahren .....                                      | 214        |
| 6.6.4    | Ausschreibung vorbereiten .....                                     | 214        |
| 6.6.5    | Submission .....                                                    | 215        |
| 6.6.6    | Dritte Wirtschaftliche Betrachtung .....                            | 215        |
| 6.6.7    | Vergabe .....                                                       | 215        |
| 6.7      | Phase 4: Ausführung und Abnahme .....                               | 217        |
| 6.7.1    | Ausführungspläne .....                                              | 217        |
| 6.7.2    | Ausführung.....                                                     | 217        |
| 6.7.3    | Inbetriebnahme .....                                                | 217        |
| 6.7.4    | Dokumentation.....                                                  | 217        |
| 6.7.5    | Kostenkontrolle .....                                               | 218        |
| 6.7.6    | Abnahme.....                                                        | 218        |
| 6.8      | Phase 5: Erste Betriebsoptimierung .....                            | 220        |
| 6.8.1    | Datenerfassung.....                                                 | 220        |
| 6.8.2    | Auswertung .....                                                    | 221        |
| 6.8.3    | Optimierung .....                                                   | 221        |
| 6.9      | Phase 6: Betrieb und Bewirtschaftung .....                          | 222        |
| 6.9.1    | Betriebskonzept .....                                               | 222        |
| 6.9.2    | Instandhaltung .....                                                | 222        |
| 6.9.3    | Wartungsvertrag .....                                               | 222        |
| 6.9.4    | Versicherungen.....                                                 | 222        |
| <b>7</b> | <b>Wirtschaftlichkeit.....</b>                                      | <b>224</b> |
| 7.1      | Grundlegende Wirtschaftlichkeitsfragen .....                        | 224        |
| 7.2      | Verantwortlichkeiten .....                                          | 224        |
| 7.3      | Kostenstruktur .....                                                | 225        |
| 7.4      | Wirtschaftlichkeitsberechnung.....                                  | 226        |
| 7.4.1    | Einleitung .....                                                    | 226        |
| 7.4.2    | Berechnung der Wärmegestehungskosten mit der Annuitätenmethode..... | 227        |
| 7.4.3    | Barwertmethode (NPV) und interner Zinssatz (IRR) .....              | 227        |
| 7.4.4    | Variantenvergleich .....                                            | 228        |
| 7.4.5    | Sensitivitätsanalyse .....                                          | 228        |
| 7.5      | Businessplan .....                                                  | 229        |
| 7.5.1    | Aufbau und Inhalte .....                                            | 229        |
| 7.5.2    | Planbilanz und Planerfolgsrechnung.....                             | 229        |
| 7.6      | Wärmeliefervertrag .....                                            | 230        |
| 7.6.1    | Allgemein .....                                                     | 230        |
| 7.6.2    | Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB) .....                         | 231        |
| 7.6.3    | Technische Anschlussvorschriften (TAV) .....                        | 231        |
| 7.6.4    | Preisgestaltung und Tarifstruktur .....                             | 232        |
| 7.6.5    | Preisänderungsklausel.....                                          | 234        |

|                     |                                                                              |            |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.7                 | Dokumentation.....                                                           | 234        |
| <b>8</b>            | <b>Optimierung .....</b>                                                     | <b>235</b> |
| 8.1                 | Wärmezentralen .....                                                         | 235        |
| 8.2                 | Übergangslösungen.....                                                       | 236        |
| 8.3                 | Mess- und Regelungstechnik .....                                             | 237        |
| 8.4                 | Monitoring .....                                                             | 237        |
| 8.5                 | Temperaturanpassungen in bestehenden Netzen.....                             | 238        |
| 8.6                 | Niedertemperatur-Kompatibilität .....                                        | 239        |
| 8.7                 | Subnetze oder Insellösungen .....                                            | 239        |
| 8.8                 | Anreiztarife für tiefe Rücklaufftemperaturen .....                           | 239        |
| 8.9                 | Kundenseitige Optimierung .....                                              | 240        |
| 8.10                | Aktives Lastmanagement .....                                                 | 240        |
| 8.11                | Digitaler Zwilling.....                                                      | 242        |
| 8.12                | Dreileiter-Anschluss .....                                                   | 243        |
| 8.13                | Einsatz thermischer Energiespeicher ...                                      | 244        |
| 8.14                | Güte der Kundenanlagen – Tiefe Rücklaufftemperaturen .....                   | 245        |
| 8.14.1              | Motivation .....                                                             | 245        |
| 8.14.2              | Methode .....                                                                | 245        |
| 8.14.2.1            | Grundlagen.....                                                              | 245        |
| 8.14.2.2            | Mehrverbrauch .....                                                          | 246        |
| 8.14.2.3            | Einfluss auf die Rücklaufftemperatur .....                                   | 246        |
| 8.14.3              | Vorgehen.....                                                                | 247        |
| 8.14.3.1            | Datenerfassung und Auswertung .....                                          | 247        |
| 8.14.3.2            | Beurteilung .....                                                            | 248        |
| 8.14.3.3            | Umsetzung und Erfolgskontrolle .....                                         | 249        |
| 8.14.3.4            | Empfehlungen zum Vorgehen .....                                              | 250        |
| <b>ANHANG .....</b> | <b>251</b>                                                                   |            |
| <b>9</b>            | <b>Stoffwerte von Wasser .....</b>                                           | <b>252</b> |
| <b>10</b>           | <b>Kenngrößen Rohrsysteme.....</b>                                           | <b>254</b> |
| 10.1                | Übertragungsleistung bei verschiedenen Temperaturspreizungen.....            | 254        |
| 10.2                | R-Wert-Tafel für nahtlose Stahlrohre.....                                    | 255        |
| 10.3                | Abmessungen und spezifische Wärmeverluste für KMR-, MMR- und PMR-Rohre ..... | 259        |
| <b>11</b>           | <b>Richtpreise Leitungsbau .....</b>                                         | <b>264</b> |
| <b>12</b>           | <b>Richtpreise Übergabestationen ...</b>                                     | <b>269</b> |
| <b>13</b>           | <b>Symbole für Installationen .....</b>                                      | <b>271</b> |
| <b>14</b>           | <b>Formelzeichen und Indizes .....</b>                                       | <b>272</b> |
| <b>15</b>           | <b>Glossar .....</b>                                                         | <b>276</b> |
| <b>16</b>           | <b>Quellenverzeichnis .....</b>                                              | <b>282</b> |

# Teil 1 – Grundlagen

# 1 Einleitung

## 1.1 Historische Entwicklung

Bei einer mittleren Jahrestemperatur von rund 8°C und jährlich 200 bis 300 Heiztagen kommt der Beheizung von Gebäuden in unseren Breitengraden eine wichtige Rolle zu. Heizung und Warmwasser sind Voraussetzungen für einen hohen Wohnkomfort, aber gleichzeitig auch verantwortlich für einen grossen Teil des Verbrauchs an fossilen Energieträgern.

Das Prinzip der Zentralheizung kam mit Hypokausten zur Wärmeverteilung mittels Warmluft in Fussboden- und Wandheizungen bereits rund 2000 Jahre v. Chr. im griechischen Raum zum Einsatz und wurde später auch von den Römern genutzt. Trotzdem dauerte die Zeit der offenen Feuerstellen und Herde in Europa noch viele Jahrhunderte. So sind erst ab 1000 n. Chr. geschlossene Feuerstellen und Öfen aus Stein und Lehm bekannt. Ab dem 15. Jahrhundert kamen Kachelöfen und ab dem 18. Jahrhundert Eisenöfen dazu, während sich Zentralheizungen erst nach dem zweiten Weltkrieg etablierten. Bis zu dieser Zeit kamen fast ausschliesslich feste Brennstoffe zum Einsatz, während Heizöl ab Ende der 1940-er Jahre und Erdgas noch etwas später grosse Verbreitung fanden.

Die erste Anwendung von Fernwärme geht bereits auf das Jahr 1332 zurück, als in Chaudes-Aigues im französischen Zentralmassiv Wasser aus heissen Quellen zur Beheizung von rund 40 Häusern genutzt wurde [1]. Als erstes Fernwärmenetz im heutigen Sinn gilt jedoch ein in Lockport (New York, USA) errichtetes und mit Dampf betriebenes Netz, das mehrere Kilometer abdeckte [2], [3].

Ab den 1920-er Jahren und verstärkt ab 1960 setzte schliesslich in nördlichen Ländern der Aufbau von Fernwärmenetzen ein. Das Bild 1.1 zeigt dazu ein Beispiel eines Netzes in Leipzig in den 1980-er Jahren. Das erste Fernwärmenetz der Schweiz wurde 1928 in Zürich gebaut, 1934 folgte ein Netz in Lausanne und 1942 das Fernwärmenetz Basel.



Bild 1.1 Fernwärme, Leipzig 1986: Das Bild zeigt die ehemalige Bahnstrecke Eilenburg-Leipzig [4].

Der Anteil thermischer Netze am Endenergieverbrauch für Raumheizung und Warmwasserbereitung wird in Europa auf rund 12% geschätzt (nach [5] mit Daten aus 2021). Es gibt über 17.000 thermische Netze in Europa, die 70 Millionen Einwohner mit jährlich rund 500 TWh Wärme versorgen. Dabei variiert der Anteil der Wärmeversorgung aus thermischen Netzen innerhalb des Kontinents jedoch erheblich (vgl. Bild 1.2). In Nord- und Osteuropa ist Fernwärme die bei weitem am häufigsten genutzte Heizlösung und verzeichnen Anteile zwischen 40% bis gut 90%. Island weist mit über 90% die höchste Versorgungsrate mit Fernwärme auf. In Dänemark beträgt die Abdeckung mehr als 65%, wobei Kopenhagen sogar zu 98% mit Fernwärme versorgt wird. In Ländern, die in den 1980er bis 2000er Jahren einen stark auf Erdgas und/oder Elektroheizungen ausgerichteten Wärmemarkt entwickelt haben, zum Beispiel Deutschland, die Niederlande, das Vereinigte Königreich, Frankreich wie auch die Schweiz, besteht jedoch noch ein grosses Wachstumspotenzial. Während Deutschland mit 10% und die Schweiz mit 11% eine ähnliche Abdeckung aufweisen, ist der Anteil in Frankreich und den Niederlanden mit rund 5% daher deutlich geringer [5].

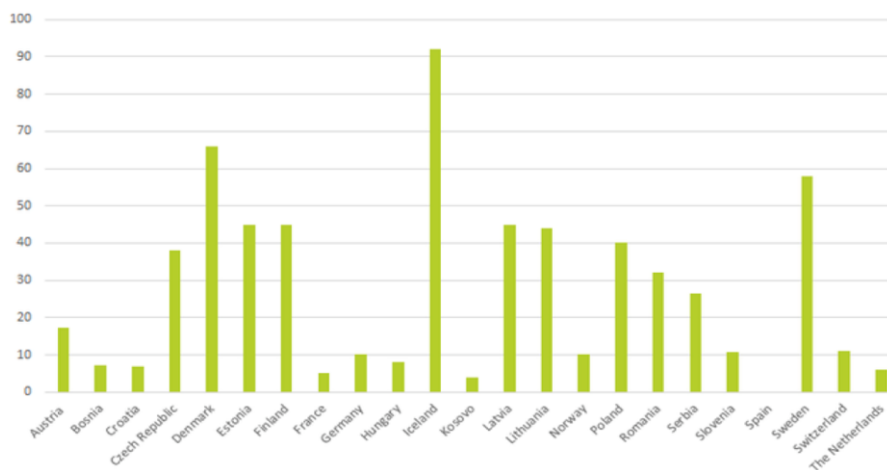


Bild 1.2 Anteil Fernwärme zur Deckung des Wärmebedarfs in Wohnbauten und im Dienstleistungsbereich in verschiedenen Ländern in Europa [5].

## 1.2 Thermische Netze in der Schweiz

### 1.2.1 Aktuelle Situation

In der Schweiz gilt Fernwärme gemäss Gesamtenergiestatistik als diejenige Wärmeversorgung, in der für das Haupttransport- und Verteilnetz öffentlicher Boden beansprucht und Wärme an Dritte verkauft wird [6]. Da die Einschränkung auf verkaufte und über öffentlichem Boden transportierte Wärme keine technischen Konsequenzen hat, gelten die technischen Ausführungen des vorliegenden Handbuchs auch dann, wenn Wärmeerzeuger und Wärmekunde identisch sind und kein öffentlicher Boden beansprucht wird.

In der Gesamtenergiestatistik [6] wird Fernwärme als „Energieträger“ eingeordnet, der 6.2 TWh/a zum Endverbrauch der Schweiz beiträgt. Dies entspricht 2.9% des schweizerischen Endenergieverbrauchs von 213 TWh/a. Der in der Gesamtenergiestatistik als Fernwärme ausgewiesene Beitrag deckt jedoch nur die hauptsächlich von Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) versorgten öffentlich-rechtlichen Netze der Städte und Ballungszentren ab. Kommunale und private Netze, die mit Energieholz, Wärmepumpen und anderen erneuerbaren Energien versorgt werden, sind in der Gesamtenergiestatistik nicht als Fernwärme erfasst, sondern Teil der Kategorien „Holzenergie“ und „übrige erneuerbare Energien“. Der gesamte Anteil der Fernwärme aus KVA, Energieholz und anderen Energieträgern beträgt nach einer Abschätzung des Verbands Thermische Netze Schweiz TNS aktuell rund 10.0 TWh/a [7], was rund 4.7% des Endverbrauchs ausmacht.

Im Rahmen des BFE-Programms «Thermische Netze» wurden ab dem Jahr 2016 unter Leitung der Hochschule Luzern Grundlagen zu thermischen Netzen erarbeitet und die Netze in der Schweiz geografisch erfasst. Das Bild 1.3 zeigt eine Karte mit den aktuell erfassten thermischen Netzen. Die Daten werden inzwischen vom Verband Thermische Netze Schweiz gepflegt und regelmässig aktualisiert. Stand März 2025 sind über 1'500 Netze erfasst.

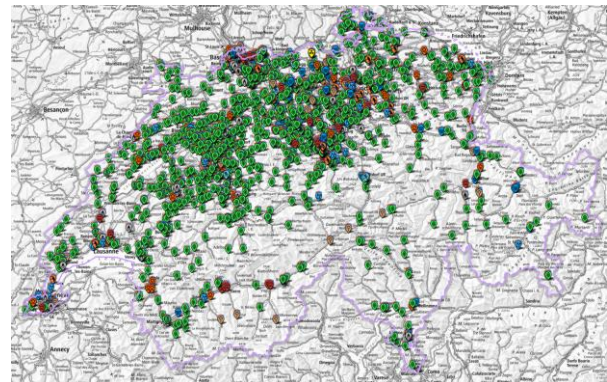


Bild 1.3 Karte mit Daten zu thermischen Netzen in der Schweiz. <https://map.geo.admin.ch>

Eine detaillierte Auswertung zu Leistungen und Energieträgern liegt aus dem Jahr 2021 von insgesamt 1'068 thermischen Netzen vor [8]. Die ausgewerteten Netze umfassen eine installierte Leistung von 4'157 MW. Wie Bild 1.4 zeigt, werden davon 669 Netze mit Holzschnitzel und Holzpellets als Hauptenergieträger versorgt, was rund 63% der Netze entspricht. 138 Netze oder 13% nutzen hauptsächlich Wärmepumpen und 33 oder 3% der Netze nutzen Abwärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen.

Wie Bild 1.5 zeigt, decken die Netze einen Leistungsbe-  
reich von unter 100 kW bis zu über 300 MW ab. Die zwei Netze mit mehr als 300 MW sind in Zürich und Basel, die restlichen Netze mit über 100 MW stehen in Bern, Genf, Lausanne und Zürich-Flughafen. Da diese grossen Netze hauptsächlich Abwärme aus KVA nutzen, machen die an KVA gebundenen Netze rund 45% Anteil der Gesamtleistung aller Netze aus. Die installierte Leistung der thermischen Netze verteilt sich nach [7] daneben auf folgende Hauptenergieträger:

- 45% KVA-Abwärme
- 31% Energieholz aufgeteilt in
  - 30% Holzschnitzel
  - 1% Holzpellets
- 12% Wärmepumpen, davon
  - 4% Seewasser
  - 4% Abwasserreinigungsanlagen (ARA)
  - 2% Erdwärme
  - 2% Grundwasser
- 7% an Erdgas, wovon
  - 2% Heizungen und
  - 4% Blockheizkraftwerke (BHKW).
- 3% Prozessabwärme
- 1% Abwärme Kernkraftwerk
- 1% Weitere Quellen wie Heizöl, Stückholz, Biogas und Tunnelabwärme.

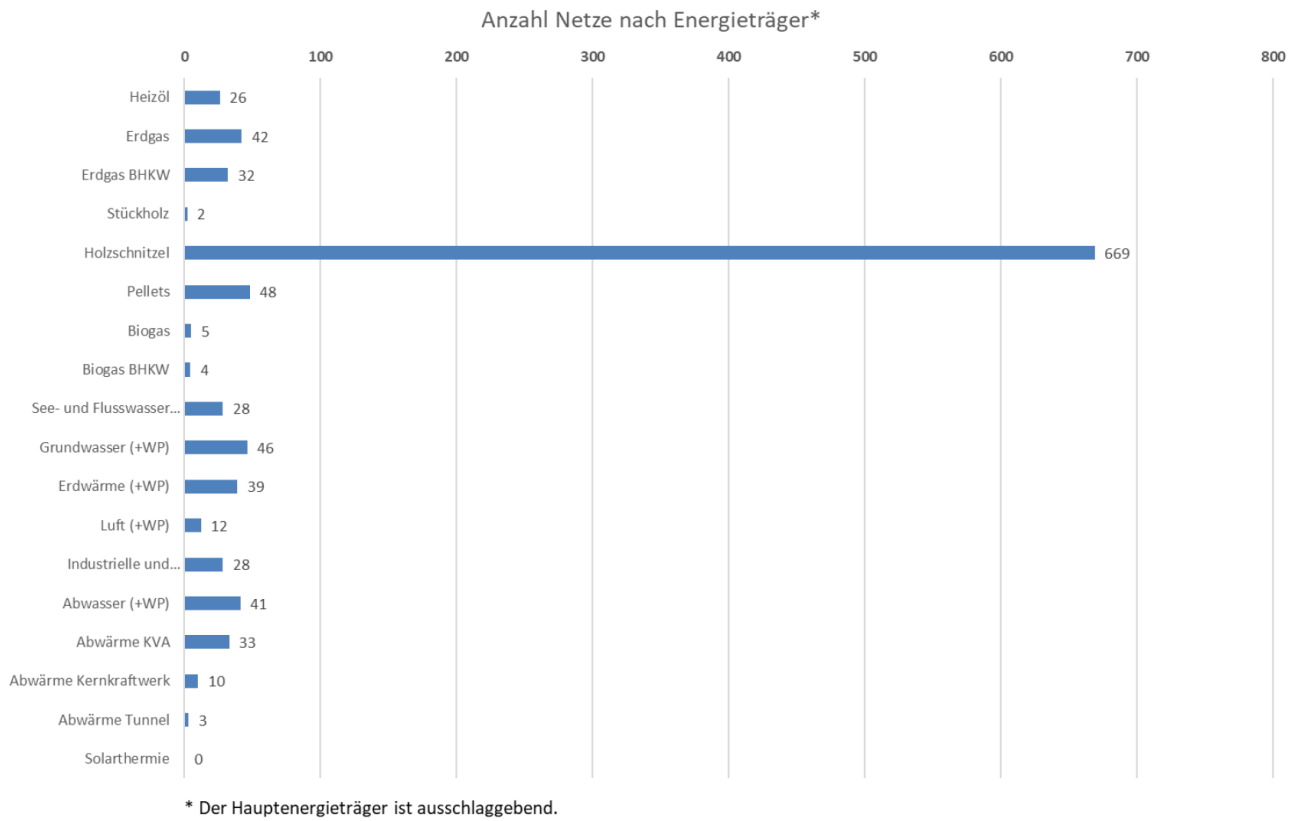


Bild 1.4 Anzahl Netze nach Hauptenergieträger [8].

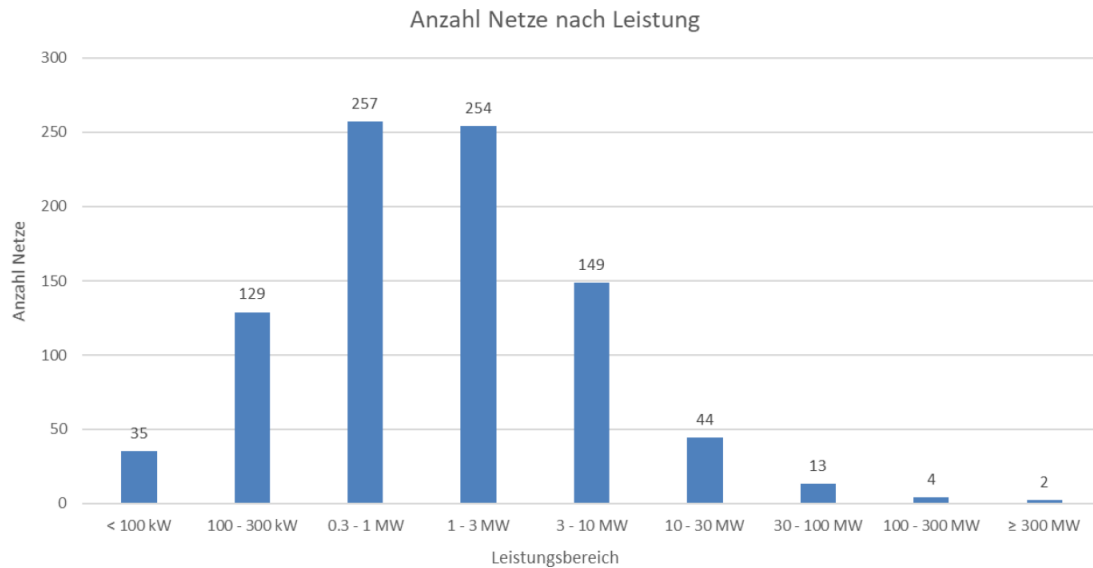


Bild 1.5 Verteilung der Anzahl thermischer Netze in der Schweiz nach installierter Leistung [8].

## 1.2.2 Räumliche Energieplanung

Die rationelle Energienutzung sowie die Wärmeversorgung mit vorwiegend erneuerbaren Energien sind für Städte respektive Gemeinden von grosser Bedeutung bei der Erreichung ihrer Klimaziele und derjenigen des Bundes. Die räumliche Energieplanung bietet eine Grundlage, um die Wärmeversorgung in der Gemeinde zu optimieren und zukunftstauglich auszugestalten. In diesem Zuge identifiziert sie Potenzialgebiete für thermische Netze.

Für Fachpersonen und Gemeindeverantwortliche stehen dazu nützliche Werkzeuge und Informationen zur Verfügung, welche in zehn Modulen (Dokumenten) thematisiert werden. Die zehn Module werden nachfolgend kurz erläutert, es wird jedoch nicht vertieft darauf eingegangen, vielmehr wird auf die Quelle *«Räumliche Energieplanung - Werkzeuge für eine zukunftstaugliche Wärme- und Kälteversorgung; Information für kommunale Behörden und Fachpersonen»* verwiesen ([9], [10]). Zielgruppe sind kommunale Behörden und Fachpersonen.

### Modul 1: Zweck und Bedeutung - Was ist eine räumliche Energieplanung?

Die räumliche Energieplanung koordiniert die Energieversorgung und stimmt sie mit der strukturellen Entwicklung sowie den energie- und klimapolitischen Zielen einer Gemeinde ab. Das Modul 1 erläutert den Zweck und Nutzen der räumlichen Energieplanung und ordnet sie in den energie- und klimapolitischen Kontext auf nationaler und kantonaler Ebene ein.

### Modul 2: Vorgehen - Ablauf und Inhalt

Behandelt den Ablauf und die Organisation der räumlichen Energieplanung und erklärt deren zentrale Bestandteile: Plan, Planungsbericht und Massnahmen. Es werden mögliche Projektorganisationen und Prioritäten dargestellt, die aufzeigen, welche Energieträger in welcher Reihenfolge genutzt werden sollen.

### Modul 3: Energienachfrage

Erläutert die verschiedenen Methoden zur Erstellung einer Energie- und Treibhausgasbilanz für eine Gemeinde. Dabei werden sowohl die Grobbilanz der Energienachfrage, basierend auf nationalen Durchschnittswerten als auch gemeinde- und regionsspezifischen Detailbilanz inklusive Datenquelle behandelt. Zusätzlich wird die Umrechnung der Energiebilanz in eine Treibhausgasbilanz erklärt.

### Modul 4: Energiepotenziale

Verschiedene erneuerbare Energieträger und Abwärmequellen können für die energetische Nutzung in einer Gemeinde infrage kommen. Das Modul 4 erklärt, wie diese Potenziale für Strom und Wärme erfasst werden können und unter welchen Bedingungen sie genutzt werden können.

### Modul 5: Wärme- und Kälteerzeugung

Für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung spielen nicht nur die verschiedenen Energieträger, sondern auch die unterschiedlichen Erzeugungsarten eine wesentliche Rolle. Das Modul 5 befasst sich mit diesen verschiedenen Erzeugungsarten für Wärme und Kälte und geht zudem auf die Sektorkopplung ein.

### Modul 6: Gasnetz der Zukunft

Erdgas wird derzeit intensiv in der Wärmeversorgung genutzt, jedoch erfordert die Klimapolitik mit dem Ziel der Netto-Null-Emissionen bis 2050 eine Umstellung auf erneuerbare Energieträger. Das Modul 6 behandelt die Gasstrategie der Gemeinden und Gasversorgungsunternehmen (GVU), erläutert die Bedeutung der Gasversorgung, die Grundsätze der zukünftigen Energieversorgung und die Handlungsmöglichkeiten für Gemeinden und Gasversorger.

### Modul 7: Grundsätze thermische Netze - Eignung und Wirtschaftlichkeit

Die räumliche Energieplanung ist eine entscheidende Planungsgrundlage für die Umsetzung von thermischen Netzen. Das Modul 7 erläutert, welche Abklärungen für den wirtschaftlichen Betrieb eines thermischen Netzes notwendig sind, wie beispielsweise die Gesteungskosten der Energieerzeugung und die Wärme- sowie Kältebedarfsdichte. So können erste grobe Versorgungsgebiete durch thermische Netze festgelegt werden.

### Modul 8: Organisation und Finanzierung thermischer Netze

Beschreibt das Vorgehen zur Realisierung eines thermischen Netzes: 1. Projektidee konkretisieren, 2. Machbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit beurteilen, 3. Organisations- und Finanzierungsvarianten analysieren, 4. Varianten beurteilen und Vorgehen festlegen. Zudem werden die relevanten rechtlichen Aspekte wie Ausschreibung, Konzession und die Einbeziehung der Bevölkerung behandelt.

### Modul 9: Umsetzung und Energievorschriften - Instrumente und Beispiele

Behandelt die Massnahmen, welche für die zügige Umsetzung der räumlichen Energieplanung empfohlen werden, insbesondere Energievorschriften in Nutzungsplanungen und Kommunikation.

### Modul 10: Erfolgskontrolle - Methodik und Indikatoren

Um die Umsetzung der räumlichen Energieplanung zu überwachen und die Auswirkungen der durchgeführten Massnahmen nachvollziehen zu können, ist eine Erfolgskontrolle erforderlich. Das Modul 10 behandelt die Komponenten dieser Erfolgskontrolle wie Vollzugs-, Wirkungs- und Prozesskontrolle.

### 1.2.3 Potenzial für thermische Netze und Wärmequellen

Der Bundesrat hat im Jahr 2021 einen Bericht über das Potenzial von Fernwärme und Fernkälte in der Schweiz veröffentlicht und Szenarien zur Entwicklung der Fernwärme im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ beschrieben [11]. Die Potenzialerhebung stützt sich unter anderem auf das von der Branche im Jahr 2014 erarbeitete «Weissbuch Fernwärme» ab [12].

Der Bundesrat beschreibt das technische Potenzial als "denjenigen Anteil, der sich mit den vorhandenen Technologien nutzen lässt" und er führt aus, dass in der Schweiz ausreichend erneuerbare Energieträger für die Wärme- und Kälteversorgung über thermische Netze zur Verfügung stehen und das technische Potenzial den Wärmebedarf deutlich übersteigt [11]. Das Weissbuch geht davon aus, dass der Wärmeverbrauch von Gebäuden bis 2050 um 50% und derjenige der Industrie um 20% reduziert wird. Unter dieser Annahme wird das Potenzial zur Deckung des verbleibenden Bedarfs aufgrund der Lage geschätzt und das der Fernwärme „zugeordnete“ Potenzial ausgewiesen, das Kosten zur Wärmeverteilung von maximal 4.5 Rp./kWh verursacht [12].

Das Bild 1.6 zeigt die geografisch gebundenen Potenziale mit orangen Balken und die jeweils zugeordneten Potenziale in blau. Eine detailliertere Auflistung der zugeordneten Wärmepotenziale ist in Tabelle 1.1 dargestellt. Die Erhebung zeigt, dass Seewasser und Geothermie die weitaus grössten Potenziale aufweisen. Unter den zugeordneten Potenzialen weist Seewasser mit 29% Anteil das grösste Potenzial auf gefolgt von KVA mit 21%. Daneben können Holz, Flüsse, Grundwasser und Geothermie je rund 10% des zugeordneten Fernwärmepotenzials decken, während für industrielle Abwärme wegen einer ungenügenden Datenbasis ein Wert von null ausgewiesen wird. Damit können im Jahr 2050 nach verschiedenen Studien zwischen 17 TWh/a und 22 TWh/a Fernwärme bereitgestellt werden [11]. Was bei einem prognostizierten Wärmebedarf von 45 TWh/a für Raumwärme und Warmwasser rund 38% bis 49% des Wärmebedarfs für Gebäude entspricht. Vom zugeordneten Potenzial entfallen dabei allerdings 69% auf Niedertemperaturquellen, die für Fernwärme mittels Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau angehoben werden müssen, weshalb zur Ausschöpfung des Potenzials ein entsprechender Ausbau der Elektrizitätsversorgung erforderlich ist.

Im Bericht des Bundesrats von 2021 [11] werden verschiedene Szenarien zur Entwicklung der Fernwärme nach Tabelle 1.2 wie folgt beschrieben: "Im Szenario ZERO Basis wird für die CO<sub>2</sub>-freie Fernwärmeerzeugung in bestehenden Anlagen Erdgas durch Biogas (bzw. Biomethan) ersetzt. In den thermischen Netzen decken diese insbesondere die Spitzenlast ab. Auf den Einsatz von Wasserstoff wird hingegen aufgrund hoher Kosten verzichtet. Dafür werden die Abwärmepotenziale von Kehrlichtverwertungsanlagen stärker genutzt. Bei den

Geothermie-Kraftwerken wird nur ein Teil des vorhandenen Abwärmepotenzials genutzt, da noch unklar ist, ob sich deren Standorte in ausreichender Nähe zu den Wärmenetzen befinden. Das Szenario ZERO Basis rechnet mit rund 1.5 TWh. Daneben werden Geothermie-Anlagen zur reinen Wärmeerzeugung im Umfang von 2 TWh genutzt. Bei der Nutzung von Umgebungswärme aus Seen, Flüssen und dem Abwasser von Abwasserreinigungsanlagen mittels Wärmepumpen wird mit rund 6 TWh an Wärme gerechnet.

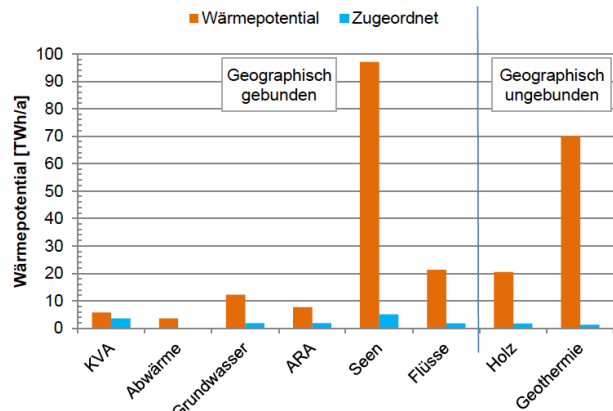


Bild 1.6 Wärmepotenzial verschiedener Wärmequellen (orange) sowie das „zugeordnete“ Potenzial, das im Jahr 2050 den dann noch vorhandenen Bedarf mit Fernwärme zu maximal 4.5 Rp./kWh verteilt werden kann (blau) [12].

An Standorten, wo hochwertige Quellen für Wärmepumpen nicht zur Verfügung stehen, kommt grundsätzlich auch Umgebungsluft als Quelle in Frage. Als Beispiel wurde in einem Heizkraftwerk in Helsinki eine grosse Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Unterstützung des städtischen Wärmenetzes installiert [13]. Die Anlage wurde für den Betrieb auch bei kalten Aussentemperaturen von bis zu -20°C konzipiert. Je nach Aussentemperatur liegt ihre Wärmeerzeugungskapazität zwischen 20 und 33 MW. Durch die Nutzung von Umgebungsluft und erneuerbarem Strom kann die Anlage einen signifikanten Teil des städtischen Wärmebedarfs decken. Dieses Projekt zeigt das Potenzial von Grosswärmepumpen, fossile Brennstoffe in bestehenden thermischen Netzen zu reduzieren und die städtische Wärmeversorgung zu dekarbonisieren.

Eine seit einigen Jahren wichtiger werdende mögliche Quelle zur Versorgung von thermischen Netzen ist die Abwärme aus der Kühlung von Rechenzentren. Die Temperatur der Abwärme von Rechenzentren liegt in der Regel zwischen 20°C bis 30°C. Die Abwärme fällt in der Regel auf einem konstanten Temperaturniveau und während 8'760 Stunden pro Jahr an und kann als Quelle für zentral oder dezentral eingesetzte Wärmepumpen genutzt werden. Im Jahr 2019 wurde der Stromverbrauch für Rechenzentren auf 2.1 TWh/a geschätzt, was rund 3.6% des Schweizer Stromverbrauchs entspricht. Für das Jahr 2026 wird ein Stromverbrauch von 2.7 bis 3.5 TWh/a prognostiziert. Das Abwärmepotenzial der Rechenzentren, als Quelle für thermische Netze, wird

auf rund 2 bis 2.6 TWh/a abgeschätzt. Eine Nutzung dieses Potenzials wird allerdings unter anderem dadurch erschwert, dass der Planungszeitraum zum Betrieb thermischer Netze mindestens 30 bis 40 Jahre beträgt, während für Rechenzentren 10 bis 15 Jahre üblich sind [14].

Tabelle 1.1 Aufteilung der zugeordneten Wärmequellen mit Unterscheidung zwischen einer direkten Nutzung und einer Nutzung mittels Wärmepumpen (WP). Angaben in TWh/a nach [12].

| Wie                                                                                                  | Quelle  | Wärmequelle          | TWh/a | %    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------|-------|------|
| Direkt                                                                                               | Holz    | Holz                 | 1.7   | 9.6  |
|                                                                                                      | Abwärme | Abfall (KVA)         | 3.6   | 20.3 |
|                                                                                                      |         | Abwärme* (Industrie) | 0     | 0.0  |
| WP                                                                                                   | Abwärme | ARA                  | 1.9   | 10.7 |
|                                                                                                      | Umwelt  | Seen                 | 5.1   | 28.9 |
|                                                                                                      |         | Flüsse               | 1.8   | 10.2 |
|                                                                                                      |         | Grundwasser          | 1.9   | 10.7 |
|                                                                                                      |         | Geothermie           | 1.7   | 9.6  |
| Total                                                                                                |         |                      | 17.0  | 100  |
| Total direkte Nutzung                                                                                |         |                      | 5.3   | 31   |
| Total Nutzung mit Wärmepumpen                                                                        |         |                      | 11.7  | 69   |
| Total Bedarf WW und Raumwärme 2050                                                                   |         |                      | 45    | 100  |
| Zugeordnetes Potenzial Fernwärme                                                                     |         |                      | 17    | 38   |
| *Der Wert für Abwärme wird als null ausgewiesen, da die Basis für eine geografische Zuordnung fehlt. |         |                      |       |      |

Tabelle 1.2 Entwicklung des Fernwärmebedarfs gemäss Energieperspektiven 2050+ (Abbildung aus [11]). Angaben in TWh/a und Verteilung in Prozent.  
CCS/NET: Carbon Capture and Storage und Negativemissionstechnologien.

| Szenario          | Gesamtenergieverbrauch der Fernwärme bis 2050 | Haushalte | Dienstleistung und Landwirtschaft | Industrie | CCS/NET (Umwandlungssektor) |
|-------------------|-----------------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------|
| weiter wie bisher | 6 TWh                                         | 42%       | 26%                               | 32%       | 0%                          |
| ZERO-Basis        | 13,8 TWh                                      | 46%       | 21%                               | 14%       | 19%                         |
| ZERO-A            | 10,9 TWh                                      | 34%       | 26%                               | 16%       | 24%                         |
| ZERO-B            | 9,7 TWh                                       | 29%       | 29%                               | 16%       | 26%                         |
| ZERO-C            | 16,7 TWh                                      | 54%       | 18%                               | 13%       | 15%                         |

Thermische Netze können dort wirtschaftlich betrieben werden, wo der Energieabsatz pro zu erschliessender Fläche (der sogenannten **Wärmedichte**) und der Energieabsatz pro Meter Leitungslänge (der sogenannten **Anschlussdichte**) hoch ist. Diese Kennwerte beeinflussen die Wirtschaftlichkeit thermischer Netze entscheidend und dienen deshalb als Entscheidungsgrundlage für die kommunale Energieplanung und die Entwicklung thermischer Netze.

Ein Gebiet mit einer Wärmedichte ab rund 700 MWh pro Jahr und Hektare gilt in einem frühen Planungsstadium

als wirtschaftlich interessant. Ab einem gewissen Planungsfortschritt wird jedoch die Verwendung der Anschlussdichte als Kenngrösse empfohlen, da dann die konkrete Wärmeverteilung mitberücksichtigt wird. Eine Anschlussdichte von mehr als 2 MWh pro Jahr und Meter Trassenlänge gilt grundsätzlich als vorteilhaft, wobei auch kleinere Anschlussdichten wirtschaftlich vertretbar sind, wenn günstig gebaut werden kann.

## 1.2.4 Potenzial für Kälteversorgung

Wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, verteilen 17'000 thermische Netze in Europa jährlich rund 500 TWh Wärme. Daneben werden in Europa etwas über 150 thermische Netze ausgewiesen, die rund 3 TWh Kälte pro Jahr verteilen. Diese dient praktisch ausschliesslich zur Gebäudekühlung im Dienstleistungssektor wie beispielsweise Bürogebäude, Einzelhandel, Gastronomie, Gesundheitswesen, Bildung und Finanzdienstleistungen. Bis anhin macht die Fernkälte zwar noch weniger als 1% der Fernwärme aus, der Energiebedarf zur Gebäudekühlung ist aber in den letzten zehn Jahren doppelt so stark gewachsen wie der Gesamtverbrauch für Gebäude [5].

Euroheat & Power, das europäische Netzwerk für Fernwärme und Fernkälte, geht deshalb von einem starken Wachstum von Fernkälte aus und beschreibt folgende Vorteile im Vergleich zu dezentralen Kühlanlagen [5]:

- Höhere Effizienz der Kälteerzeugung
- Geringere Mengen an Kältemedien in Kältemaschinen und Wärmepumpen
- Verbesserte Kontrolle und Vermeidung von Leckagen
- Gute Möglichkeiten zur Nutzung von Kältequellen für passive Kühlung wie insbesondere Gewässer
- Entlastung des letzten Kilometers des elektrischen Netzes.

Der stark zunehmende Kühlbedarf für Gebäude ist eine wichtige Ursache für den steigenden Elektrizitätsverbrauch und wird durch Klimawandel, wachsenden Wohlstand und Zunahme der Bevölkerung angetrieben. Die Internationale Energie Agentur (IEA) prognostiziert einen zusätzlichen globalen Kühlbedarf für Gebäude von 2800 TWh/a im Jahr 2050 [5].

Für die Schweiz werden folgende Tendenzen für den Heiz- und Kühlbedarf ab dem Jahr 2020 prognostiziert [15]:

- Für ein mittleres Szenario des Klimawandels sinkt die nach Bevölkerung gewichtete Anzahl Heizgradtage bis 2050 um etwa 7.5% von jährlich rund 3400 auf 3150 und bis im Jahr 2100 um etwa 15% auf 2900. Gleichzeitig steigt die Anzahl Kühlgradtage (KGT) um rund 70% von 70 auf 120. Bis im Jahr 2100 steigt der Kühlbedarf um etwa 160% auf 180 KGT. Nach diesem Szenario bleibt der Heizwärmebedarf somit immer noch mehr als einen Faktor 10 höher als der Kühlbedarf. Zudem ist die Zunahme des Kühlbedarfs kleiner als die Abnahme des Heizwärmebedarfs.

- Im Szenario mit der höchsten Klimaerwärmung sinkt der Heizwärmebedarf bis im Jahr 2100 um 40 %, während die Anzahl Kühlgradtage um 1'300% ansteigt.

In einer anderen Studie wird der Kühlbedarf von Gebäuden im Dienstleistungssektor der Schweiz auf heute  $900 \pm 200$  GWh/a bestimmt und für ein mittleres Szenario zur Klimaerwärmung ein Anstieg bis 2050 um 600% prognostiziert [16].

In einer weiteren Abschätzung wird für eine geringe Klimaerwärmung und geringes Bevölkerungswachstum im 2050 ein Kühlbedarf für Gebäude von 3 TWh/a abgeschätzt, der sich für ein mittleres Klimaszenario auf 5 TWh/a erhöht und für das Szenario mit dem höchsten Temperaturanstieg bei hohem Bevölkerungswachstum bis auf über 17.5 TWh/a steigt [17].

Obwohl sich die Modelle unterscheiden, bestätigen alle den grundsätzlichen Trend zu einer deutlichen Zunahme des Kühlbedarfs für Gebäude bei gleichzeitig abnehmendem Wärmebedarf. Trotz der grossen Bandbreite bestätigen die Modelle aber auch, dass selbst bei starker Klimaerwärmung die Gebäudeheizung bis im Jahr 2050 deutlich wichtiger als die Kühlung bleibt. Die grosse Bandbreite des prognostizierten Kühlbedarfs ist hauptsächlich eine Folge der grossen Bandbreite der Prognosen zur Klimaerwärmung. Es ist daher davon auszugehen, dass das Interesse an Fernkälte in der Schweiz weiter zunehmen wird.

Für thermische Netze ist eine Versorgung mit **Wärme und Kälte** dann besonders attraktiv, wenn eine günstig erschliessbare und ergiebige Quelle auf tiefem Temperaturniveau zur Verfügung steht und gleichzeitig ein hoher Bedarf für Wärme und Kälte vorliegt.

Ergänzend sind Gebäude so zu planen und umzurüsten, damit durch passive Gebäudekühlung der Elektrizitätsverbrauch gegenüber aktiven Kühlsystemen deutlich reduziert wird und die Nutzung sommerlicher Überschusswärme, zum Beispiel gespeichert in Erdsondenfeldern, für Heizzwecke im Winter genutzt werden kann.

## 1.3 Grundlegende Unterscheidungsmerkmale von thermischen Netzen

### 1.3.1 Betriebstemperatur

Eine mögliche Einteilung thermischer Netze ist anhand der Vorlauftemperatur nach Bild 1.7 möglich.

Netze mit Vorlauftemperaturen ab  $60^\circ\text{C}$  gelten als **Hochtemperaturnetze** und werden hier auch als klassische Fernwärmenetze bezeichnet. In solchen Netzen steigen die Wärmeverluste mit zunehmender Temperatur und bei Überschreitung bestimmter Grenzwerte werden zudem erhöhte Anforderungen an Apparaturen, Rohre, Leitungsbau, Betrieb etc. gestellt ( $> 110^\circ\text{C}$ ). Weil für erwärmtes Trinkwasser zur Gewährleistung der Sicherheit gegenüber Legionellen eine Mindesttemperatur von  $60^\circ\text{C}$  verlangt wird, werden thermische Netze zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser meist mit Vorlauftemperaturen von mindestens  $65^\circ\text{C}$  bis  $70^\circ\text{C}$  betrieben.

Netze mit Vorlauftemperaturen zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $60^\circ\text{C}$  werden als **Niedertemperaturnetze** bezeichnet. Bei Vorlauftemperaturen ab rund  $30^\circ\text{C}$  wird die direkte Beheizung von Neubauten ermöglicht. Für Warmwasser oder ältere Gebäude kann das Netz als Quelle für dezentrale Wärmepumpen dienen.

Die Niedertemperatur-Verteilung kann anstelle eines klassischen Hochtemperaturnetzes oder als Ergänzung in einem Subnetz erfolgen.

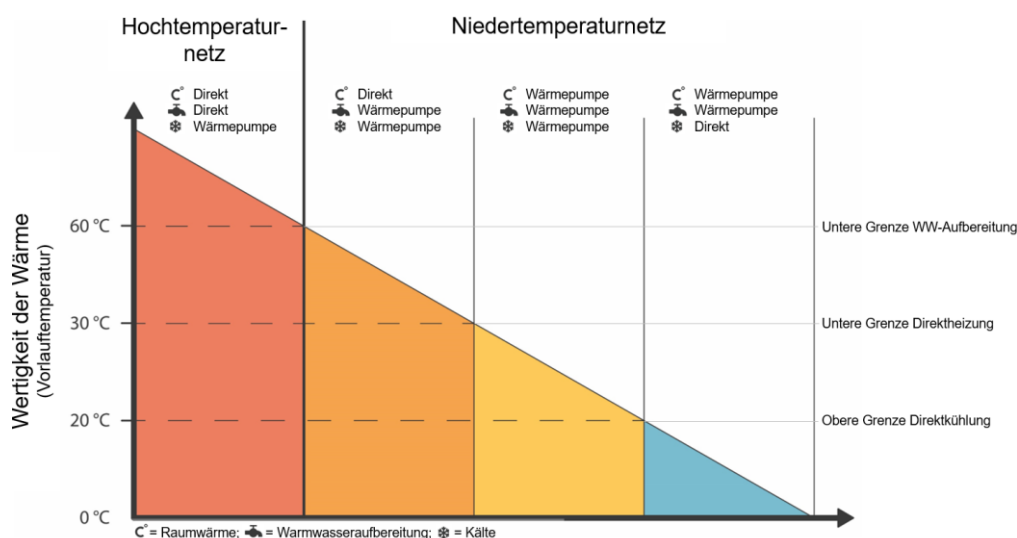


Bild 1.7 Einteilung thermischer Netze in Funktion der Vorlauftemperatur nach [18] und ergänzt in [19].

Wärme mit Vorlauftemperaturen zwischen 0°C bis 20°C stammt vielfach aus Abwärme oder Umgebungswärme und dient als Quelle für dezentrale Wärmepumpen oder zur Direktkühlung, was auch als „**Kälte**“ bezeichnet wird. Für Netze und Anwendungen bei niedrigen Temperaturen werden zum Teil auch folgende Begriffe verwendet, die allerdings nicht einheitlich verwendet werden:

- „Anergienetz“ oder „kalte Fernwärme“ (meist unter 25°C)
- „Fernkälte“ (zur direkten Kühlung geeignet und somit in der Regel sicher unter 20°C)
- „Low-Ex Fernwärme“ (womit ein niedriger Exergiegehalt und niedrige Temperaturen gemeint sind [20] und zum Beispiel der Verband AGFW Netze von 20°C bis 60°C bezeichnet [21]).

Wenn zur Wärmeverteilung Wasser zum Einsatz kommt, muss zur Vermeidung von Eisbildung im ganzen Netz jederzeit eine Temperatur über 0°C gewährleistet werden. Der Temperaturbereich von thermischen Netzen kann jedoch auch durch Zugabe von Frostschutzmittel (zum Beispiel Ethanol oder Glykol) in den Minusbereich erweitert werden.

Durch die **räumliche Vernetzung** von Wärme- und Kälteverbrauchern, die oft mit thermischen Energiespeichern ergänzt werden, sind zum Teil erhebliche Energieeinsparungen möglich. Die Vernetzung von Wärme- und Kälteverbrauchern für ein grösseres Areal wird auch als „**thermische Arealvernetzung**“ bezeichnet und ist ganz grundsätzlich Teil der **Arealentwicklung** [22]. Dabei kommen oft auch Erdsonden zum Einsatz, welche das Erdreich als Wärmespeicher nutzen, um tageszeitliche und saisonale Schwankungen des Wärme- und Kältebedarfs auszugleichen. Diese Arealentwicklung kann als Ausgangslage bei der langfristigen (strategischen) Entwicklung thermischer Netze mit einzelnen Cluster (Areale als Keimzonen) gute Voraussetzungen für einen späteren Zusammenschluss dienen oder es werden für die Areale eigenständige Netze entwickelt. Die Aufgaben und Ziele geografisch zusammenhängender Areale sind gebäudeübergreifende WRG-Potentiale besser zu nutzen, den (fossilen) Primärenergiebedarf zu senken und die Rahmendbedingungen für die Nutzung erneuerbarer Energieträger und Quellen zu verbessern. Je nach Ausgangslage (Heizen, Kühlen, Energiequellen, Temperaturen, Tages, Wochen- und Jahreslastprofile, Gesellschaftsstruktur sowie Business- und Tarifmodel) ergibt sich für ein Areal eine geeignete Betriebsweise gemäss Kapitel 1.3.2. In Kapitel 1.3.2 sind auch diverse Beispiele aufgeführt. Nicht zu unterschätzen sind in dem Zusammenhang auch organisatorische Aspekte sowie die Herausforderung adäquate Lösungen bei Interessenkonflikten involvierter Parteien zu entwickeln. Der Aufwand dafür, personell wie auch finanziell, ist nicht zu unterschätzen und wird im Kapitel 1.6 vertieft.

Der **Begriff „Thermische Netze“** umfasst somit alle Anwendungen zur Verteilung von Wärme. Darin ist auch „Kälte“, was physikalisch Wärme bei Temperaturen unter der Umgebungstemperatur beschreibt, eingeschlossen.

Die meisten bisher realisierten thermischen Netze sind klassische Fernwärmenetze mit Vorlauftemperaturen von über 60°C.

### 1.3.2 Betriebsweise

Thermische Netze lassen sich nicht nur anhand ihrer Betriebstemperatur unterscheiden, sondern auch nach ihrer Betriebsweise (siehe Tabelle 1.3). Die Betriebsweise beschreibt das Zusammenspiel zwischen dem Netz und den Kunden. Dabei gibt es zwei wesentliche Unterscheidungsmerkmale (nach [18]):

1. Die Richtung der **Fluidströmung**: *gerichtet* oder *ungerichtet*.
2. Der **Energiefluss** im System: *unidirektional* oder *bidirektional*.

#### Fluidströmung:

Ein **gerichtetes Netz** liegt vor, wenn das Wasser immer in einer festgelegten Richtung vom Netz zum Kunden fliesst. Die Wärme wird bei einer oder mehrerer Zentren erzeugt, wo das Wasser auf die benötigte Temperatur erhitzt wird. Alternativ erfolgt in einem gerichteten Anergienetz der Temperaturhub dezentral mittels Wärmepumpen. Eine oder mehrere zentrale Pumpe(n) sorgen für den Transport des Wassers zu den Kunden, wodurch die Fliessrichtung vorgegeben ist.

Ein **ungerichtetes Netz** zeichnet sich dadurch aus, dass keine feste Fliessrichtung des Wassers besteht. Jeder Kunde verfügt über eine eigene, umschaltbare Pumpe, mit der er entweder Wasser aus der warmen Leitung zum Heizen (Warmleiter) oder aus der kalten Leitung zum Kühlen (Kaltleiter) beziehen kann.

#### Energiefluss:

Ein Netz ist **unidirektional**, wenn der Energiefluss ausschliesslich in eine Richtung verläuft – von der Wärmequelle zur Wärmesenke. Im Heizbetrieb fungiert der Lieferant als Wärmequelle und der Kunde als Wärmesenke. Die Rollen von Quelle und Senke sind festgelegt und können nicht verändert werden.

In einem **bidirektionalen** Netz können Kunden sowohl als Wärmequelle als auch als Wärmesenke fungieren. Das bedeutet, dass Wärme in beide Richtungen zwischen Netz und Kunde fließen kann. Im Idealfall gleichen sich die Energieflüsse innerhalb des Netzes aus: Einige Kunden entziehen Wärme, während andere Wärme zurückspeisen. Wenn sich die Energieflüsse nicht ausgleichen, wird die Differenz durch zusätzliche Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr kompensiert. Dies kann durch einen Lieferanten oder durch die Integration von Speichern (zum Beispiel saisonale Erdwärmespeicher) erfolgen.

**Hochtemperaturnetze** werden in der Regel gerichtet-unidirektional betrieben. Hier bereitet die Heizzentrale

das Wasser auf, das dann durch eine zentrale Pumpe zu den Kunden transportiert wird. Die Kunden entziehen dem warmen Vorlauf die Wärmeenergie und leiten das abgekühlte Wasser über den Rücklauf zurück zur Heizzentrale.

**Niedertemperaturnetze** werden häufig ungerichtet-bidirektional oder manchmal auch gerichtet-bidirektional betrieben. Der Vorteil beider Betriebsweisen liegt in der

optimalen Nutzung von Synergien: Gebäude, die heizen, kühlen das Wasser ab – und dieses kalte Wasser kann wiederum von Gebäuden mit Kühlbedarf genutzt werden. Dies ermöglicht eine effiziente Abwärmenutzung und reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen zusätzlich.

Tabelle 1.3 Einteilung thermischer Netze nach Richtung der Fluidströmung und Energiefluss (nach [18]).  
WL = Warmleiter, KL = Kaltleiter.

|                            |                                                  | Energiefluss                                                                                      |                                                                                                                           |
|----------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            |                                                  | Unidirektional<br>(Energiefluss in eine Richtung)                                                 | Bidirektional<br>(Energiefluss in beide Richtungen möglich)                                                               |
| Richtung der Fluidströmung | Gerichtet<br>(eindeutige Fliessrichtung)         | Heizen <b>oder</b> Kühlen<br><b>zentrale</b> Pumpe<br>Vor- und Rücklauf sowie WL und KL sinnvoll. | Heizen <b>und</b> Kühlen<br><b>zentrale</b> Pumpe<br>Vor- und Rücklauf sinnvoll,<br>WL und KL ändern je nach Betriebsart. |
|                            | Ungerichtet<br>(keine eindeutige Fliessrichtung) | Kein Praxisbeispiel bekannt                                                                       | Heizen <b>und</b> Kühlen<br><b>dezentrale</b> Pumpen<br>Nur Bezeichnungen Warmleiter und Kaltleiter sinnvoll.             |

Beispiele **gerichtet-unidirektional**:

- Praktische alle klassischen Fernwärmenetze (Hochtemperaturnetze)
- Teilweise auch Niedertemperaturnetze
- Wärmeverbund Riehen [23]
- CAD La-Tour-De-Peilz [23]
- Wärmeverbund Rheinfelden Mitte [23]

Beispiele **gerichtet-bidirektional**:

- Anergienetz Visp [23]
- Anergienetz Rohrschach
- Jardin de la Pâla (Bulle) [23]
- Genève-Lac-Nations (GLN) [23]
- Suurstoffi-Areal Risch Rotkreuz [23]
- Cool-City Zürich
- Viele Seewassernetze.

Beispiele **ungerichtet-bidirektional**:

- Anergienetz ETH Höggerberg [23]
- Anergienetz Friesenberg Zürich (FGZ) [23]
- SBB Werkstadt Area Zürich (Grundwasserfassung bis Gebäudezentralen)
- Cingolago Zug (Seewasserfassung bis Quartierzentralen)
- Seewasser ewl Horw (Seewasserfassung bis Quartierzentralen)
- GSG St.Gallen
- Anergienetz Biel
- Anergienetz Kunsteisbahn Küsnacht KEK
- Anergienetz Uster

Viele der oben aufgeführten Projektbeispiele wurden im Rahmen des BFE-Programms «Thermische Netze» unter Leitung der Hochschule Luzern erfasst und als Fallbeispiele ausführlich beschrieben [23].

Weitere Projektbeispiele im europäischen Kontext sind im IEA-DHC Report «Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook» zu finden [24].

### 1.3.3 CO<sub>2</sub>-Netz als Sonderfall

Ein CO<sub>2</sub>-Netz ist ein thermisches Netz, das sich jedoch im Grundsatz von einem (klassisch) wasserbasierten thermischen Netz unterscheidet. Der Energiefluss entsteht nicht durch den Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf, sondern über den Phasenwechsel des Wärmeträgermediums CO<sub>2</sub>. Das Fluid zirkuliert bidirektional in zwei Leitungen und wird in seinem flüssigen oder gasförmigen Zustand gehalten (Verweis auf Bild unten). Zum Heizen entnehmen dezentrale Wärmepumpen Dampf aus der Gasleitung und führen das Kondensat in die Flüssigkeitsleitung zurück, zum Kühlen verdampfen Kältemaschinen flüssiges CO<sub>2</sub> und führen den Dampf zurück in die Gasleitung. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung der transportierten Energiedichte. In der Folge kann der Rohrdurchmesser im Vergleich zu einem herkömmlichen thermischen Netz um bis zu zwei Drittel reduziert werden.

In dicht besiedelten Gebieten bietet die Verwendung kleinerer Gräben oder die Möglichkeit, die Rohre in bestehende Netzinfrastrukturen zu integrieren, eine schnellere Installation mit minimalen Beeinträchtigungen für das städtische Leben. Die Option, ein wasserbasiertes thermisches Netz mit einem CO<sub>2</sub>-Zweig zu erweitern, kann in vielen Projekten auch eine sinnvolle Ergänzung sein.

Tabelle 1.4 Vergleich Energiedichte, Volumenstrom, Leitungsdimensionierung und Qualitativ die Baukosten von CO<sub>2</sub>-Netz und wasserbasierten Niedertemperaturnetzen (nach Angaben von ExerGo).

| Kriterium                        | CO <sub>2</sub> -Netz                                                                                                                      | wasserbasiertes Niedertemperaturnetz                                                                          |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energiedichte                    | 224-218 kJ/kg<br>bei $T_{\text{sat}} = 2-4^{\circ}\text{C}$                                                                                | 22-13 kJ/kg<br>bei $T_{\text{VL}} = 7^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\text{RL}} = 2-4^{\circ}\text{C}$               |
| Durchfluss für 1 MW              | Flüssigkeit Leitung:<br>17-18 m <sup>3</sup> /h<br>Gas Leitung:<br>155-145 m <sup>3</sup> /h<br>bei $T_{\text{sat}} = 2-4^{\circ}\text{C}$ | 170-285 m <sup>3</sup> /h<br>bei $T_{\text{VL}} = 7^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\text{RL}} = 2-4^{\circ}\text{C}$ |
| Leitungsdimensionierung für 1 MW | 2 x DN 100-DN 125<br>bei $T_{\text{sat}} = 2-4^{\circ}\text{C}$                                                                            | 2 x DN 200-DN 300<br>bei $T_{\text{VL}} = 7^{\circ}\text{C}$<br>$T_{\text{RL}} = 2-4^{\circ}\text{C}$         |
| Baukosten                        | Bis zu 60 % Einsparung bei Rohrleitungs- und Tiefbaukosten                                                                                 | Teurer                                                                                                        |

CO<sub>2</sub>-Netze finden insbesondere bei tiefen Quelltemperaturen Anwendung, wie sie beispielsweise in Oberflächengewässern, bei industrieller Abwärme, Abwärme von Kälteanlagen oder geothermischen Quellen vorzufinden sind. Wenn die Installation einer Wärmepumpe in unmittelbarer Nähe zur Quelle nicht möglich ist, kann die Verwendung von CO<sub>2</sub> die Kosten für die Verbindung zwischen Quelle und Wärmepumpe erheblich senken und gleichzeitig die Einhaltung der geltenden Umweltschriften gewährleisten. Darüber hinaus ermöglicht diese Technologie in steilem Gelände eine nahezu vollständige Reduzierung des Energiebedarfs für das Pumpen von CO<sub>2</sub> durch den Thermosyphon-Effekt, welcher bei überwiegender Wärmebezug die natürliche Zirkulation

fördert und zu einer zusätzlichen Reduktion der Betriebskosten führt. Dies ist möglich, wenn die Quelle tiefer liegt als die Wärmepumpe (Projekt-Beispiel Freiburg [25]).

Das weltweit erste CO<sub>2</sub>-Netzwerk ist seit Mai 2022 in Sitten, Schweiz in Betrieb [26]. Es versorgt drei Universitätsgebäude mit Heiz- und Kühlenergie, wobei Energie aus einer Grundwasserquelle und Abwärme aus einem Rechenzentrum genutzt wird.

Mögliche Einsatzgebiete:

- Heiz- und Kühlbedarf
- Quelltemperatur unter 40°C
- Geringe zulässige Temperaturdifferenz an der Quelle
- Transportsystem weist eine thermische Leistung von über 500 kW auf
- Unterstationen weisen eine Leistung von über 150 kW auf oder können zu Cluster gebildet werden
- Wärmepumpe befindet sich höher als die Quelle
- Durchquerung von schwierigem Gelände mit steilen Abschnitten
- Erforderliche Oberflächendurchführungen
- Stark bebauter Untergrund und enge Platzverhältnisse im Untergrund
- Kurze Bereitstellungszeit

Zu berücksichtigen:

- Erfahrung mit CO<sub>2</sub> spezifischen Komponenten
- sorgfältige Druckhaltung und Überwachung
- Auslegung, Betrieb und Instandhaltung wie bei einem Kältesystem, da Anforderungen an Druckgeräte, Zertifizierungen, Wartung und Sicherheit vergleichbar sind

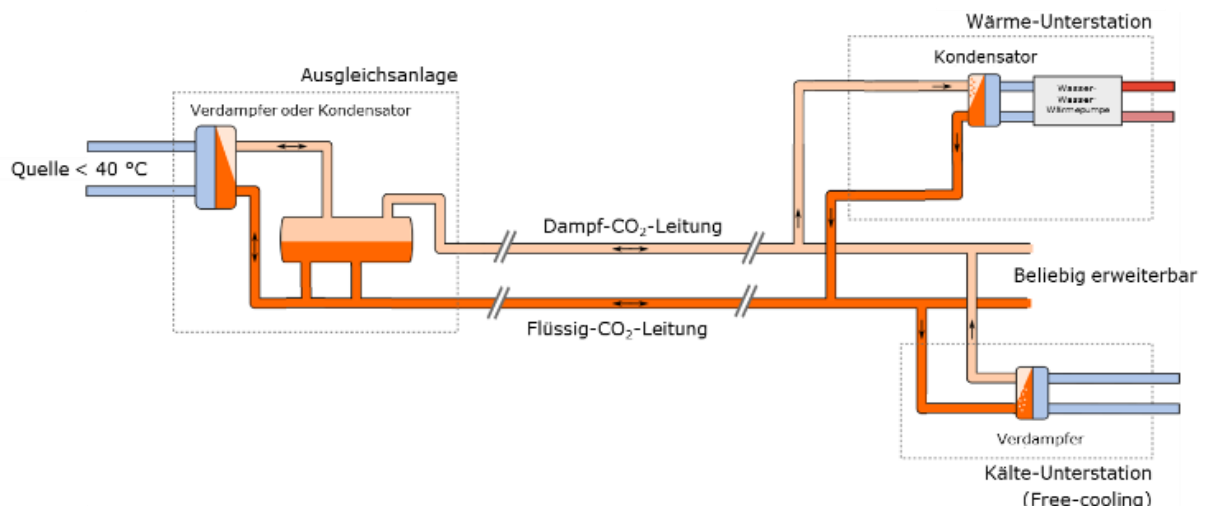


Bild 1.8 Funktionsschema für Wärme- und Kältebereitstellung in einem CO<sub>2</sub>-Netz (Bildquelle: ExerGo)

## 1.4 Vor- und Nachteile

Thermische Netze gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie mit erneuerbaren Energien und Abwärme versorgt werden können und die Vernetzung von Wärme- und Kälteverbrauchern in vielen Fällen zusätzlich Einsparungen an Primärenergie ermöglichen. Für die Kunden entfällt durch den Anschluss an ein thermisches Netz zudem die Notwendigkeit zum Betrieb eigener Wärme- und Kälteerzeuger, wodurch der Raumbedarf im Gebäude und der Unterhaltsaufwand deutlich reduziert werden.

Wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, stammt Fernwärme in der Schweiz derzeit noch hauptsächlich aus KVA-Abwärme und aus automatischen Holzheizwerken. Da diese Wärmequellen nur noch ein beschränktes Zusatzpotenzial aufweisen, muss ein weiterer Zubau verstärkt mit Wärmepumpen und Abwärme aus anderen Prozessen als der Kehrlichtverbrennung und einem ergänzenden Einsatz von Solarthermie erfolgen.

Für die Nutzung von Energieholz ermöglichen thermische Netze den Einsatz grosser, für Verbrennungsanlagen, die zum Beispiel für Holzschnitzel geeignet sind und dank moderner Regelungstechnik und effizienten Feinstaubabscheidern niedrige Schadstoffemissionen aufweisen. Da Energieholz künftig vor allem für heute mit Erdgas und Erdöl erzeugter Prozesswärme benötigt wird, ist der Einsatz von Holzheizungen für Bedarfsspitzen im Winter zu beschränken. Thermische Netze bieten dazu geeignete Voraussetzungen, wenn im Netz zusätzlich Wärmepumpen oder andere Quellen eingebunden werden, welche den Wärmebedarf im Sommer und in der Übergangszeit bei ausreichender Versorgung an erneuerbarer Elektrizität decken.

Den Vorteilen der thermischen Netze stehen die zusätzlichen Verluste und Kosten für die Wärmeverteilung gegenüber. Da ein thermisches Netz hohe Investitionen verursacht, können die Kapitalkosten für die Verteilung bis zu mehr als 50% der Gesamtkosten ausmachen. Daneben sind im Fall von Holzheizungen die Brennstoffkosten zur Deckung der Wärmeverteilungsverluste ein wesentlicher Faktor, während die Stromkosten für die Pumpenergie in der Regel einen kleineren Anteil verursachen [27], [28].

In Bezug auf den Primärenergieverbrauch kann eine zentrale Wärmeerzeugung je nach Anwendung weitere Vorteile aufweisen. So ermöglicht zum Beispiel die Nutzung sonst nicht verwertbarer Abwärme die Einsparung der Energieträger in dezentralen Heizungen. Daneben ermöglicht ein thermisches Netz die Einbindung mehrerer Wärmeerzeuger und Wärmesenken mit einer Optimierung des Anlagenbetriebs in Abhängigkeit der Verfügbarkeit der einzelnen Energieträger. Dies betrifft insbesondere das Angebot an erneuerbarer Elektrizität mit der Möglichkeit dynamischer Strompreise und Einspeisetarife. In thermischen Netzen, die über Wärmepumpen und Holzheizungen verfügen, kann die Wärmeproduktion bei ausreichender Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom mit Wärmepumpen erfolgen, während

bei Strommangel oder hohen Strompreisen auf Holz umgestellt wird. Daneben können Wärmepumpen zum Beispiel auch zur Saisonspeicherung von sommerlichen Stromüberschüssen in Erdsondenfelder genutzt werden. Im Gegenzug besteht bei mit Energieholz betriebenen Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) die Möglichkeit, die WKK-Anlagen während kurzfristigen Phasen mit Strommangel im Winter stromgeführt zu betreiben und die Wärme zu speichern und zeitverzögert zur Versorgung des thermischen Netzes während Phasen ohne Strommangel zu nutzen.

## 1.5 Effizienz und Kosten

Die Wirtschaftlichkeit eines thermischen Netzes werden durch vielfältige Faktoren beeinflusst. Folgende Faktoren sind zu beachten [27], [28]:

1. Die **Wärmeverluste** des Netzes verursachen einen zusätzlichen Wärmebedarf. Im Falle eines Heizkessels wird dazu Brennstoff verbraucht. Der Energieinhalt entspricht dabei den Wärmeverlusten dividiert durch den Kesselnutzungsgrad. Zudem müssen die Wärmeverluste bei der Dimensionierung der Wärmeerzeugung und des Netzes berücksichtigt werden. Die Wärmeverluste sind abhängig vom absoluten Temperaturniveau, nehmen mit zunehmender Oberfläche der Rohrleitung, also mit zunehmendem Rohrdurchmesser zu und sie sinken mit Verbesserung der Wärmedämmung.
2. Eine Verkleinerung der **Rohrdurchmesser** bewirkt tiefere Kapitalkosten und niedrigere Brennstoffkosten, gleichzeitig steigen jedoch der Druckverlust und die Pumpleistung und damit die Betriebskosten für den Stromverbrauch.
3. Daneben beeinflusst die **Temperaturspreizung** zwischen Vor- und Rücklauf die mit einem bestimmten Volumenstrom transportierbare Wärmeleistung. Für die Wärmeleistung gilt:

|                                                                                      |                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T = w A \rho c_p \Delta T$ |                                                        |
| $\dot{Q}$                                                                            | = Wärmeleistung in (kW)                                |
| $\dot{m}$                                                                            | = Massenstrom in (kg/s)                                |
| $\dot{V}$                                                                            | = Volumenstrom in (m³/s)                               |
| $w$                                                                                  | = Strömungsgeschwindigkeit in (m/s)                    |
| $A$                                                                                  | = Rohrquerschnitt in (m²)                              |
| $\rho$                                                                               | = Dichte von Wasser bei 60°C (983 kg/m³)               |
| $c_p$                                                                                | = Wärmekapazität von Wasser bei 60°C (4.183 kJ/(kg K)) |
| $\Delta T$                                                                           | = Temperaturspreizung = (TVL – TRL) in (K)             |

Das Bild 1.9 zeigt den zum Wärmetransport von 1 MW Leistung erforderlichen Volumenstrom in Funktion der Temperaturspreizung.

Eine hohe Temperaturspreizung ermöglicht bei gegebener Anschlussleistung den Einsatz kleinerer Rohre, wodurch die Kapitalkosten und die Wärmeverluste sinken.

Für ein gegebenes Netz ermöglicht eine Vergrößerung der Temperaturspreizung eine Erhöhung der Anschlussleistung. Umgekehrt wird die mögliche Übertragungsleistung durch Nichterreichen der Temperaturspreizung reduziert. Aus diesem Grund ist sicher zu stellen, dass die Wärmeübergabestationen korrekt betrieben werden und die geforderte Temperaturspreizung erreicht werden.

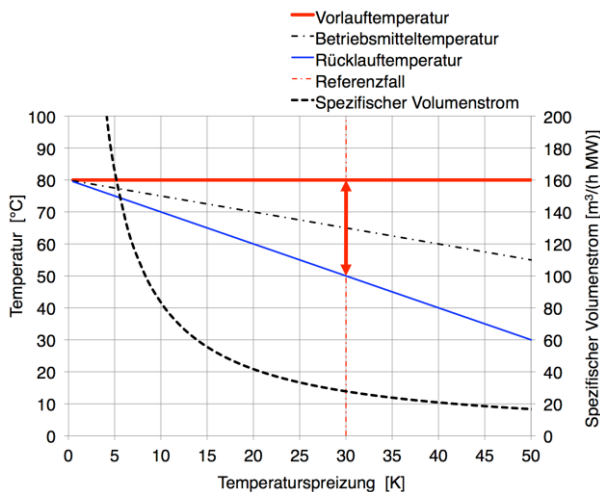


Bild 1.9 Spezifischer Volumenstrom in Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (y-Achse rechts). Der spezifische Volumenstrom entspricht dem Volumenstrom für ein Fernwärmenetz mit 1 MW am Netzeingang. Zusätzlich sind die Vor- und Rücklauftemperaturen für eine Vorlauftemperatur von 80°C eingezeichnet und das Beispiel eines Netzes mit einer Temperaturspreizung von 30 K eingetragen (y-Achse links) [27], [28].

4. Das **Temperaturniveau** des Netzes wirkt sich auf mehrere Arten auf die Effizienz und Kosten aus. Durch Anhebung des Temperaturniveaus mit konstanter Temperaturspreizung steigen die Wärmeverluste des Netzes und es sinkt gleichzeitig die Effizienz der Wärmeerzeugung. Die Effizienzminderung des Wärmeerzeugers hat oft den grösseren Effekt und ist für folgende Anwendungen wichtig:

- Für Wärmepumpen und für Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung mit Dampfprozessen (Dampfturbinen oder ORC-Anlagen). Für diese Fälle ist die Vorlauftemperatur entscheidend, da bei Erhöhung der Nutztemperatur die Leistungszahl der Wärmepumpe bzw. die Stromausbeute der WKK-Anlage sinkt.
- Für Holzkessel mit Abgaskondensation. In diesem Fall ist die Rücklauftemperatur entscheidend, da eine effiziente Wärmerückgewinnung durch Abgaskondensation erst dann eintritt, wenn der Taupunkt des Abgases deutlich unterschritten wird. Wenn die Rücklauftemperatur für eine Abgaskondensation zu hoch ist, besteht auch die Möglichkeit der Einbindung einer Wärmepumpe.

5. Die **Wärmeübergabestationen** haben einen grossen Einfluss auf den Netzbetrieb und die Effizienz der Wärmeerzeugung, da sie die Rücklauftempera-

turen bestimmen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb eines thermischen Netzes ist deshalb die Art und Betriebsweise der Wärmeabgabesysteme bei den Kunden sehr wichtig. Um negative Auswirkungen zu vermeiden, sind im Wärmeliefervertrag und in den Technischen Anschlussvorschriften entsprechende Anforderungen festzuhalten. Zusätzlich kann ein Monitoring der Rücklauftemperaturen helfen, die Qualität der Wärmeübertragung zu überwachen und um bei Bedarf einzugreifen.

Eine Analyse zum Einfluss der Auslegungsparameter auf die Wirtschaftlichkeit zeigt, dass zur Optimierung der Wärmeverteilungskosten die Rohrleitungen auf den kleinstmöglichen, technisch zulässigen Rohrdurchmesser auszulegen sind [27], [28]. Das Bild 1.10 zeigt dazu die Wärmeverteilungskosten für ein Beispiel mit folgenden Annahmen:

- 1 MW Anschlussleistung
- 1 km Trassenlänge
- Ganzjährig betriebenes Netz
- Kunden mit 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr
- Die Anschlussdichte beträgt am Netzeingang damit 2.0 MWh/(m a). Bei 10 % Netzverlusten entspricht dies am Netzausgang 1.8 MWh/(m a)
- Vorlauftemperatur 80°C
- Temperaturspreizung 30 K
- Annuität 5.1 % p.a. (30 Jahre, 3.0 % p.a.)
- Wärmekosten am Netzeingang 6.0 Rp./kWh
- Maximale Strömungsgeschwindigkeit nach ÖKL Merkblatt 67 [29]. Diese vom Rohrdurchmesser abhängige Bedingung ist in Bild 1.11 illustriert und entspricht etwa einem Druckverlust von 200 Pa/m.
- Kosten Leitungsbau nach Richtpreisen von 2009 gemäss Planungshandbuch Fernwärme (V1.3 [30]).

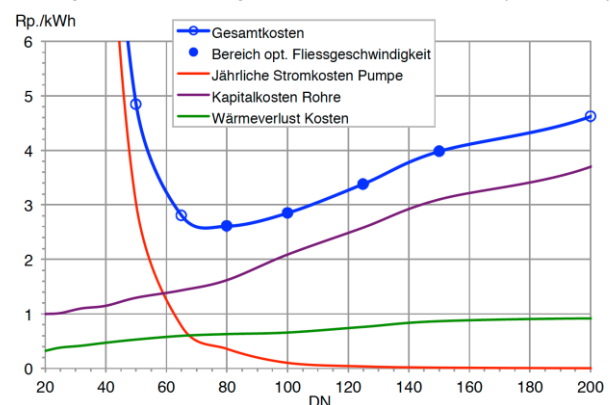


Bild 1.10 Wärmeverteilungskosten als Gesamtkosten und unterteilt in Kapital-, Wärmeverlust- und Stromkosten in Funktion des Nenndurchmessers DN [27], [28]. Die ausgefüllten Symbole zeigen den kleinsten zulässigen und die folgenden drei grösseren Nenndurchmesser.

Im Bild 1.10 sind die Wärmeverteilungskosten in Abhängigkeit des Nenndurchmessers dargestellt und weisen ein klares Minimum auf, das mit dem kleinsten zulässigen Nenndurchmesser zusammenfällt. Die minimalen Wärmeverteilungskosten betragen dabei 2.6 Rappen pro Kilowatt-

stunde an die Kunden gelieferte Wärme. Eine Auslegung auf einen Nenndurchmesser grösser als notwendig verteuert die Wärmeverteilung um 9%, zwei Nenndurchmesser grösser um etwa 30%. Aufgrund der Teuerung ist seit Erstellung der Studie ([27], [28]) mit zum Teil deutlich höheren Investitions- und Baukosten für den Leitungsbau zu rechnen, gegenüber den Richtpreisen von 2009 (Planungshandbuch Fernwärme V1.3 [30]) und den neu erhobenen Kosten für den Leitungsbau gemäss Kapitel 11, betragen diese bei KMR bis 130%. Was die Wichtigkeit einer optimalen Auslegung umso deutlicher macht.

Der kleinste zulässige Nenndurchmesser wird dabei durch die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit bestimmt, welche einen Betrieb ohne unzulässige Kavitation und Geräuschentwicklung sicherstellt. Das Bild 1.11 zeigt die entsprechenden Empfehlungen nach ÖKL Merkblatt 67 [29] und nach der Swedish District Heating Association [3] in Funktion des Rohrdurchmessers. Daneben sind auch die Strömungsgeschwindigkeiten bei einem Druckverlust von 100, 200 und 300 Pa/m dargestellt. Eine Praxiserhebung an 52 Fernwärmenetzen zeigt, dass rund 80% der Haupt- und Teilstänge grösser ausgeführt sind als effektiv erforderlich [28]. Die Überdimensionierung entspricht meist einem oder zwei, vereinzelt jedoch bis zu vier Nenndurchmesser und sie verursacht im Vergleich zu einem Netz mit kleinstmöglichem Rohrdurchmesser deutlich höhere Wärmeverluste und Kosten.

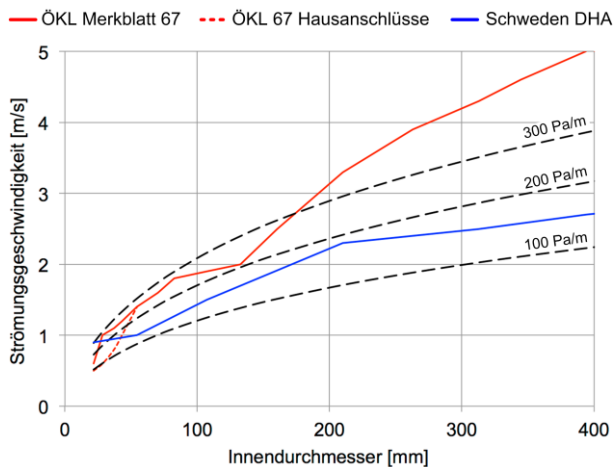


Bild 1.11 Strömungsgeschwindigkeiten in Funktion des effektiven Rohrdurchmessers (Innendurchmesser): Empfehlungen für maximale Fließgeschwindigkeit nach ÖKL Merkblatt 67 [29] und Empfehlungen der Swedish District Heating Association [3]. Zudem sind die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend Druckverlusten von 100, 200 und 300 Pa/m dargestellt [27], [28].

Die wichtigsten **Einflüsse auf die Effizienz und Wirtschaftlichkeit** von thermischen Netzen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Investitionskosten, die Netzverluste und der Hilfsenergieverbrauch eines thermischen Netzes werden durch folgende Parameter bestimmt:
  - Durch die Dimensionierung der Rohrleitungen,
  - durch das Rohrsystem (Material, Dämmstärke, Ausführung),
  - durch die Verlegebedingungen
  - sowie durch die Netzstruktur.
2. Die Effizienz der Wärmeerzeugung wird durch folgende Parameter des thermischen Netzes beeinflusst:
  - Durch die Temperaturspreizung,
  - das absolute Temperaturniveau,
  - das Betriebsverhalten
  - und die Anzahl Vollbetriebsstunden.

## 1.6 Organisatorische Aspekte

Der Anschluss an ein thermisches Netz berührt eine Vielzahl unterschiedlicher Interessengruppen. Eine Fülle von Einzelmassnahmen fügen sich zu einem funktions-tüchtigen Ganzen zusammen. Neben dem Versorgungsunternehmen und dem Kunden als Vertragspartner, könne im Einzelfall die Verwaltungsfirma, die Mietenden, das Planungsbüro, die Installationsfirma, das Grosshandelsunternehmen, der Komponentenhersteller, die Stationshersteller, die IT- und die Heizkostenabrechnungsfirmen am Projekt beteiligt sein. Gegenläufige Interessenslagen der Beteiligten erfordern vom Versorgungsunternehmen ein hohes Mass an Beratungsleistung [31].

Bei der sogenannten sozioökonomischen Betrachtung geht es darum, Erfolgsfaktoren und Hemmnisse bei Planung, Realisierung und Betrieb von thermischen Netzen mit einer umfassenden Sichtweise zu identifizieren, dies in Ergänzung zu technischen oder wirtschaftlichen Betrachtungen (siehe Bild 1.12). Die Ergebnisse unterstützen die verschiedenen Interessengruppen bei Planung, Realisierung und Betrieb thermischer Netze.

Dabei stehen die folgenden Elemente im Fokus [32]:

- **Identifikation und Strukturierung** der zentralen Interessengruppen

- **Motivationen und Handlungsspielräume** der zentralen Interessengruppen
- **Entscheidungsmuster** der zentralen Interessengruppen.

Diese grundlegenden Elemente tragen zu einem besseren Verständnis der Denkweisen wichtiger Interessengruppen bei. Sie unterstützen einen Perspektivenwechsel, durch den Entscheidungen verschiedener Interessengruppen eingeordnet und besser verstanden werden können. Aus diesen grundlegenden Elementen leiten sich aus sozioökonomischer Sicht zwei Hauptachsen für erfolgreiches Agieren bei thermischen Netzen ab, den Austausch mit den Interessengruppen gestalten, das heisst insbesondere die **Interaktionsstufe** mit Interessengruppen bewusst wählen und die Vorteile partizipativer Ansätze nutzen sowie entsprechende **Entscheidungssituationen** gestalten [32].

Die Kommunikative Begleitung eines grossen Infrastrukturprojekts ist, wie oben angedeutet, essentiell für dessen Akzeptanz in der Bevölkerung. Eine enge kommunikative Einbindung aller Stakeholder in allen Projektphasen ist dabei entscheidend. Der Aufwand, personell wie auch finanziell, ist nicht zu unterschätzen. Oft werden dazu auch externe Fachleute engagiert.

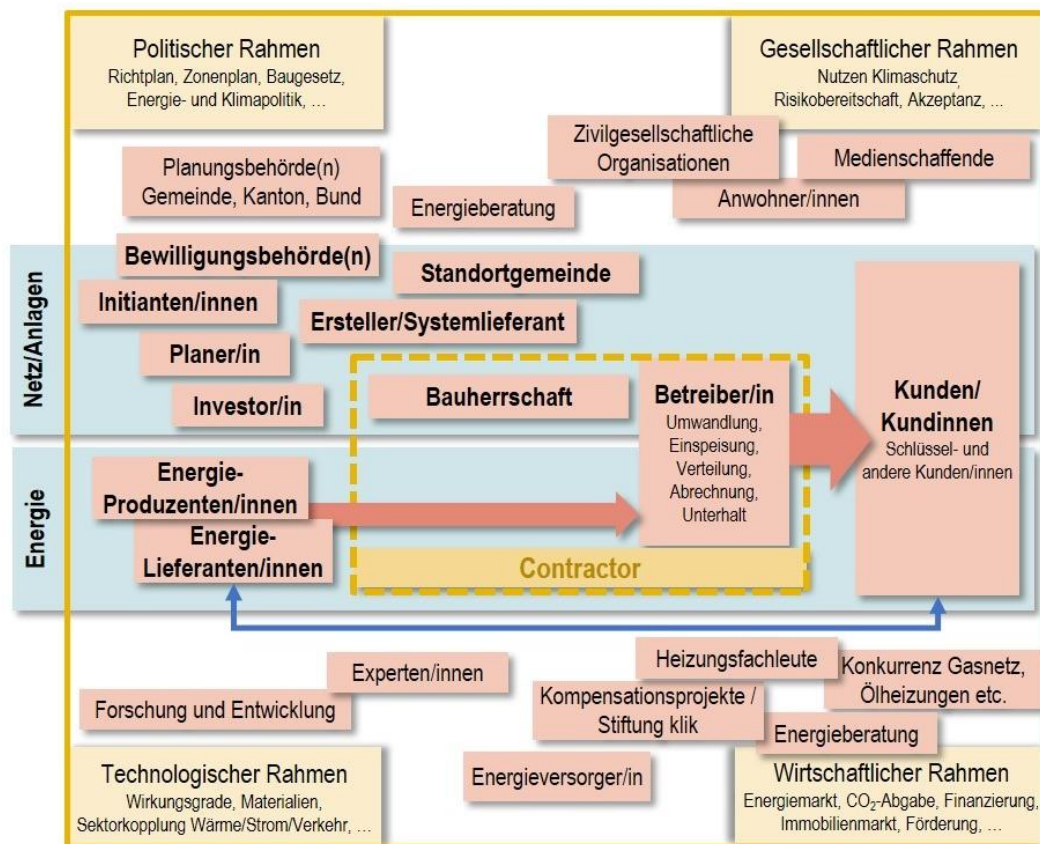


Bild 1.12 Identifikation der Interessengruppen: Übersicht zu möglichen Interessengruppen eines thermischen Netzes [32].

Das Versorgungsunternehmen ist bestrebt, unter optimierter Kostensituation, zum Kunden ein langjährige Geschäftsbeziehung zu entwickeln, welche 50 Jahre und mehr Bestand haben soll. Nur wer ist der Kunde? Ist es die Hauseigentümerschaft als Vertragspartner, deren Verwaltungsfirma, die Mietenden? In der Summe müssen alle «Nutzenden» zufriedengestellt werden (vgl. [31]):

- Die Hauseigentümerschaft ist an niedrigen Investitions- und Betriebskosten interessiert.
- Eine Verwaltungsfirma interessiert in der Regel ein geringer administrativer Aufwand.
- Die Mieterschaft und die Nutzenden erwarten eine preiswerte und zuverlässige Versorgung sowie einen verlässlichen Ansprechpartner im Störfall.
- Das Planungsbüro und die Installationsfirmen erwarten bei der Umstellung vorhandener Heizungsanlagen oder bei Neubauten einen möglichst weiten Spielraum für die Projektierung und Ausführung. Des Weiteren erhoffen sich Fachfirmen auf Anschlussaufträge, zum Beispiel in Form von Serviceverträgen.
- Klare, übersichtliche und normierte Anforderungen erleichtern Komponenten- und Stationshersteller sowie Grosshandelsfirmen die Sortimentsgestaltung und die Lagerhaltung.
- Spezialisierte Heizkostenabrechnungsfirmen erstellen für die Hauseigentümerschaft oder deren Verwaltungsfirma die Heiz- und Nebenkostenabrechnung. Entsprechend liegt auch das Interesse auf einen geringen administrativen Aufwand und eine gute Datenlage.

Eine für alle Beteiligten vorteilhafte Betriebsweise ergibt sich immer dann, wenn das vom Versorgungsunternehmen gelieferte Wärmeträgermedium möglichst weit ausgekühlt (Heizen) respektive aufgewärmt (Kühlen) wird. Die Kostenvorteile der geringeren Belastung des Netzes werden an den Kunden weitergegeben, meist in Form von tieferen Anschlusskostenbeiträgen oder entsprechenden Tarifsyste-men.

Das Versorgungsunternehmen, die Planungsbüros und Installationsfirmen sollten im Interesse einer guten technischen Lösung bei einem Anschluss an ein thermisches Netz gleichzeitig eine Optimierung der Hauszentrale und Hausanlage (Sekundärseite) anstreben. Die Kosten der Optimierung sind zunächst von der Hauseigentümerschaft aufzubringen, ohne dass daraus unmittelbar ein finanzieller Vorteil entsteht. Infolge der durch die Optimierung sinkenden Nebenkosten sind die Wohnungen oder Räume allerdings attraktiver und somit leichter zu vermieten. Auf der anderen Seite führen Optimierungen auf der Sekundärseite (Gebäudetechnik) in der Regel zu tieferen Rücklauftemperaturen, welche vor allem dem Versorgungsunternehmen zugutekommen. In diesem Fall gilt es abzuwägen, ob eine Kostenbeteiligung oder Unterstützung gegenüber dem Kunden vorteilhaft ist.

Die Leistungs-, Liefer- und Eigentumsgrenze bei einem Anschluss an ein thermisches Netz ist abhängig von den

vertraglichen Vereinbarungen zwischen dem Versorgungsunternehmen und dem Kunden. Diese können örtlich stark variieren, es sind Vertragsmodelle anzutreffen, deren Eigentumsgrenze an den Absperrarmaturen nach dem Gebäudeeintritt liegt bis hin zur vollständigen Kontrolle und Versorgung der Sekundärseite auf der Kundenseite. Mit der Verschiebung der Leistungs-, Liefer- und Eigentumsgrenze verändern sich sowohl die Kostenanteile, die Verantwortlichkeiten als auch die Einflussmöglichkeiten. Es ist somit eine Frage der Unternehmensphilosophie sowie der personellen und finanziellen Möglichkeiten des Versorgungsunternehmens, wie die Leistungs-, Liefer- und Eigentumsgrenze gestaltet wird. Die Erweiterung des Verantwortungsbereiches ist aber auch eine Chance eine verstärkte Kundenbindung zu erreichen. Eine solchermassen erweiterte Unternehmensphilosophie setzt in weit höherem Masse wirtschaftliches und wettbewerbsbezogenes Denken und Handeln alle Unternehmensmitarbeiter voraus. Dies bedeutet insbesondere, dass in jeder Situation aktiv auf den Kunden zugegangen und dass kundenorientiert flexibel gehandelt werden muss. Die Zuständigkeit des Versorgungsunternehmens endet nicht mehr an der Übergabestation, sondern vielmehr an einem mit jedem Kunden individuell vereinbarten Punkt.

Eine Art Sorglospaket in Form von grosser technischer, beratender und administrativer Kompetenz in Kombination mit einem wirksamen Störungsmanagement sind da überzeugende Argumente. In der Praxis kommt es bei einer Störung häufig vor, dass zuerst das Versorgungsunternehmen angesprochen und um Hilfe gebeten wird. Dieser Umstand unterstützt den Trend zur kompletten Zuständigkeit des Versorgungsunternehmens. Neue Angebote der Wärmeversorgung weisen in diese Richtung. Eine Voraussetzung dafür ist, jedenfalls geht der Trend dahin, über eine zentrale Fernüberwachung und/oder Steuerung der Übergabestationen, entsprechend Daten und Steuerbefehle austauschen zu können.

Der formelle Ablauf für einen Anschluss an ein thermisches Netz ist im Prinzip gekennzeichnet durch ein schriftliches Angebot des Versorgungsunternehmens aufgrund einer formlosen Anfrage eines interessierten Kunden. Bei Annahme des Angebots wird ein Wärmeliefervertrag zwischen dem Versorgungsunternehmen und dem Kunden abgeschlossen. Die beauftragte Heizungsfachfirma (Planer oder Installateur) ermittelt die technischen Daten der Hausanlage, diese werden Bestandteil des Wärmeliefervertrages. Der von der Heizungsfachfirma einzureichende Inbetriebsetzungsantrag sollte Auskunft über die technisch relevanten Daten der Hauszentrale und Hausanlage geben. Unter Beteiligung des Installateurs wird nach vorheriger Prüfung im vereinbarten Umfang vom Versorgungsunternehmen die Übergabestation und gegebenenfalls die Hauszentrale in Betrieb genommen. Entsprechend der Eigentums- und Zuständigkeitsregelung sind nach der Inbetriebnahme das Versorgungsunternehmen und die Kundschaft für ihre jeweiligen Anlagenteile verantwortlich. Das gilt für den Betrieb, die Instandhaltung und den Störungsdienst.

## 2 Wärmebereitstellung und Thermische Energiespeicher

In diesem Kapitel werden die Grundzüge zum Wärmebedarf und Wärmeleistungsbedarf behandelt sowie die Aufteilung der Jahresdauerlinie in Grund- und Spitzenlast beschrieben. Zudem werden die wichtigsten Wärmeerzeuger beschrieben und deren Beeinflussung durch den Netzbetrieb und die Einbindung von Wärmespeichern erläutert. Für den Wärme- und Leistungsbedarf wird unterschieden zwischen Prozesswärme und Gebäudewärme. Der Wärme- und Leistungsbedarf von Gebäuden umfasst dabei Wärme zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitstellung. Der Heizwärmebedarf ist witterungs- und saisonabhängig, während der Bedarf an Prozesswärme und Warmwasser zum überwiegenden Teil witterungsunabhängig ist.

### 2.1 Wärme- und Wärmeleistungsbedarf einzelner Kunden

#### 2.1.1 Raumwärme

Der **Jahreswärmebedarf für Raumwärme** wird bei Neubauten anhand der SIA-Norm 380/1 berechnet [33]. Diese berücksichtigt interne Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung, Personen, elektrische Geräte und weitere Quellen. Für bestehende Bauten erfolgt die Berechnung in der Regel auf Basis des bisherigen Energieverbrauchs, also zum Beispiel anhand des jährlichen Brennstoffverbrauchs und des Jahresnutzungsgrades des bestehenden Wärmeerzeugers. Eine Aufteilung in Raumwärme, Warmwasser und Prozesse ist zu empfehlen respektive ohne zuverlässigen Verbrauchs- oder Messwerte entsprechend abzuschätzen.

Der **Norm-Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme** wird für Neubauten nach SIA 384/2 berechnet [34]. Im Gegensatz zur SIA 380/1 werden dabei keine Wärmegewinne berücksichtigt, da deren zeitlicher Anfall weder steuerbar noch sicher vorhersagbar ist. Eine Untersuchung bei Mehrfamilienhäusern und Verwaltungsgebäuden zeigt, dass bei Neubauten deutlich zu hohe Leistungsbedarfe angenommen werden. Bei MFH im Median rund 40%, bei Verwaltungsgebäuden ist die Überdimensionierung zwischen +100% bis +300% deutlich prägnanter [35]. Die festgestellte Überdimensionierung kann bei Wohngebäuden mit einer einfachen Plausibilisierungsmethode reduziert werden, bei Verwaltungsgebäuden wird die Anwendung der SIA 380/2:2022 (dynamische Gebäudesimulation [36]) empfohlen. Die Mehrkosten einer Überdimensionierung übersteigen die Zusatzkosten einer dynamischen Gebäudesimulation um ein Vielfaches. In fast allen Fällen der Verwaltungsgebäude wäre eine Wärmeerzeugerleistung nach Norm-Heizlast ausreichend gewesen, jedoch führt die Berücksichtigung von hohen Zuschlägen wie z.B. Lüfterhitzer

oft zu einer deutlichen Überschätzung des Leistungsbedarfs [35].

Bei bestehenden Bauten ist die beste Methode zur Ermittlung des Wärmeleistungsbedarfs die Bestimmung der **Lastkennlinien** anhand von Messungen, was insbesondere bei grossen Verbrauchern und bei Prozesswärme klar empfohlen wird. Messungen sind aber nur möglich, wenn genügend Zeit und eine funktionsfähige Wärmeerzeugungsanlage zur Verfügung stehen. Zuverlässige Berechnungen zum Wärmeleistungsbedarf sind dagegen selten vorhanden oder die Daten beruhen auf veralteten Berechnungsmethoden. Für neue Berechnungen fehlen dagegen oft detaillierte Pläne und Informationen zum Wandaufbau und anderen Kenngrössen. Häufig wird deshalb eine Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs aus dem bisherigen Wärmeverbrauch angewendet. Der maximale Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme ergibt sich durch Division des Heizwärmebedarfs durch eine geeignete jährliche Vollbetriebsstundenzahl. Die Vollbetriebsstundenzahl ist abhängig vom Klima, der Heizgrenze, der Gebäudenutzung (Wohnen oder andere) sowie dem nicht witterungsabhängigen Anteil. Diese Methode ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da nach neusten Erkenntnissen diese Methode auf Basis vorhandener Kennzahlen zu einer Überschätzung des Leistungsbedarfs führen können. Eine laufende Studie (OptiSanPower [37]) zeigt bereits erste Ergebnisse im Zwischenbericht, welche darauf hindeuten. Die abschliessende Beurteilung ist abzuwarten.

Bevorstehende Energiesparmassnahmen können den Jahreswärmebedarf, den Wärmeleistungsbedarf und die Temperaturanforderungen zusätzlich beeinflussen und sind bei der Auslegung zu berücksichtigen. Bei Gebäuden ist dabei entscheidend, dass der spezifische Raumwärmebedarf durch effizientere Gebäude deutlich sinkt, während der Bedarf an Warmwasser dadurch kaum beeinflusst wird. So machte die Warmwassererwärmung in den Jahren um 1970 lediglich knapp 10% des Wärmebedarfs aus, während nach heutigen Gebäudestandard mit Werten bis gegen 50% zu rechnen ist. Die Sanierung bestehender Gebäude kann deshalb während der gesamten Betriebszeit eines thermischen Netzes zu einer Reduktion des Raumwärmebedarfs führen. Dass dabei der Jahreswärmebedarf sinkt, kann sich betriebswirtschaftlich nachteilig auf den Netzbetrieb auswirken. Gleichzeitig steigt jedoch der Anteil des witterungsunabhängigen Wärmebedarfs, was für den Netzbetrieb in der Regel von Vorteil ist, wenn das Netz weiter verdichtet werden kann.

#### 2.1.2 Warmwasser und Prozesswärme

Die Berechnung des **Jahreswärmebedarfs für Warmwasser** bei Neubauten erfolgt üblicherweise aufgrund einer vorgegebenen Standardnutzung. Bei bestehenden Bauten erfolgt die Berechnung meist aufgrund des bisherigen Energieverbrauchs und einer Schätzung oder Messung zum Anteil für Warmwasser.

Der **Mittelwert für den Wärmeleistungsbedarf** Warmwasser bei Neubauten und bei bestehenden Bauten

berechnet sich aus dem Wärmebedarf Warmwasser dividiert durch die jährliche Heizstundenzahl im Fall von reinem Winterbetrieb des Netzes oder dividiert durch 8'760 Jahresstunden bei einem Ganzjahresbetrieb.

Der **Spitzenwert** des **Wärmeleistungsbedarfs** Warmwasser ergibt sich aus der Anschlussleistung der Warmwasserbereiter. Da in der Schweiz für Brauchwarmwasser meistens Speicher eingesetzt werden, während Frischwasserstationen selten sind, genügt für Wohnbauten in der Regel, wenn der Jahreswärmebedarf Warmwasser durch 4'000 bis 6'000 jährliche Vollbetriebsstunden dividiert wird. Damit wird eine Spitzenlast des Wärmeleistungsbedarfs berücksichtigt, welche rund doppelt so gross ist wie der Mittelwert bei 8'760 Jahresstunden mit konstanter Leistung. Dies ist erforderlich, weil die Spitzenlast für den Warmwasserbedarf an gewissen Tagen erhöht sein kann, da der Warmwasserbedarf zum Beispiel vom Wochentag und von der Jahreszeit abhängen kann.

Der mittlere Wärmeleistungsbedarf für **Prozesswärme** berechnet sich aus der Division des bisherigen Wärmebedarfs durch die jährlichen Betriebsstunden des Prozesswärmeverbrauchers, die in der Regel mittels Betriebsstundenzähler bestimmt wird. Die Anbindung von Industriebetrieben für Prozessanwendungen an ein thermisches Netz sind jedoch zwingend individuell und vertieft zu prüfen. Eine erste wichtige Aufgabe besteht darin, den zeitlichen Verlauf und Bedarf der Temperatur- und Leistungsanforderungen zu kennen. Es geht darum ausgeprägte Temperatur- und Leistungsspitzen zu erkennen, um diese bei der Planung der Anbindung ans thermische Netz zu berücksichtigen. Weiter sind mit einem potenziellen Kunden für Prozesswärme zu klären, welche Optimierungsmassnahmen bereits umgesetzt oder geplant sind (zum Beispiel Prozessintegration mittels Pinch-Analyse). Im Idealfall sollten solche Massnahmen vor einem Anschluss an ein thermisches Netz umgesetzt werden (Effizienzsteigerung, geringere Temperatur- und Leistungsanforderungen).

### 2.1.3 Temperaturbedarf

Die **maximal** notwendige Vorlauftemperatur wird als Temperaturbedarf bezeichnet und ist abhängig von der Auslegung der Wärmeübertragung, der Art der Wärmeabgabesysteme und Warmwasserbereitung sowie von weiteren Faktoren. Die Auslegung von Heizkörpern oder einer Fussbodenheizung und anderen Wärmeübertragern basiert meist auf Herstellerangaben und ist bei Neubauten bekannt. Bei bestehenden Bauten ist eine Abschätzung des Temperaturbedarfs aufgrund der vorhandenen technischen Einrichtungen (Radiator- oder Fussbodenheizungen, Warmwasserbereiter usw.) möglich. Empfohlen wird jedoch die Durchführung von Temperaturmessungen bei den Kunden bei tiefen Aussentemperaturen und einer Hochrechnung der gemessenen Wertepaare (Vorlauf-/Rücklauftemperatur, Aussentemperatur) auf Auslegungswerte – einer sogenannten Heizkurve.

### 2.1.4 Vergleich Altbau und Neubau

Raumwärme und Brauchwarmwasser in Gebäuden machen einen wichtigen Teil der Wärmeabnahme für thermische Netze aus. Da der Wärmebedarf durch den Gebäudestandard beeinflusst wird, werden nachfolgend die Jahresdauerlinien für Wohngebäude mit zwei unterschiedlichen Baustandards dargestellt, nämlich für einen typischen Standard aus dem Jahr 1970 im Vergleich zu einem Neubau aus dem Jahr 2020, der etwa einem Gebäude nach Minergie-Standard oder nach den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN) von 2015 [38] entspricht. Basis für den Vergleich bilden die Werte nach Tabelle 2.1. Die Tabelle zeigt für Raumwärme und für Warmwasser sowie für das daraus resultierende Total jeweils den Wärmeleistungsbedarf in  $\text{W/m}^2$ , den Jahreswärmebedarf (welcher der Energiekennzahl entspricht) in  $\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  sowie die resultierende Anzahl Vollbetriebsstunden. Das Gebäude von 1970 weist für eine Auslegetemperatur für Zürich von  $-7^\circ\text{C}$  einen Wärmeleistungsbedarf von  $85 \text{ W/m}^2$  auf, während es für das Gebäude von 2020 noch  $25 \text{ W/m}^2$  sind.

Für die Darstellung der Jahresdauerlinien wird für den Standort Zürich auf Basis der Tagesmitteltemperaturen eine Auslegung nach [39] ausgeführt. Für ein Gebäude von 1970 ergeben sich damit Jahresdauerlinien nach Bild 2.1. Die obere Grafik zeigt den Absolutwert des Wärmeleistungsbedarfs in  $\text{W/m}^2$ . Für ein Beispiel eines Gebäudes mit  $1000 \text{ m}^2$  Energiebezugsfläche entspricht der Zahlenwert somit auch dem Wärmeleistungsbedarf in Kilowatt. In der unteren Grafik ist der Wärmeleistungsbedarf auf 100% normiert, um den Verlauf mit dem rechts dargestellten neuen Gebäude zu vergleichen. Das Bild 2.2 zeigt dazu das Verhalten für das Wohngebäude mit Standard von 2020.

Tabelle 2.1 Leistungs- und Energiekennzahlen von Wohngebäuden (Beispiel) mit Standard 1970 und 2020 für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) pro  $\text{m}^2$  EBF und Auslegung auf  $-7^\circ\text{C}$  (Zürich).

|                      |                        | Einheit                           | 1970 | 2020 |
|----------------------|------------------------|-----------------------------------|------|------|
| <b>Raumwärme</b>     | Wärmeleistungsbedarf   | $\text{W/m}^2$                    | 80   | 20   |
|                      | Jahreswärmebedarf      | $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ a}$ | 185  | 20   |
|                      | Vollbetriebsstunden RW | h/a                               | 2300 | 1000 |
| <b>Warmwasser</b>    | Wärmeleistungsbedarf   | $\text{W/m}^2$                    | 5    | 5    |
|                      | Jahreswärmebedarf      | $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ a}$ | 20   | 20   |
|                      | Vollbetriebsstunden WW | h/a                               | 4000 | 4000 |
| <b>Total (100 %)</b> | Wärmeleistungsbedarf   | $\text{W/m}^2$                    | 85   | 25   |
|                      | Jahreswärmebedarf      | $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ a}$ | 205  | 40   |
|                      | Vollbetriebsstunden    | h/a                               | 2400 | 1600 |

Der Vergleich der Grafiken zeigt, dass die Heizgrenze durch den verbesserten Gebäudestandard deutlich sinkt und die Heizperiode um rund 70 Tage verkürzt wird. Der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser sinkt dabei nach Tabelle 2.1 von 205 auf  $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  oder

20% des Ausgangswerts. Demgegenüber steigt der Anteil des Warmwassers an der Anschlussleistung von 6% im Altbau auf 20% im Neubau. Der Anteil des Energieverbrauchs für Warmwasser steigt sogar von knapp 10% auf 50%, was von anderen Untersuchungen bestätigt wird [40].

Dass ein Neubau einen deutlich höheren Grundlastanteil für Warmwasser aufweist als ein Altbau, ist für den Sommerbetrieb eines thermischen Netzes vorteilhaft. Da allerdings die Vollbetriebsstundenzahl für Raumwärme im Neubau auf weniger als die Hälfte des Altbaus sinkt, weist der Neubau für Raumwärme und Warmwasser

zusammen trotzdem mit jährlich 1'600 statt 2'400 Vollbetriebsstunden eine geringere mittlere Auslastung auf als der Altbau, was für ein thermisches Netz nachteilig ist.

Bei der Auslegung von thermischen Netzen ist somit zu beachten, dass die Gebäudestruktur einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmebedarf hat und dass dieser durch Gebäudesanierungen während der gesamten Betriebszeit eines thermischen Netzes ändern kann. Wenn der Wärmeabsatz sinkt, sinkt auch die Anschlussdichte, während die prozentualen Wärmeverteilungsverluste und die spezifischen Kapitalkosten pro kWh verteilte Wärme steigen.

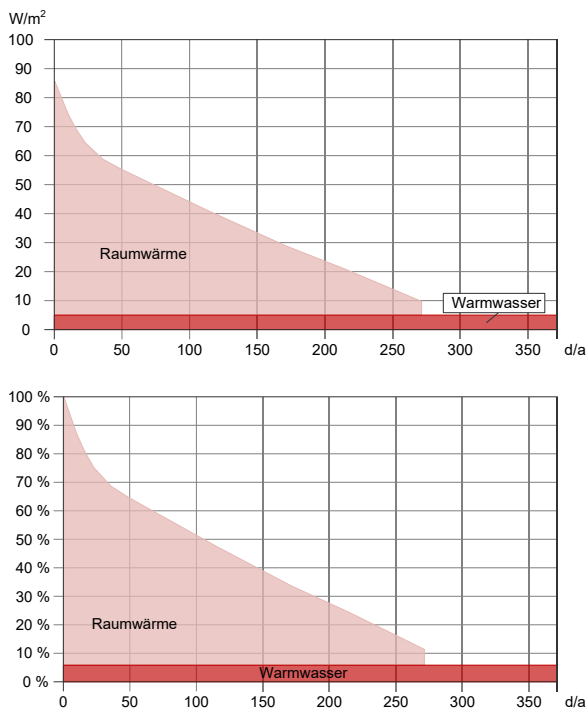


Bild 2.1 Jahresdauerlinie des spez. Wärmeleistungsbedarfs oben in  $[W/m^2]$  und unten in Prozent für ein Wohngebäude von 1970 für Warmwasser und Raumwärme (Auslegung nach [39] für Zürich, Tagesmitteltemperatur  $-7^\circ C$ ).

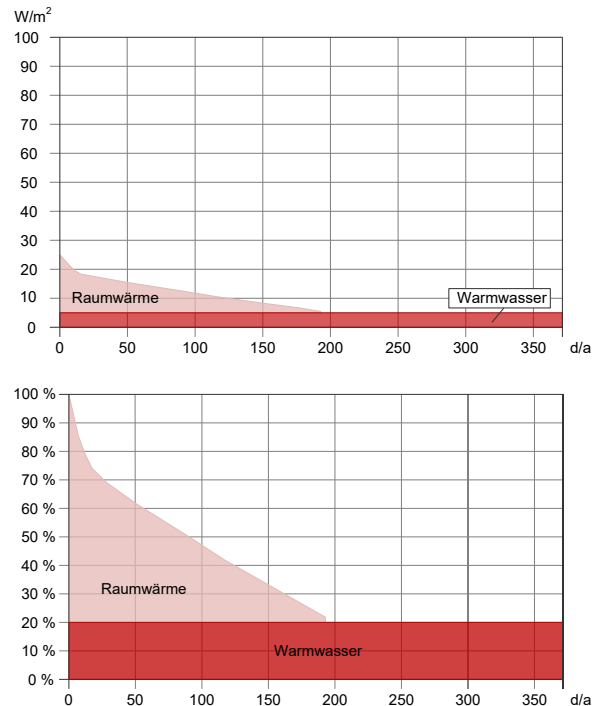


Bild 2.2 Jahresdauerlinie des spez. Wärmeleistungsbedarfs für ein Wohngebäude von 2020. Weitere Angaben wie zu Bild 2.1.

## 2.2 Wärmeleistungsbedarf des thermischen Netzes

Bei der Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs eines thermischen Netzes aus den Daten der einzelnen Kunden können bei der Auslegung folgende Herausforderungen auftreten:

1. Der Wärmeleistungsbedarf für das thermische Netz ergibt sich aus einer Mischung von berechneten Werten mit Sicherheitszuschlägen und Messwerten ohne Sicherheitszuschläge.
2. Der Norm-Wärmeleistungsbedarf für die Raumwärme nach SIA 384/2 basiert auf einer Norm-Umgebungstemperatur und berücksichtigt keine internen Wärmegewinne [34], während anhand von Messungen ermittelte Lastkennlinien auf realen Umgebungstemperaturen basieren und Wärmegewinne enthalten.
3. Zur Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs für Raumwärme aus dem Wärmebedarf bestehender Gebäude wird eine Vollbetriebsstundenzahl benötigt. Da diese von der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur am jeweiligen Standort, vom Gebäudestandard, der Nutzung, der oder den Raumtemperatur(en), der Heizgrenze und der Grösse des nicht witterungsabhängigen Anteils abhängig ist, ist deren Abschätzung unsicher.
4. Aufheizleistungen zum Ausgleich einer intermittierenden Beheizung (zum Beispiel Aufheizen von Büro- oder Gewerbegebäuden nach reduziertem Wochenendbetrieb) werden oft nicht berücksichtigt.
5. Messtechnisch bestimmte Lastkennlinien können für unterschiedliche Lastfälle durch Regression von Tagesmittelwerten bis zu 1-Stunden-Mittelwerten erstellt werden. Dabei muss aber beachtet werden, dass gemessene Spitzenlasten nicht allein vom Verbraucher abhängig sind, sondern auch durch einen allenfalls begrenzenden Wärmeerzeuger und die Systemträgheit beeinflusst werden können.
6. Wie im Kapitel 2.1.2 ausgeführt, ist eine korrekte Auslegung des Wärmeleistungsbedarfs Warmwasser vorzunehmen, da die Spitzenlast infolge zeitlich variablen Bedarfs deutlich höher sein kann als der Tages- oder Jahresmittelwert.

Um die Zahlen für das gesamte Netz aus einer Mischung von Annahmen, Berechnungen und realen Messwerten realitätsnah zu bestimmen, wird folgendes Vorgehen empfohlen:

- Verwendung geeigneter Vollbetriebsstundenzahlen zur Bestimmung und Plausibilisierung des Wärmeleistungsbedarfs für Raumwärme bei bestehenden Bauten.
- Berücksichtigung der Wärmegewinne bei Neubauten.
- Berücksichtigung des witterungsunabhängigen Anteils des Wärmeleistungsbedarfes für die Raumwärme. Insbesondere massgebend bei älteren Gebäuden zum Aufheizen der Gebäudemasse an der Heizgrenze und Abhängig von der Abnehmerstruktur des Versorgungsgebietes.

Da nicht alle Kunden gleichzeitig ihre maximale Spitzenleistung beanspruchen, liegt der effektive Wärmeleistungsbedarf des Netzes in der Regel unter der Summe der (abonnierten) Anschlussleistungen. Zur Berücksichtigung dieser Tatsache kann ein Gleichzeitigkeitsfaktor verwendet werden. Dieser quantifiziert die Wahrscheinlichkeit, dass nicht alle Verbraucher gleichzeitig ihre maximale Leistung benötigen.

**Hinweis:** Die Anwendung des Gleichzeitigkeitsfaktors wird in Kapitel 6.4.3 behandelt. Sie ist jedoch mit Vorsicht anzuwenden, da sie stark von der Verfügbarkeit geeigneter Datengrundlagen sowie von Erfahrung im Umgang mit Lastprofilen und Netzdynamik abhängt.

Für die optimale Systemwahl und die dimensionierungsgerechte Auslegung der Wärmeerzeugungsanlagen ist die **Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs** ein zentrales Planungsinstrument. Diese basiert auf folgenden Auslegungsgrundlagen:

1. der **Lastkennlinie des thermischen Netzes** (Bild 2.3) und
2. der **Jahresdauerlinie der Aussentemperatur** (Bild 2.4).

Die Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs als **Lastkennlinie des thermischen Netzes** (Bild 2.3), mit möglichst realen Aussentemperaturen, ist aus der Praxis mit Messungen bei Sanierungen und Erweiterungen von Haustechnikanlagen hervorgegangen. Sie benötigt empirisch gestützte Entscheidungen wie die Wahl der Heizgrenze. Der Vorteil ist, dass Daten von Berechnungen aus dem bisherigen Energieverbrauch und solchen aus Messungen übersichtlich in einer Grafik vereint werden können. Die Lastkennlinie der Gesamtanlage ergibt sich aus der Stapelung der Lastkennlinien für Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Wärmeverteilungsverluste. Aus ihr kann der bei einer Auslegungstemperatur notwendige Wärmeleistungsbedarf der Gesamtanlage herausgelesen werden. Das Bild ist für einen Bereich von 0% bis 100% dargestellt. Für einen konkreten Anwendungsfall kann die y-Achse alternativ auch mit effektiven Wärmeleistungen in [kW] oder [MW] dargestellt werden.

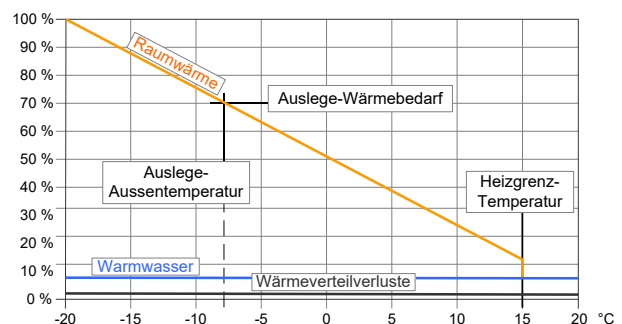


Bild 2.3

Gestapelte Lastkennlinie des Wärmeleistungsbedarfs der Gesamtanlage in Abhängigkeit der Aussentemperatur [39].  
 $100\% = (\text{Wärmeleistungsbedarf} / \text{maximaler Wärmeleistungsbedarf})$  z.B. in [MW/MW].

Die in Bild 2.4 dargestellte **Jahresdauerlinie der Aussentemperatur** zeigt die Summenhäufigkeit der Aussentemperatur als Anzahl Tage pro Jahr. Daraus kann zum Beispiel abgelesen werden, dass der 10-Jahres-Tagesmittelwert der Aussentemperatur in Luzern an 100 Tagen unter  $4^{\circ}\text{C}$  lag. Für die Aussentemperatur ist dabei immer der 24-Stunden-Mittelwert einzusetzen, hingegen kann der Wärmeleistungsbedarf ein Tagesmittelwert (z. B. für Wohnbauten) oder ein Spitzenwert (z. B. für ein Bankgebäude) sein.

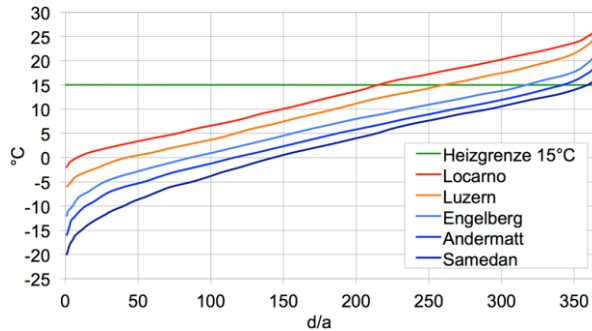


Bild 2.4 Aussentemperatur dargestellt als 10-Jahres-Tagesmittelwert von 2002 bis 2011 für Standorte in der Schweiz [39]. Grün zeigt eine Heizgrenze von  $15^{\circ}\text{C}$ .

Die Informationen aus der Lastkennlinie des thermischen Netzes (Bild 2.3) und der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur (Bild 2.4) werden schliesslich in der in Bild 2.5 gezeigten **Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs** für die Gesamtanlage zusammengeführt. Diese ergibt sich durch die Stapelung der Jahresdauerlinien für Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Wärmeverteilverluste. Die Fläche unter der Jahresdauerlinie entspricht dem Jahreswärmebedarf.

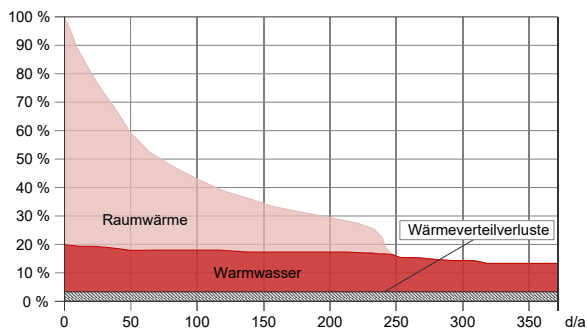


Bild 2.5 Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs für ein thermisches Netz in Prozent (max. Wärmeleistungsbedarf = 100 %).

Das Bild 2.5 zeigt ein Beispiel ohne Prozesswärme mit Jahresdauerlinien für Wärmeverteilverluste, Warmwasser und Raumwärme. Im Beispiel sind die Wärmeverluste des Netzes über das Jahr vereinfachend als konstant angenommen, da sich die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie die Temperatur des Erdreichs im Jahresverlauf nur geringfügig ändern.

Der Wärmebedarf für Warmwasser fällt ebenfalls ganzjährig an, wobei im gezeigten Beispiel ein leicht reduzierter Bedarf im Sommer dargestellt ist. Für Wohnhäu-

ser wird jedoch einfachheitshalber auch der Warmwasserbedarf meistens als über das Jahr konstant angenommen, während zum Beispiel für touristisch genutzte Gebäude saisonale Unterschiede berücksichtigt werden müssen.

Der Raumwärmebedarf weist den grössten Anteil am Wärmeleistungsbedarf und eine starke saisonale Abhängigkeit auf. Im Beispiel wird Raumwärme an knapp 250 Tagen im Jahr benötigt, was nach Bild 2.4 ungefähr der Heizgrenze von Luzern entspricht.

## 2.3 Auslegung Wärmeerzeuger

Für die Wärmebereitstellung können ein einziger oder mehrere Wärmeerzeuger eingesetzt, die Leistung auf einen oder mehrere Energieträger aufgeteilt und an einem oder mehreren Standorten erzeugt und eingespiessen werden.

Das grundlegende Ziel der zukünftigen Wärmebereitstellung ist diese grundlegend klimaneutral und erneuerbar zu gestalten. Die nachfolgenden Ausführungen gelten daher grundsätzlich für alle Technologien, welche die oben genannten Kriterien erfüllen. Die erwähnten Beispiele enthalten jedoch vielfach Energieholz als Energieträger. Energieholz muss aber nicht zwingend mit dabei sein, es gibt aktuelle wie auch zukünftige Beispiele thermischer Netze, welche auch ohne Energieholz auskommen.

### 2.3.1 Leistungsbereich

Wenn ein einziger Wärmeerzeuger ohne Wärmespeicher eingesetzt wird, muss dieser auf die maximal benötigte Wärmeleistung ausgelegt werden. Zur Versorgung von Gebäuden setzt dies voraus, dass der Wärmeerzeuger direkt oder mit Einbindung eines Wärmespeichers einen entsprechend grossen Lastbereich abdecken kann. Für die Warmwasserversorgung im Sommer beträgt die Minimalleistung für Altbauten lediglich rund 6% der maximalen Wärmeleistung, für Neubauten dagegen etwa 20%, wobei in beiden Fällen noch die Wärmeverteilungsverluste des Netzes dazukommen. Die Wärmeerzeugung muss damit meist im Sommer bei einer Leistung ab 10% bis 20% der maximalen Wärmeleistung betrieben werden können, was oft durch Einsatz von zwei oder mehr Wärmeerzeugern sichergestellt wird.

Im Fall von automatischen Holzheizungen kann mit einer Mehrkesselanlage ein konstanterer Betrieb mit geringeren Wärmeverlusten der Kessel erzielt werden. Je nach Brennstoff und Feuerungstyp kann zudem ein in Bezug auf Emissionen ungünstiger Betrieb bei geringer Leistung oder mit häufigen Ein- und Abschaltvorgängen vermieden werden.

Basis für die Auslegung der Wärmeerzeugung bildet die gestapelte Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs (Bild 2.5), die durch Berechnung, Messung oder Vergleich mit ähnlichen thermischen Netzen ermittelt wird.

### 2.3.2 Zwei Wärmeerzeuger

Das Bild 2.6 zeigt zwei Beispiele zum Einsatz von zwei Wärmeerzeugern mit Aufteilung der Leistung in Grundlast und Spitzenlast. Die Grundlast ist dabei durch eine hohe Vollbetriebsstundenzahl charakterisiert, während die Spitzenlast den über die Grundlast hinausgehenden Wärmeleistungsbedarf deckt und optional im Sommer in Betrieb genommen werden kann.

In Bild 2.6 wird als Beispiel 1 in der oberen Grafik eine Auslegung beschrieben, die bis vor einigen Jahren als kostengünstigste Variante für Wärmezentralen mit Holz infrage kam. Der Holzkessel wird dabei auf zum Beispiel 60% der Maximalleistung dimensioniert und durch einen

fossilen Spitzenlastkessel ergänzt, der gleichzeitig den Sommerbetrieb deckt. Eine Abschaltung des Holzkessels im Sommer kann vorteilhaft sein, um hohe Verluste zu vermeiden, den Betriebsaufwand zu verringern und Wartungsarbeiten auszuführen. Diese Betriebsweise kommt auch infrage, wenn als Grundlastwärmeerzeuger ein Holzheizkraftwerk mit Dampfkessel und Dampfturbine eingesetzt wird, das ungeeignet ist für Schwachlastbetrieb. Als Spitzenlastkessel kommt dann zum Beispiel ein Heisswasser-Holzkessel kleinerer Leistung infrage.

Die untere Grafik in Bild 2.6 beschreibt als Beispiel 2 Anwendungen mit einem Grundlast-Wärmeerzeuger, der auf lediglich 30% der Maximalleistung ausgelegt ist. Dies hat den Vorteil, dass der Grundlast-Wärmeerzeuger bereits ab einer Teillastfähigkeit von rund 50% (was 15% des maximalen Wärmeleistungsbedarfs entspricht) ganzjährig betrieben werden kann. Diese Bedingung erfüllen nicht nur automatische Holzheizungen, sondern auch Holzvergaser-Blockheizkraftwerke. Ein Holzgas-BHKW kann damit ganzjährig wärmegeführt betrieben werden und mehr als 6'000 Vollbetriebsstunden erreichen, was für einen wirtschaftlichen Betrieb meistens notwendig ist.

Wenn für die Spitzenlast in Beispiel 2 ein Gaskessel zur Verfügung steht (was bei Neuanlagen nicht mehr infrage kommt), kann dieser betrieben werden, sobald der Wärmebedarf 30% übersteigt. Dies entspricht der orangenen Fläche in Bild 2.6. Wenn für die Spitzenlast dagegen ein Holzkessel eingesetzt wird, muss dieser ab Inbetriebnahme am Winteranfang bei einer gewissen Mindestleistung betrieben und die Leistung des BHKW dazu reduziert werden. Dies entspricht der schraffierten Fläche in der Grafik.

Wenn für Grundlast und Spitzenlast in Beispiel 2 je ein Holzkessel eingesetzt werden, sind verschiedene Aufteilungen möglich. Üblich sind zum Beispiel rund zwei Drittel und ein Drittel oder 50% und 50%. Bei ungleicher Aufteilung besteht die Möglichkeit, den kleineren Kessel für Sommerbetrieb und Spitzenlast im Winter zu nutzen, während bei einer Aufteilung von je 50% zwei identische Kessel eingesetzt werden können.

### 2.3.3 Grundlast- und Spitzenlast

Sofern zur Wärmeversorgung Abwärme zur Verfügung steht, wird diese aus wirtschaftlichen Gründen vorab zur Deckung der Grundlast genutzt. Wie oben beschrieben betrifft dies auch Abwärme von WKK-Anlagen, die nach Möglichkeit wärmegeführt betrieben werden. Wenn keine Abwärme zur Verfügung steht, kommen für die Grundlast oft Techniken mit hohen Kapital- und geringen Betriebskosten zum Einsatz. Dies galt in den letzten Jahrzehnten insbesondere für automatische Holzfeuerungen, welche hohe Kapitalkosten aufweisen, aber in der Vergangenheit noch relativ niedrige Brennstoffkosten verursachten.

Da Energieholz künftig dringend zum Ersatz fossiler Energieträger für Prozesswärme benötigt wird, ist mit einer Verknappung und Verteuerung von Energieholz zu rechnen. Wo keine Abwärme zur Verfügung steht,

kommt deshalb vermehrt die Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen infrage, welche mit zusätzlich zu produzierendem, erneuerbarem Strom betrieben werden. Da die Effizienz von Wärmepumpen mit zunehmender Nutzttemperatur sinkt, ist ihr Einsatz für Netze mit tiefer Vorlauftemperatur vorteilhaft. Die Kombination von Wärmepumpen und Holzheizungen wird weiter unten vertieft.

Daneben weisen auch solarthermische Anlagen hohe Kapitalkosten und niedrige Betriebskosten auf. Eine ökonomische Einbindung von Solarwärme ist deshalb für Gebäudewärme auf die Erzeugung von Warmwasser beziehungsweise die Grundlast beschränkt und kann nur einen kleinen Teil des Jahreswärmebedarfs decken. Tabelle 2.2 fasst die Eigenschaften der Wärmeerzeuger für Grundlast- und Spitzenlast zusammen.

Tabelle 2.2 Eigenschaften für Grundlast- und Spitzenlast-Wärmeerzeuger.

| Grundlast                                                        | Spitzenlast                                            |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Betrieb bei Nennlast oder bei Teillast in begrenztem Lastbereich | Häufiger Betrieb im Teillastbereich                    |
| Hohe Auslastung bzw. grosse Vollbetriebsstundenzahl              | Geringe Auslastung bzw. kleine Vollbetriebsstundenzahl |
| Wenig und langsame Lastwechsel                                   | Häufige und rasche Lastwechsel                         |
| Wenig Anfahr- und Abfahrzyklen                                   | Häufige Anfahr- und Abfahrzyklen                       |

### 2.3.4 Drei Wärmeerzeuger

Das Bild 2.7 zeigt eine Aufteilung der Gesamtleistung auf zwei Grundlast- und einen Spitzenlast-Wärmeerzeuger. Da Holzgas-BHKW sowie mit nassen Brennstoffen betriebene Holzkessel nur bedingt für Schwachlastbetrieb mit weniger als 50% der Nennleistung geeignet sind, kann die Aufteilung auf zwei Grundlast-Wärmeerzeuger sinnvoll sein. Im Beispiel kann ein Holzgas-BHKW als Grundlast-Modul 1 eingesetzt und durch einen Holzkessel für die Grundlast 2 ergänzt werden. Für die Spitzenlast wurde früher meist ein fossiler Kessel eingesetzt. Bei Neuanlagen kommt ein Pelletkessel oder ein mit trockenem Energieholz betriebener Holzkessel infrage. Die Anforderungen an den Spitzenlastkessel sind eine rasche Regelbarkeit und niedrige Investitionskosten, während wegen der geringen Anzahl Vollbetriebsstunden höhere Brennstoffkosten in Kauf genommen werden können.

### 2.3.5 Holzkessel-Kaskaden

Heizzentralen mit drei und mehr Holzkesseln ähnlicher Leistung werden auch als Holzkessel-Kaskaden bezeichnet. Dazu kommen unter anderem Seriengeräte für Holzpellets oder trockene Holzschnitzel mit 70 kW bis 500 kW Nennwärmeleistung zum Einsatz [41]. Ein Vorteil solcher Anlagen ist die geringere Bauhöhe im Vergleich zu einem industriellen Kessel grösserer Leistung. Dies kann beim Ersatz bestehender Heizzentralen entscheidend sein oder auch im Neubau Kostenvorteile ermöglichen. Daneben bietet die Planung einer Kaskade

die Möglichkeit eines gestaffelten Leistungsaufbaus. Mit einer Kaskade mit drei Kesseln mit einem Teillastbetrieb ab 50% kann ein Wärmeleistungsbedarf von unter 20% bis 100% abgedeckt werden. Wie in [41] gezeigt, kann damit und unter Einbindung eines Wärmespeichers nach Empfehlung von QM Holzheizwerke (eine (1) Stunde Kapazität bezogen auf zwei Drittel der Gesamtleistung) eine Wärmeerzeugung ohne fossilen Spitzenlastkessel realisiert und die Schwachlastbedingung für den Betrieb der Holzkessel nach [42] eingehalten werden. Die Deckung des Wärmebedarfs durch eine Kaskade erfolgt ähnlich wie in Bild 2.7 dargestellt, wobei die Anzahl Module auch grösser als drei sein kann und der Betrieb der Kessel so erfolgen kann, dass alle Kessel ähnliche jährliche Vollbetriebsstunden erzielen.

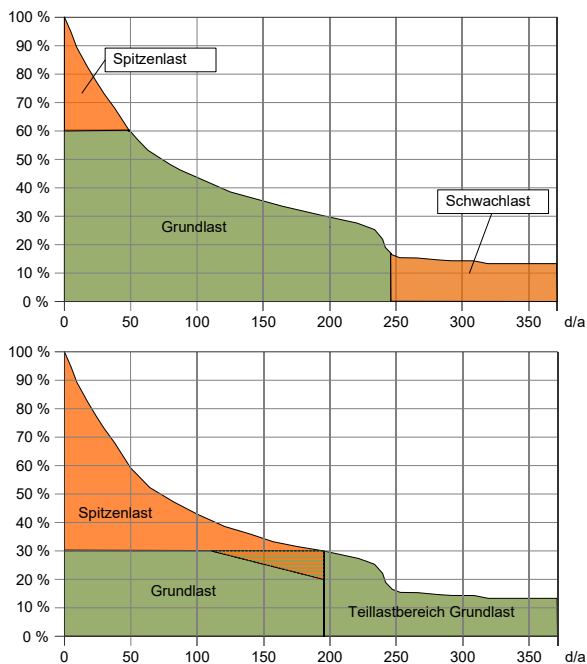
### 2.3.6 Grosse Wärmespeicher

Als weitere Massnahme kommt auch die Einbindung von gross dimensionierten Wärmespeichern zur Anwendung. Dies ermöglicht eine Glättung des Wärmeleistungsbedarfs und damit eine Erhöhung des Grundlastanteils.

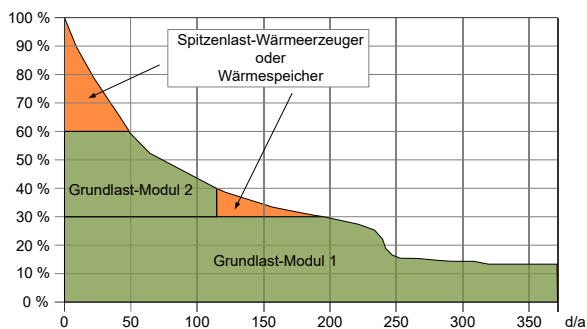
Für Holzkessel besteht die für ein Beispiel in [43] beschriebene Möglichkeit, durch Vergrösserung der Speicherkapazität auf 2 bis 4 Stunden bezogen auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf, die Kesselleistung auf rund 75% zu reduzieren. Damit kann die Versorgungssicherheit über eine 4- bis 8-tägige Kälteperiode bei Auslegetemperatur, was bisher alle 10 bzw. alle 40 Jahre eintrat, gewährleistet werden. Das Anlagenkonzept mit grösserem Speicher und kleinerem Holzkessel ermöglicht einen konstanteren Betrieb des Kessels und gleichzeitig Kosteneinsparungen von rund 2.5%. Für dieses Beispiel eines grossen Wärmespeichers kann die in Bild 2.7 dargestellte Bedarfsspitze statt durch einen Spitzenlastkessel durch den Wärmespeicher gedeckt werden, wobei der Anteil von den in der Grafik gezeigten 40% auf 25% reduziert werden muss.

Für WKK-Anlagen ermöglicht ein grösserer Wärmespeicher eine teilweise Entkopplung zwischen Energieproduktion und Wärmeversorgung. Dies ergibt die Möglichkeit für einen teilweise stromgeführten Betrieb der Anlage zur Anpassung des Betriebs an dynamische Einspeisetarife zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

Die Wärmespeicherkapazität kann daneben zum Beispiel auch zur Nutzung von kurzfristigen Stromüberschüssen aus PV-Anlagen und zur Einbindung von Wärme aus solarthermischen Anlagen genutzt werden.



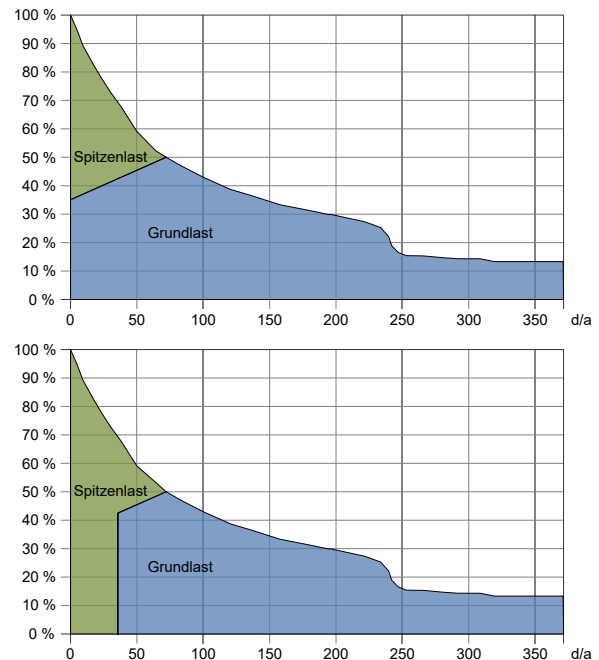
**Bild 2.6** Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs in Prozent mit Aufteilung in einen Grundlast- und einen Spitzenlast-Wärmeerzeuger.  
Oben: Beispiel 1 – Grundlast-Wärmeerzeuger mit 60 % Leistung ohne Sommerbetrieb.  
Unten: Beispiel 2 – Grundlast-Wärmeerzeuger mit 30 % Leistung mit Sommerbetrieb.  
Orange: früher fossil, heute z. B. Holzpellets oder Holzkessel. Grün: Holzkessel (oben) oder Holz-WKK (unten).



**Bild 2.7** Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs mit zwei Grundlast-Wärmeerzeugern mit je 30 % Leistung und einem Spitzenlast-Wärmeerzeuger mit 40 % Leistung. Die Spitzenlast kann alternativ auch durch einen grossen Wärmespeicher gedeckt werden, wobei der Anteil des Wärmespeichers für das im Text beschriebene Beispiel von 40 % auf 25 % reduziert werden muss.  
Grün: Holzkessel oder Holz-WKK.  
Orange: Spitzenlast oder Wärmespeicher.

### 2.3.7 Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen und Holzkessel

Das Bild 2.8 zeigt zwei mögliche Betriebsarten zur Deckung des Wärmebedarfs eines thermischen Netzes durch Kombination von Wärmepumpen und Holzkessel.



**Bild 2.8** Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs mit einer Wärmepumpe als Grundlast- und einem Holzessel als Spitzenlast-Wärmeerzeuger.  
Oben: Bivalent-paralleler Betrieb. Das Beispiel gilt für eine Wärmepumpe, welche den Wärmeleistungsbedarf ab 3°C Umgebungstemperatur (im Beispiel entsprechend 50% Wärmeleistungsbedarf) zu 100% deckt. In der Grafik nimmt die Leistung unter 3°C ab, was insbesondere für eine Luft-Wärmepumpe zutrifft.  
Unten: Bivalent-alternativer Betrieb mit Betrieb der Wärmepumpe bis -3°C.  
Grün: Holzkessel oder Holzpellets  
Blau: Wärmepumpe.

Das obere Bild zeigt einen bivalent-parallelen Betrieb, wobei die Wärmepumpe maximal 50% der Wärmeleistung erbringt. Diese Betriebsart bietet sich an, wenn ganzjährig ausreichend erneuerbare Elektrizität zum Betrieb der Wärmepumpe zur Verfügung steht. Im Falle einer mit Luft betriebenen Wärmepumpe sinkt die Leistung der Wärmepumpe mit sinkender Umgebungstemperatur ab und die Spitzenlast im Winter wird mit einem Holzessel erzeugt, der maximal 65% der Gesamtleistung deckt. Diese Betriebsart führt zu einem minimalen Verbrauch an Energieholz.

Das untere Bild zeigt den bivalent-alternativen Betrieb. Dabei wird die Wärmepumpe bei Unterschreitung einer gewissen Umgebungs- oder Quellentemperatur ausgeschaltet. Der Holzessel muss ab diesem Punkt die gesamte Leistung erbringen und somit auf 100% der

Wärmeleistung ausgelegt werden. Diese Betriebsart verursacht einen erhöhten Verbrauch an Energieholz und kommt dann infrage, wenn die Einsparung an Winterstrom erhöhte Priorität hat.

Wie in Kapitel 1.2 ausgeführt, ist Energieholz der Hauptenergieträger von über 670 oder rund 65% der thermischen Netze in der Schweiz, während 108 oder 10% der Netze Wärmepumpen als wichtigsten Wärmeerzeuger nutzen. Die installierte Leistung von 4'157 MW verteilt sich dabei zu 29% auf Energieholz und zu 8% auf Wärmepumpen, die mittlere installierte Leistung der Anlagen beträgt damit 1.8 MW für Energieholz und 3.1 MW für Wärmepumpen, die zur Hälfte Seewasser und zu je einem Viertel Erdwärme und Grundwasser als Quelle nutzen.

Für die künftige Energieversorgung und die Entwicklung thermischer Netze wird nach [44] von folgenden Entwicklungen ausgegangen:

- Die Wärmeerzeugung verursacht in der Schweiz rund die Hälfte des Endenergieverbrauchs von 206 TWh/a, nämlich rund 75 TWh/a oder 36% für Gebäudewärme und 27 TWh/a oder 13% für Prozesswärme.
- Energieholz liefert heute rund 15 TWh/a Endenergie (was rund 7% des Verbrauchs ausmacht) und die Nutzung kann bei einem Potenzial von voraussichtlich um die 20 TWh/a noch um rund einen Viertel erhöht werden.
- Für den Gebäudepark wird dank Effizienzverbesserung trotz Flächenzunahme ungefähr eine Halbierung des Wärmeverbrauchs auf 39 TWh/a im Jahr 2050 prognostiziert. Für Prozesswärme ist das Effizienzpotenzial geringer, weshalb eine Reduktion von 27 TWh/a auf 20 TWh/a erwartet wird.

Die 20 TWh/a an Energieholz könnten somit im Jahr 2050 rund 50% des Wärmebedarfs für Gebäude decken. Allerdings würde dann kein Holz für heute fossil erzeugte Prozesswärme zur Verfügung stehen, die künftig durch Elektrizität oder erneuerbare Brennstoffe bereitgestellt werden muss. Um künftig 50% der Prozesswärme mit Energieholz decken zu können, werden 10 TWh/a oder die Hälfte des Energieholzes benötigt. Die restlichen 10 TWh/a – und somit etwas weniger als heute – können dann rund 25% der künftigen Gebäudewärme liefern.

Da ein Ersatz fossiler Brennstoffe zur Erzeugung von Prozesswärme bei hohen Temperaturen aufwendig ist und Energieholz dazu in vielen Fällen infrage kommt, ist von einer Zunahme des Bedarfs an Energieholz durch die Industrie zu rechnen. Zur Wärmeversorgung von Gebäuden und thermischen Netzen hat dagegen der Einsatz von Wärmepumpen mit einem gleichzeitigen Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion künftig höchste Priorität. Dazu erfolgt unter anderem ein Ausbau von Fotovoltaikanlagen an Gebäuden, in erster Linie weiterhin auf Dächern und vereinzelt an Fassaden. Am Beispiel von Zürich, beträgt der Ertrag auf Dächern aber in den Wintermonaten nur etwa 14% (bei Ost/West-Ausrichtung) bis 28% (bei 60° Südausrichtung) des Sommerertrags. Ein allfälliger Ausgleich der saisonalen Ver-

schiebung zwischen Stromproduktion und Strombedarf würde einen sehr grossen Bedarf zur saisonalen Energiespeicherung benötigen. Diese würde nicht nur hohe Kosten, sondern auch zusätzliche Energieverluste verursachen, welche einen Teil der Solarstromproduktion nutzlos verbrauchen würde.

Als Ergänzung oder Alternative zu einer klassischen Energiespeicherung bietet sich eine saisonale Aufteilung der Wärmeerzeugung durch eine Kombination von Wärmepumpen und Holzheizungen an, wobei die Wärmepumpen bei Vorhandensein von erneuerbarem Strom betrieben werden und Energieholz ausschliesslich zur Spitzenlastdeckung genutzt wird. Um eine 100% erneuerbare Wärmeversorgung der Gebäude zu ermöglichen, müssen im Mittel rund 75% des Jahreswärmebedarfs mit Wärmepumpen und nur 25% mit Energieholz (entsprechend 10 TWh/a oder der Hälfte des Energieholzes) gedeckt werden. In diesem Konzept übernimmt Energieholz die Rolle der saisonalen Energiespeicherung. In [44] ist eine mögliche Umsetzung bis im Jahr 2050 mit folgenden Annahmen beschrieben:

- Künftiger Wärmeverbrauch der Gebäude: 39 TWh/a. Dies entspricht einem Gebäudepark für 10 Mio. Einwohner mit 45 m<sup>2</sup> Wohnfläche und 20 m<sup>2</sup> Infrastrukturfläche pro Person und einem spezifischen Wärmebedarf von 60 kWh/(m<sup>2</sup> a). Für den Wärmebedarf wird eine jahreszeitliche Aufteilung nach Bild 2.9 angenommen.
- Für den Betrieb der Wärmepumpen werden 12 m<sup>2</sup> Fotovoltaik pro Person auf Dächern installiert. Dies entspricht der Hälfte der heute für PV verfügbaren Dachflächen in der Schweiz (also ohne Berücksichtigung der Zunahme der Dachflächen bis 2050).
- Die Hälfte der PV-Anlagen sind steil Richtung Süden ausgerichtet (hoher Winterertrag), die Hälfte sind nach Osten und Westen ausgerichtet (geringer Winterertrag, aber günstigerer Tagesgang). Die Auslegung erfolgt für den Standort Zürich, für den in Bild 2.10 der PV-Ertrag für verschiedene Ausrichtungen dargestellt ist.
- Die Vorlauftemperatur des Netzes beträgt zwischen 65°C im Sommer und 80°C im Winter, die Rücklauftemperatur beträgt im Mittel 40°C.
- Die Wärmepumpen nutzen Umgebungsluft als Quelle und haben bis 2050 einen Gütegrad von 0.6. Im Winterbetrieb dienen die Wärmepumpen zur Vorwärmung auf 50°C, die Holzkessel zur Nacherwärmung auf 80°C. Wie Bild 2.11 zeigt, resultiert damit ein Coefficient of Performance (COP) zwischen 3.6 und 4.5.
- Bei alleinigem Betrieb der Wärmepumpen im Sommer und in der Übergangszeit wird ein zusätzlicher Speicherbedarf für Verschiebungen zwischen Wärmeproduktion und Wärmebedarf vernachlässigt und davon ausgegangen, dass die im Netz installierte Speicherkapazität für die Holzkessel zusammen mit der Wärmekapazität der Gebäude ausreicht.

Das Bild 2.12 zeigt die mit diesen Annahmen resultierende Wärmeproduktion während eines Kalenderjahres, wenn für den Antrieb der Wärmepumpen 12 m<sup>2</sup> Fotovol-

taik pro Person installiert werden und der ungedeckte Wärmebedarf mit Holzheizungen gedeckt wird. Dies entspricht einem bivalent-alternativen Betrieb nach Bild 2.8 oben. Die Auswertung zeigt, dass die Wärmepumpen 74% des Jahreswärmeebedarfs decken und die Holzheizungen während einer 10-wöchigen Winterperiode zur Deckung der fehlenden 26% betrieben werden. In den verbleibenden 42 Wochen liefern die PV-Anlagen einen Überschuss an Solarstrom von 14.3 TWh/a.

Wie erwähnt, ist im Szenario ein allfälliger Zusatzbedarf an Wärmespeicherung im Sommer und der Übergangszeit nicht berücksichtigt. Demgegenüber ist die direkte Kopplung des Wärmepumpenbetriebs an PV-Strom von lokalen Gebäuden der ungünstigste Fall. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Nutzung von erneuerbarem Strom von anderen Standorten und anderen Produktionsarten über das Stromnetz mit teils günstigerer saisonaler Produktion (zum Beispiel Windstrom und alpine PV-Anlagen). Daneben kommen nebst Umgebungsluft oft auch besser geeignete Quellen für die Wärmepumpen infrage.

Eine mögliche Umsetzung des Konzepts bietet daneben folgende Vorteile:

- Das Konzept ist sowohl für einzelne Wärmeverbraucher als auch für thermische Netze geeignet.
- Für Anwendungen in thermischen Netzen bestehen folgende zusätzlichen Möglichkeiten:
  1. Gemeinsamer Standort von Wärmepumpe und Holzkessel in einer Wärmezentrale.
  2. Verschiedene Standorte von ins Netz eingebundenen Wärmepumpen und Holzkesseln mit allenfalls zusätzlichen Möglichkeiten für Wärmequellen.
- Ein mit Holzwärme versorgtes Netz kann durch zentrale und oder dezentrale Wärmepumpen ergänzt werden. Dies ermöglicht die Umsetzung bei bestehenden Netzen bei einer Verknappung und Verteuerung von Energieholz mit der Möglichkeit, das Netz weiter zu betreiben und den Energieholzverbrauch um rund drei Viertel zu reduzieren.
- Wärmepumpen bieten die Möglichkeit der Nutzung von Eigenstrom zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

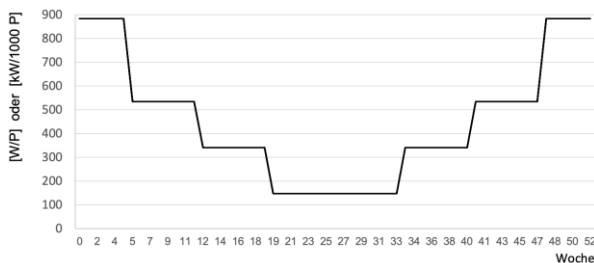


Bild 2.9 Wärmeleistungsbedarf in Watt pro Person oder in kW pro 1000 Personen während 52 Kalenderwochen.

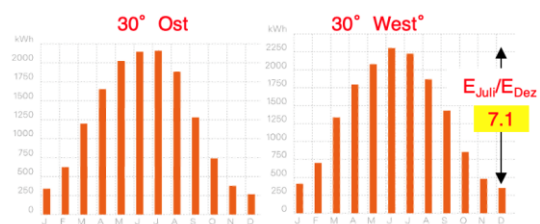
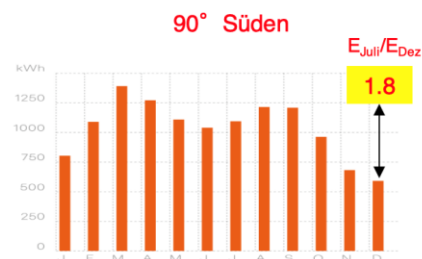
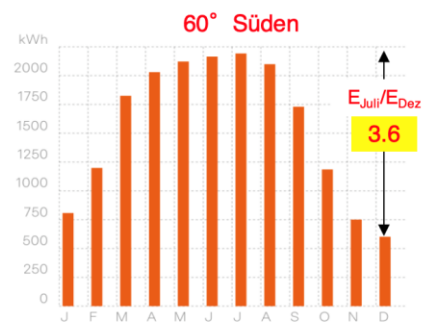
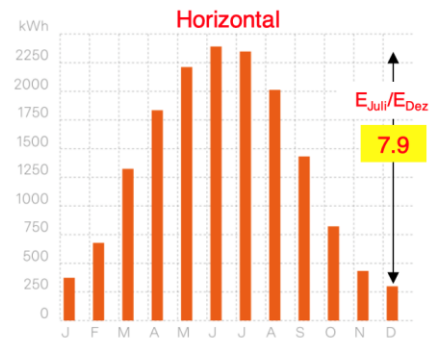


Bild 2.10 Monatlicher PV-Ertrag für unterschiedliche Neigungen und Ausrichtungen am Standort Zürich, Tannenstrasse 7. Gelb hinterlegte Zahl: Verhältnis zwischen ertragreichstem und ertragsärmsten Monat (Juli und Dezember).

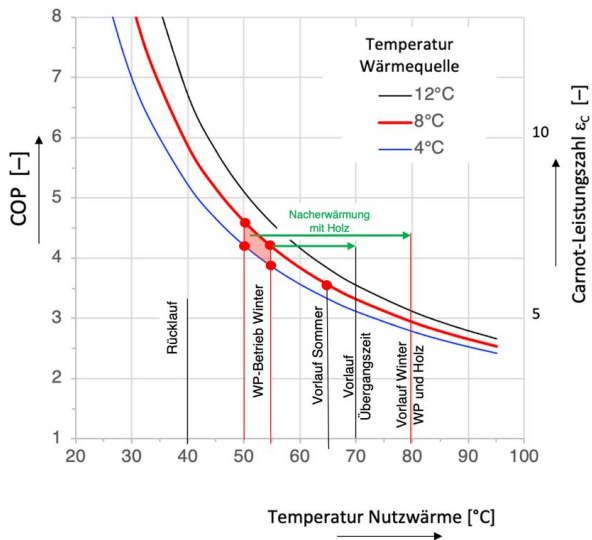


Bild 2.11 Carnot-Leistungszahl (rechte y-Achse) und COP bei einem Gütegrad von 0.6 (linke y-Achse) von Wärmepumpen für Quellentemperaturen von 4, 8 und 12 °C.

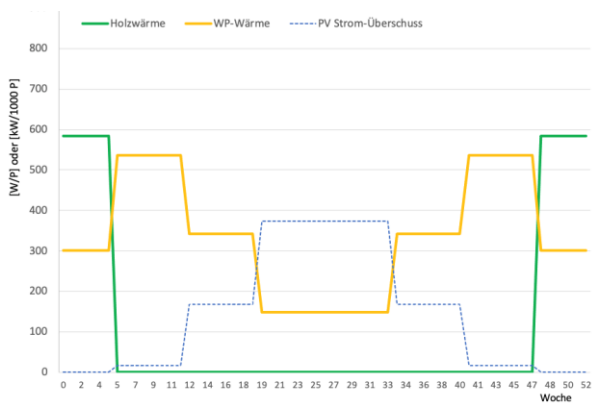


Bild 2.12 Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe aus Solarstrom von einer 12 m<sup>2</sup> Fläche pro Person ergänzt durch Holzwärme zur Deckung des Winterbedarfs während 10 Wochen. Dabei resultieren 26 % Deckung mit Holz und 74 % solare Deckung sowie ein PV-Überschuss von 14 TWh/a bei einer gesamten PV-Produktion von 23 TWh/a (was 68 % der in den Energieperspektiven 2050+ vorausgesetzten PV-Produktion entspricht).

## 2.3.8 Fossilfreie Wärmeerzeugung

Bis vor einigen Jahren verfügten grössere Heizzentralen in der Regel über einen fossilen Heizkessel zur Deckung der Spitzenlast, der meist zu einem fossilen Anteil der Wärmeerzeugung von 5% bis 15% und in einigen Fällen zu noch höheren Anteilen führt.

Für eine fossilfreie Wärmeerzeugung bieten sich als Zusammenfassung der vorgehenden Ausführungen künftig folgende Ansätze an, die auch kombiniert umgesetzt werden können:

### Ansatz 1: Spitzenlast mit Holzpellets oder trockenem Energieholz

Anstelle eines fossilen Spitzenlastkessels kommt ein Pelletkessel oder ein mit trockenem Holz betriebener Kessel zum Einsatz, der rasch regulierbar und auf wenig Vollbetriebsstunden ausgelegt ist und geringere Investitionskosten als ein Grundlastkessel aufweist. Dieses Konzept bietet sich zum Beispiel als Ergänzung zu Grundlast-Wärme aus BHKW oder Abwärme an. Sofern die Grundlast mit Wärmepumpen abgedeckt wird, entspricht das Konzept auch dem unter Konzept 4 (Kapitel 2.3.7) separat beschriebenen Ansatz.

### Ansatz 2: Holzessel-Kaskaden

Die Gesamtleistung wird auf drei oder mehr Kessel ähnlicher Leistung aufgeteilt, welche mit demselben Brennstoff betrieben werden. Dies ist ein Spezialfall von Ansatz 1 (Kapitel 2.3.4) und ermöglicht eine Anpassung der Wärmeerzeugung von unter 20% bis zu 100% der Gesamtleistung mit Kesseln, die ab 50% Nennleistung betrieben werden können, was in der Regel für Seriengeräte für Holzpellets oder trockene Holzschnitzel mit 70 kW bis 500 kW Leistung zutrifft [41]. Eine solche Konfiguration wird auch als Holzessel-Kaskade bezeichnet. Der Einsatz von Seriengeräten kommt als Alternative zu einem aufwendigeren sogenannten industriellen Kessel grösserer Leistung infrage. Nebst dem breiten Leistungsbereich und Einhaltung der Schwachlastbedingungen nach [42] ermöglicht eine Holzessel-Kaskade einen gestaffelten Ausbau der Leistung sowie eine niedrige Bauhöhe, was zum Beispiel beim Ersatz einer fossilen Heizung vorteilhaft sein kann.

### Ansatz 3: Holzessel mit breitem Leistungsbereich

Industrielle Holzheizkessel ab rund 300 kW Leistung können in der Regel in einem Leistungsbereich von 30% bis 100% Nennleistung betrieben werden. Um eine ganzjährige Wärmeversorgung mit einem Holzessel zu ermöglichen, stehen daneben seit einigen Jahren auch Holzessel mit zusätzlichen Regelmöglichkeiten zur Verfügung, welche einen Tieflastbetrieb bis zu 15 % der Nennleistung ermöglichen [45]. Diese

verfügen über eine massive Feuerraumauskleidung und ein grosses Brennkammervolumen und sie werden zusätzlich mit einem Luftvorwärmer (Luvo) und einem temperatur-geregelten Kessel-Bypass ausgerüstet. Am Beispiel einer 900 kW-Anlage wurde gezeigt, dass damit ein Praxisbetrieb im Leistungsbe- reich ab 15% erzielt werden kann. Da damit häufige Anfahrvorgänge vermieden werden und die Abgasrei- nigung mittels Elektroabscheider unterbruchfrei in Betrieb steht, werden die Anforderungen der Luftrein- halte-Verordnung auch mit einem einzigen Holzessel dieser Bauart sicher eingehalten.

### Ansatz 4: Grosse Wärmespeicher

Für Wärmezentralen mit Holzesseln empfiehlt QM Holzheizwerke einen Wärmespeicher mit einer Kapazi- tät von  $\geq 1$  Stunde bezogen auf die Nennleistung des Holzessels. Bei zwei und mehr Kesseln kann die Speicherkapazität auf  $\geq 1$  Stunde bezogen auf 2/3 der Gesamtleistung der Holzessel dimensioniert werden [46]. Die unter Ansatz 2 und 3 beschriebenen Angaben gelten für diese Mindestgrösse von Wärmespeichern, die unter anderem zur Sicherstellung eines einwand- freien Betriebs der Holzessel dient. Damit sollen häufige Kesselstarts und kurze Betriebsphasen der Kessel vermieden und bei einer schnellen Reduktion des Wärmebedarfs die Kessel kontrolliert herunterge- fahren werden können.

Durch Einsatz deutlich grösserer thermischer Energie- speicher besteht zusätzlich die Möglichkeit einer teil- weisen Entkopplung des Betriebs der Wärmeerzeuger vom momentanen Wärmebedarf, was zum Beispiel wie folgt genutzt werden kann:

#### Beispiel 1: Monovalenter Holzessel

Wenn die Wärme zur Versorgung von Gebäuden dient und die Auslegung auf die kälteste Periode erfolgt, kann die Leistung des Holzessels reduziert werden, wenn ein Wärmespeicher zur Verfügung steht, der während der kältesten Periode entleert werden kann. Das Beispiel von drei Fernwärmenetzen in Schaffhau- sen zeigt, dass dort alle 10 Jahre eine 4-tägige und alle 40 Jahre eine 8-tägige Periode mit der Auslege- temperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  auftritt [47]. Wenn für dieses Netz eine Speicherkapazität von 2 bis 4 Stunden be- zogen auf die Anschlussleistung zur Verfügung steht, kann die Versorgung mit einer auf 75% reduzierten Kesselleistung während der Kälteperiode von 4 bis 8 Tagen sichergestellt werden. Durch die reduzierte Kesselleistung und die vergrösserte Speicherkapazität können ein konstanterer Betrieb des Holzessels er- zielt und die Gesamtkosten im Vergleich zu einer An- lage mit 100% Kesselleistung und 1 Stunde Speiche- rkapazität um rund 2.5% reduziert werden.

#### Beispiel 2: Betrieb von WKK-Anlagen

Im Falle einer WKK-Anlage ermöglicht ein Wärme- speicher eine zeitliche Flexibilisierung von Wärme- produktion und Wärmeverkauf. Damit kann die Anlage insbesondere in Phasen hoher Einspeisetarife für

Elektrizität mit hoher Leistung betrieben und der Wärmespeicher geladen werden und die Wärme zeitlich verzögert während Phasen niedriger Einspeisetarife genutzt werden. Entsprechend verfügen zahlreiche grosse thermische Netze über Wärmespeicher mit einer Kapazität von bis zu 10 Stunden (Beispiele [47], [48], [49]).

### Beispiel 3: Speicherung von Stromüberschüssen

Dezentrale PV-Anlagen verursachen eine stark fluktuierende Stromproduktion. Da gebäudeintegrierte Anlagen im Schweizer Mittelland lediglich rund 1000 Vollbetriebsstunden erzielen, weisen sie überproportional hohe Anschlussleistungen auf. Ohne Gegenmassnahmen würde ein weiterer Zubau der PV-Kapazitäten einen unverhältnismässig teuren Ausbau der Netzkapazität erfordern. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Einspeisung von PV-Strom künftig zum Beispiel auf 70% der installierten Leistung begrenzt und/oder während Phasen mit Überproduktion nicht mehr vergütet oder sogar verrechnet wird. Um dies zu verhindern, bieten Wärmespeicher eine kostengünstige Möglichkeit, die Netzeinspeisung durch Nutzung des Stroms zur Speicherbeheizung zu limitieren und so den weiteren Ausbau von PV-Anlagen zu unterstützen. Entsprechende Anwendungen können für eine eigene PV-Anlage umgesetzt und auch zum Beispiel mit einem Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) erweitert werden oder in industriellen Anlagen (Prozesse, Wärmeeinheiten etc.) genutzt werden.

### Ansatz 5: Kombination von Wärmepumpen und Holzkessel

Da das Energieholzpotenzial begrenzt ist und Energieholz in Zukunft auch für Prozesswärme eingesetzte fossile Energieträger ersetzen muss, sollte Energieholz künftig in Anwendungen zur Wärmeversorgung von Gebäuden soweit möglich ersetzt oder eingespart werden. Gebäudewärme sollte dagegen durch effizienten Einsatz von Wärmepumpen bereitgestellt werden und dazu die erneuerbare Stromproduktion entsprechend erhöht werden. Durch Kombination von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Gebäuden kann das Energieholz für die Spitzenlast im Winter reserviert werden. Damit kann insbesondere die für Solarstrom charakteristische Minderproduktion an Winterstrom kompensiert werden. Als Spitzenlast eingesetztes Energieholz kann dabei die Funktion der saisonalen Energiespeicherung übernehmen und den Ausbau der Fotovoltaik unterstützen. Folgendes Szenario zeigt ein Konzept, das sowohl in thermischen Netzen als auch für einzelne Verbraucher umgesetzt werden kann und für eine Auslegung für den Standort Zürich gilt [44]:

1. Holz reicht für 50% der Gebäudewärme im Jahr 2050. Es kann somit 25% decken, wenn die Hälfte des Holzes für Prozesswärme reserviert wird.
2. Holz mit Wärmepumpen wird als Winter-Spitzenlast zum Saisonspeicher.

3. Mit 12 m<sup>2</sup> Fotovoltaik pro Person auf Dächern oder der Hälfte der für PV-Anlagen verfügbaren Dachfläche können 74% der Gebäudewärme mit Wärmepumpen erzeugt und mit 26% Holz für 10 Spitzenwochen alle Gebäude versorgt werden. Zusätzlich werden jährlich 14.3 TWh Überschuss an Solarstrom erzeugt.
4. Zur Umsetzung des Konzepts sind Heizzentralen mit zwei Wärmeerzeugern erforderlich und/oder thermische Netze mit Einbindung beider Wärmeerzeuger.
5. Daneben existieren verschiedene Potenziale zur Effizienzerhöhung, darunter alpine PV-Anlagen und Windkraft, die im Vergleich zu PV-Anlagen auf Dächern mehr Winterstrom erzeugen und die Umsetzung damit vereinfachen.

Die fünf oben beschriebenen Ansätze beinhalten praktisch ausschliesslich eine Biomassefeuerung, vielfach in Kombinationen mit einer anderen erneuerbaren Energiequelle. Eine Studie zu fossilfreien thermischen Netzen, bei der explizit Biomasse als Energieträger aufgrund der limitierten Verfügbarkeit ausgeschlossen wurde, kommt zu folgenden Kernbotschaften (vgl. [50]):

- Bei der Projektierung von neuen thermischen Netzen wird in den meisten Fällen eine vollständig fossilfreie Variante ohne Biomasse nicht geprüft. Dies ist nicht mehr zeitgemäss und sollte dringend geändert werden. In der Pflicht sind vor allem die Auftraggeber von Studien und Projekten zur Wärmeversorgung.
- Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biogas und Holz sowie der hohen Kosten synthetischer Brennstoffe ist eine vollständige Wärmeerzeugung – inklusive der Abdeckung von Spitzenlasten – mit Wärmepumpen heute in den meisten Fällen die beste Option für thermische Netze.
- Fossilfreie thermische Netze ohne Biomasse existieren bereits heute und sind wirtschaftlich umsetzbar. Die benötigte Technologie (Wärmepumpen) ist etabliert und es ist mehr als ausreichend Potential bei den erneuerbaren Wärmequellen vorhanden, um den Wärmebedarf zu decken. Durch den Einsatz von Speichern sowie betrieblichen Massnahmen kann zudem die Spitzenlast gesenkt werden.
- Die Nutzung von synthetischen Brennstoffen würde sowohl heute als auch im Jahr 2050 zu höheren Kosten für die Wärmeerzeugung der Spitzenlast führen.

Empfehlungen im Werkzeugkoffer Räumliche Energieplanung [9] gehen in die gleiche Richtung. Bei der Planung einer fossilfreien Wärme- und/oder Kälteerzeugung sollen deshalb, kantonale Energiegesetze, kommunale Richtpläne oder Energiestrategien berücksichtigt und entsprechende **Planungsprioritäten für die Nutzung lokal verfügbarer Energieträger** befolgt werden. Grundlegende Kriterien sind dabei die Wertigkeit der Energiequelle, die Ortsgebundenheit und die Umweltverträglichkeit.

Die Planungsprioritätenfolge lautet generell wie folgt (vgl. [9], Modul 2):

1. **Ortsgebundene hochwertige Abwärme und Umweltwärme:** unter anderem Industriebetriebe, Kehrlichtverwertungsanlagen (KVA), Kraftwerke oder bestehende Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK), mitteltiefe und tiefe Geothermie.
2. **Ortsgebundene niederwertige Abwärme und Umweltwärme:** unter anderem aus Abwasser (Sammelkanäle, ARA), Industrie, Rechenzentren, Grund-, Quell-, Oberflächen- oder Trinkwasser sowie untiefe Erdwärme.
3. **Regional verfügbare erneuerbare Energieträger:** effiziente Nutzung von Biomasse wie Grünabfälle, Speisereste.
4. **Nutzung örtlich ungebundener Umweltwärme:** Nutzung von Solarwärme und Wärme aus der Umgebungsluft
5. **Regional verfügbare erneuerbare Energieträger** (knappe Ressourcen): Energieholz

Im Horizon 2020 Projekt RES-DHC (Renewable Energy Sources for District Heating and Cooling) wurde zwischen 2019 und 2023 untersucht, wie die Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien und die Dekarbonisierung in thermischen Netzen verbessert werden können. Dabei wurden in 8 Ländern und Regionen in Zusammenarbeit mit nationalen oder regionalen Begleitgruppen Massnahmen untersucht, Berichte verfasst, Veranstaltungen für den Wissenstransfer durchgeführt und konkrete Umsetzungsmassnahmen begleitet. In Bild 2.13 ist ein Überblick aller durchgeführten Massnahmen dargestellt. Für die Schweiz wurden im Projekt folgende fünf Massnahmen umgesetzt:

- Leitfaden für emissionsfreie thermische Netze - Massnahmenkatalog für die Dekarbonisierung und Flexibilisierung von thermischen Netzen [51].
- Leitfaden zu Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze [52].
- Drei Machbarkeitsstudien (siehe [Link](#)).
- Analyse des Aus- und Weiterbildungsangebotes.
- Entwicklung eines zentralen Informationspunktes zu thermischen Netzen auf <https://www.local-energy.swiss/infobox/bibliothek-planung-thermische-netze/>

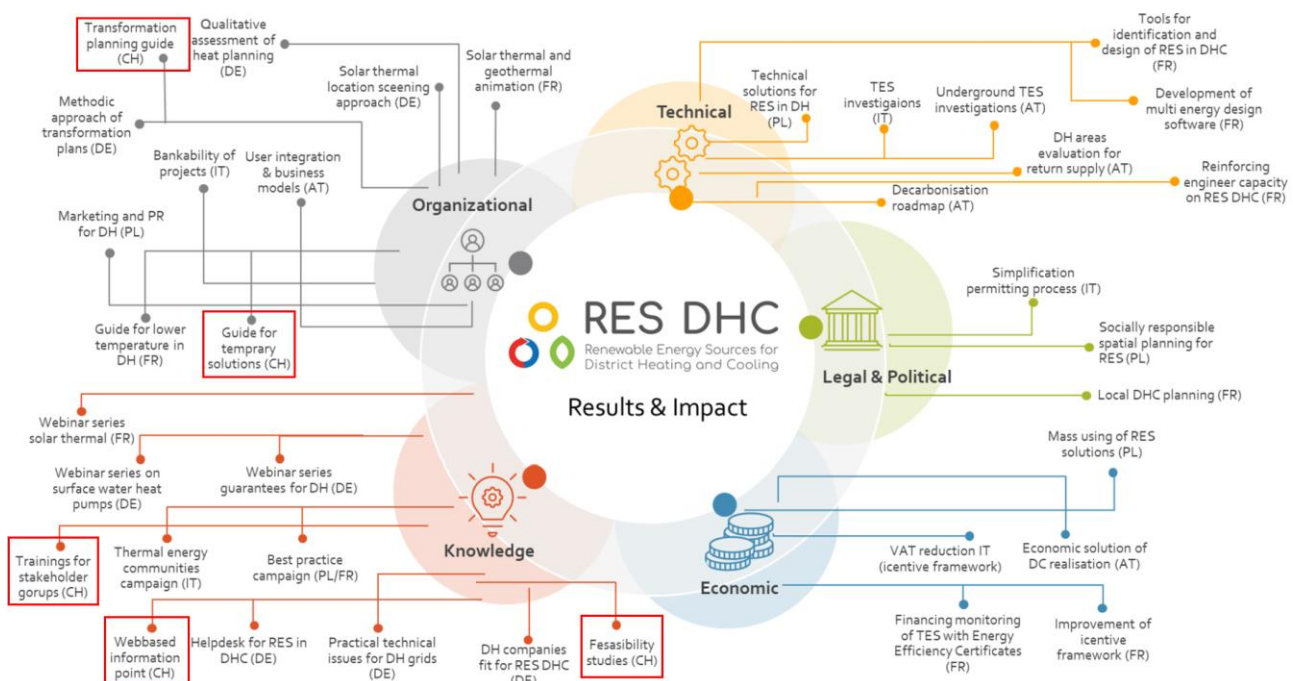


Bild 2.13 Überblick der umgesetzten Massnahmen im Projekt RES-DHC [53]. In den roten Rahmen sind die umgesetzten Massnahmen in der Schweiz erkennbar.

## 2.4 Definition von Wirkungsgraden und Bewertung von Wärme und Elektrizität

### 2.4.1 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad sowie brutto und netto

Der **Wirkungsgrad** einer Anlage wird als Verhältnis zwischen Nutzenergie und zugeführter Energie definiert und kann über eine bestimmte **Betrachtungsdauer** von zum Beispiel einer Stunde in kWh/kWh bestimmt werden oder alternativ auch als **Momentanwert** als Verhältnis zwischen Nutzleistung und zugeführter Leistung zum Beispiel in kW/kW bestimmt werden.

Ein Beispiel für einen Momentanwert ist der durch eine Abgasmessung ermittelte feuerungstechnische Wirkungsgrad eines Heizkessels. Dieser wird durch Berücksichtigung der via Abgasmessung berechneten Abgasverluste bestimmt. Eine solche Bestimmung auf der Basis von 100% minus Verluste wird als **indirekte Methode** bezeichnet. Wenn zusätzlich die Strahlungs- und Rostverluste berücksichtigt werden, ergibt sich daraus ein momentaner Kesselwirkungsgrad.

Der Kesselwirkungsgrad kann aber auch nach der **direkten Methode** bestimmt werden. Dazu werden die über eine bestimmte Betrachtungsdauer erzeugte Nutzwärme und die gleichzeitig zugeführte Brennstoffenergie gemessen. Die Nutzwärme wird dabei mittels Wärmezähler und die Brennstoffenergie aus Brennstoffgewicht und Heizwert bestimmt. Eine aussagekräftige Bewertung setzt dabei voraus, dass die Anlage am Ende der Messung die gleiche Betriebstemperatur wie zu Beginn aufweist.

Wenn die **Betrachtungsdauer ein Jahr** umfasst, wird der als Verhältnis von Nutzwärme zu zugeführter Energie bestimmte Wert als **Nutzungsgrad oder Jahresnutzungsgrad** bezeichnet. Für das Beispiel eines Holzessels entspricht dies der gemessenen Jahreswärmeproduktion dividiert durch den Heizwert des über ein Jahr verbrannten Holzes.

Sowohl für Wirkungsgrade als auch für Nutzungsgrade wird zudem zwischen Brutto- und Netto-Angaben unterschieden:

- **Brutto-Wirkungsgrade** oder -Nutzungsgrade berücksichtigen als Ertrag die Wärmeproduktion des Kessels und die Stromproduktion am Generator ohne Eigenverbrauch an Wärme und Strom.
- **Netto-Wirkungsgrade** oder -Nutzungsgrade berücksichtigen als Ertrag die Wärmeproduktion des Kessels abzüglich des Eigenverbrauchs an Wärme zum Beispiel zur Brennstofftrocknung und die Stromproduktion abzüglich des Eigenverbrauchs an Strom zum Betrieb der Anlage.

### 2.4.2 Gesamtwirkungsgrad

Der **Gesamtwirkungsgrad** bezeichnet die Summe von elektrischem Wirkungsgrad und Wirkungsgrad zur Wärmenutzung. Im Zusammenhang mit thermischen Netzen kommen zur Stromerzeugung vor allem thermische Anlagen mit Dampfturbinen oder ORC-Anlagen zum Einsatz. Solche Dampfprozesse erzielen maximale elektrische Wirkungsgrade, wenn die Kondensation des Prozessmediums bei tiefer Temperatur erfolgt. Dazu kann die Abwärme zum Beispiel über einen Kühlturm an die Umgebung abgeführt werden. Wenn die Abwärme dagegen genutzt werden soll, muss die Kondensation bei höherer Temperatur als der Umgebungstemperatur erfolgen, wodurch der elektrische Wirkungsgrad sinkt. Zur Unterscheidung der verschiedenen Anwendungen sind in Bild 2.14 Wirkungsgrade der Wärme- und Stromerzeugung dargestellt.

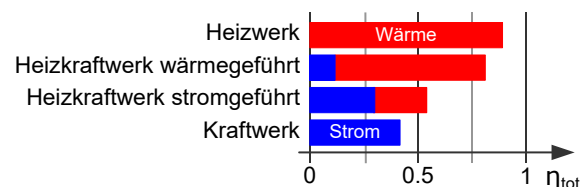


Bild 2.14 Gesamtwirkungsgrad aus Nutzwärme (rot) und Stromproduktion (blau) für Heizwerk, Heizkraftwerk und Kraftwerk. Die Grafik zeigt das qualitative Verhalten und entspricht zum Beispiel folgenden Anlagentypen (v.o.n.u.): Holzheizwerk oder Holzheizung 0,1–10 MW<sub>q</sub>, Holzheizkraftwerk mit ORC und 0,1 MW<sub>el</sub>, Holzheizkraftwerk mit Dampf und 20 MW<sub>el</sub>, Kohlekraftwerk mit 500 MW<sub>el</sub>.

In einem reinen **Kraftwerk** erfolgt keine Abwärmenutzung. Der elektrische Wirkungsgrad wird dabei maximal und entspricht gleichzeitig dem Gesamtwirkungsgrad.

Ein **Heizwerk** produziert nur Wärme und erreicht einen deutlich höheren Gesamtwirkungsgrad als ein Kraftwerk.

Ein **Heizkraftwerk** ist eine thermische Anlage mit Wärme-Kraft-Kopplung. Für Dampfanlagen wird der elektrische Wirkungsgrad durch die Wärmenutzung reduziert. Wenn das Heizkraftwerk **stromgeführt** betrieben wird, wird ein Teil der Wärme genutzt, was zu einer Verminderung des elektrischen Wirkungsgrads führt, während der Rest als Abwärme an die Umgebung abgegeben wird. Bei einem **wärmegeführten** Betrieb wird die gesamte Abwärme genutzt und der elektrische Wirkungsgrad dadurch weiter vermindert. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Wärmenutzung der Gesamtwirkungsgrad.

Für Momentanwerte oder kurzfristige Betrachtungen gelten für den **Wirkungsgrad** eines Heizkraftwerks folgende Bedingungen:

$$\eta_q = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_{Br}}$$

$$\eta_{el} = \frac{P}{\dot{Q}_{Br}}$$

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{Q}_K + P}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_q + \eta_{el}$$

$\eta_q$  = Wirkungsgrad Wärmeproduktion [–]

$\eta_{el}$  = Wirkungsgrad Stromproduktion [–]

$\eta_{tot}$  = Gesamtwirkungsgrad [–]

P = Stromproduktionsleistung [kW]

$\dot{Q}_K$  = als Wärme nutzbare Kesselleistung [kW]

$\dot{Q}_{Br}$  = zugeführte Wärmeleistung im Brennstoff [kW]

Für ein reines Kraftwerk gilt:

$$\eta_q = 0$$

$$\eta_{tot} = \eta_{el}$$

Für ein reines Heizwerk gilt:

$$\eta_{el} = 0$$

$$\eta_{tot} = \eta_q$$

Für einen Heizkessel wird der Wirkungsgrad der Wärmeproduktion zum Kesselwirkungsgrad:

$$\eta_q = \eta_K$$

$\eta_K$  = Kesselwirkungsgrad [–]

Für einen Dampfkessel zum Antrieb eines Dampfprozesses dient dagegen ein Teil der Kesselleistung zur Stromerzeugung mit  $\eta_{el} > 0$ . In dem Fall gilt:

$$\eta_q < \eta_K$$

Für Bewertungen über längere Perioden gelten die Bedingungen analog für den Nutzungsgrad. Für den **Jahresnutzungsgrad** gelten folgende Definitionen:

$$\eta_{q,a} = \frac{Q_{K,a}}{Q_{Br,a}}$$

$$\eta_{el,a} = \frac{E_{el,a}}{Q_{Br,a}}$$

$$\eta_{tot,a} = \frac{Q_{K,a} + E_{el,a}}{Q_{Br,a}} = \eta_{q,a} + \eta_{el,a}$$

$\eta_{q,a}$  = Jahresnutzungsgrad Wärmeproduktion [–]

$\eta_{el,a}$  = Jahresnutzungsgrad Stromproduktion [–]

$\eta_{tot,a}$  = Jahres-Gesamtnutzungsgrad [–]

$E_{el}$  = Jährliche Stromproduktion [kWh/a]

$Q_{K,a}$  = Jährliche Wärmeproduktion [kWh/a]

$Q_{Br,a}$  = Jährlich zugeführte Energie im Brennstoff [kWh/a]

Für einen Heizkessel wird der Jahresnutzungsgrad der Wärme zum Jahresnutzungsgrad des Kessels:

$$\eta_{q,a} = \eta_{K,a}$$

$\eta_{K,a}$  = Jahresnutzungsgrad des Kessels [–]

Um eine hohe Gesamtausnutzung des Brennstoffs zu erzielen, wird für WKK-Anlagen meist eine weitgehend vollständige Nutzung der Abwärme angestrebt. Die Anlagen werden dazu so auf einen Grundlastwärmebedarf ausgelegt, dass sie bei wärmegeführtem Betrieb mindestens 5000 bis 6000 Vollbetriebsstunden pro Jahr erzielen. Entsprechende Anlagen werden in der Schweiz vor allem im Leistungsbereich unter 20 MW<sub>el</sub> ausgeführt. Beispiele sind Holzheizkraftwerke mit Dampfturbinen. Für Leistungen unter 2 MW<sub>el</sub> kommen auch Anlagen mit ORC-Modulen sowie unter 0.5 MW<sub>el</sub> auch Holzgas-BHKW zum Einsatz.

### 2.4.3 Gewichtete Bewertung

Da Elektrizität eine höhere Wertigkeit als Wärme aufweist, wird für einen Vergleich von Wärme- und Stromerzeugung ein Gewichtungsfaktor für Elektrizität eingeführt und für WKK-Anlagen damit ein **gewichteter Gesamt-Wirkungsgrad** wie folgt definiert:

$$\eta_{\text{tot, gew}} = \frac{\dot{Q}_K + f_{\text{el}} P}{\dot{Q}_{\text{Br}}} = \eta_q + f_{\text{el}} \eta_{\text{el}}$$

$\eta_{\text{tot, gew}}$  = Gewichteter Gesamt-Wirkungsgrad [–]

$f_{\text{el}}$  = Gewichtungsfaktor für Elektrizität [–]

Daraus kann der **gewichtete Gesamt-Nutzungsgrad** abgeleitet werden. Dieser wird mit dem Index a beschrieben, was dem gewichteten Gesamt-Nutzungsgrad über ein Jahr entspricht. Da die Ausführungen auch für andere Betrachtungsdauern gelten, wird vereinfachend ein gewichteter Gesamt-Nutzungsgrad wie folgt definiert:

$$\eta_{\text{tot, a, gew}} = \frac{Q_{K, a} + f_{\text{el}} E_{\text{el, a}}}{Q_{\text{Br, a}}} = \eta_{q, a} + f_{\text{el}} \eta_{\text{el, a}}$$

$\eta_{\text{tot, a, gew}}$  = Gewichteter Gesamt-Nutzungsgrad [–]

$f_{\text{el}}$  = Gewichtungsfaktor für Elektrizität [–]

Für  $f_{\text{el}} = 1$  gilt:  $\eta_{\text{tot, gew}} = \eta_{\text{tot}}$  und  $\eta_{\text{tot, a, gew}} = \eta_{\text{tot, a}}$

Für  $f_{\text{el}} > 1$  wird Elektrizität höher gewichtet als Wärme.

Um Elektrizität höher als Wärme zu gewichten, kann für  $f_{\text{el}}$  ein Wert  $> 1$  eingesetzt werden. Der gewichtete Gesamt-Wirkungs- oder -Nutzungsgrad kann dann ebenfalls Werte  $> 1$  erreichen und entspricht streng genommen keinem physikalischen Wirkungs- oder Nutzungsgrad, der auf Werte zwischen 0 und 1 beschränkt sein sollte.

Eine **Gewichtung der Elektrizität** mit  $f_{\text{el}} > 1$  erfolgt unter anderem in der Energieförderungsverordnung (EnFV) [54] zur Nutzung von Biomasse in Dampfkraftanlagen. Darin wird nach Bild 2.15 eine Mindestanforderung an die Nutzung von Wärme und Elektrizität eingeführt, die folgender Bedingung für den gewichteten Brutto-Jahresnutzungsgrad entspricht:

$$\eta_{\text{tot, a, gew}} = \eta_{q, a} + f_{\text{el}} \eta_{\text{el, a}} \geq 70\%$$

Mit der in der Grafik illustrierten Bedingung entspricht die Gewichtung der Elektrizität nach EnFV einem Faktor von  $f_{\text{el}} = 70\% / 40\% = 1.75$ .

Für Anlagen mit Produktion von Pflanzenkohle fehlen bis anhin Bestimmungen in der EnFV. Um vergleichbare Anforderungen anzuwenden, wird nach [55] empfohlen, den Nutzungsgrad Wärme durch den Nutzungsgrad an Heizwert der Pflanzenkohle (PK) zu ergänzen. Für Anlagen zur Produktion von Pflanzenkohle und/oder Wärme und/oder Elektrizität gilt damit folgende Bedingung:

$$\eta_{\text{tot, a, gew}} = \eta_{q, a} + \eta_{\text{PK, a}} + f_{\text{el}} \eta_{\text{el, a}} \geq 70\%; \text{ mit } f_{\text{el}} = 1.75$$

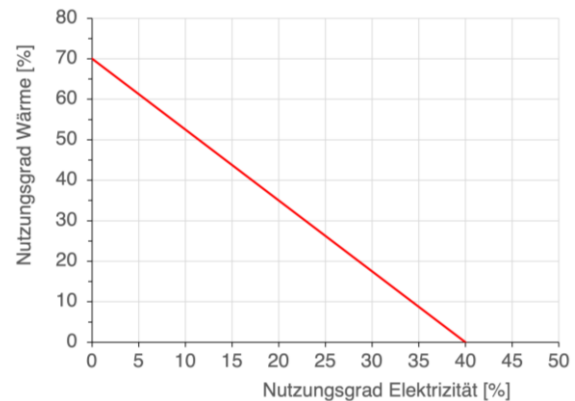


Bild 2.15

Mindestanforderung an den gewichteten Nutzungsgrad für mit Biomasse betriebenen Dampfkraftanlagen nach Energieförderungsverordnung Anhang 1.5 Ziffer 2.2.3 EnFV [54]. Die Anforderung ist als Jahresnutzungsgrad einzuhalten und gilt ohne Eigenverbrauch als Brutto-Nutzungsgrad. Für die Energiezufuhr ist der Heizwert der Biomasse zu verwenden. Anlagen mit Produktion von Pflanzenkohle, sind in der EnFV 2025 nicht aufgeführt. Nach [55] wird für solche Anlagen empfohlen, den 'Nutzungsgrad Wärme' zu ersetzen durch 'Nutzungsgrad Wärme + Nutzungsgrad Pflanzenkohle' und den Nutzungsgrad Pflanzenkohle mit dem Heizwert der Pflanzenkohle zu ermitteln.

Das Bild 2.16 zeigt den Einfluss des elektrischen Wirkungsgrads und des Gewichtungsfaktors auf den gewichteten Gesamtnutzungsgrad für ein Heizwerk, ein Heizkraftwerk und ein Kraftwerk. Für den Gewichtungsfaktor ist ein Basiswert von 1.75 angenommen und zusätzlich ein doppelt so hoher Wert von 3.5 eingesetzt. Die Werte mit in realen Anlagen erzielbaren Nutzungsgraden sind fett dargestellt und decken für das Heizkraftwerk elektrische Nutzungsgrade von 10% bis 40% sowie für das Kraftwerk von 30% bis 60% ab. Für das Heizkraftwerk ist dabei ein wärmegeführter Betrieb angenommen.

Die Grafik zeigt, dass bei einer Gewichtung der Elektrizität mit einem Faktor 3.5 sowohl ein Heizkraftwerk als auch ein Kraftwerk einen höheren gewichteten Gesamtnutzungsgrad erzielen als ein Heizwerk. Bei einer Gewichtung von 1.75 erzielen Heizwerke und Heizkraftwerke ähnliche Gesamtwerte, während ein Kraftwerk erst ab einem elektrischen Wirkungsgrad von über 50% gleich hohe oder höhere Werte erzielt.

Der für die Stromproduktion eingeführte Gewichtungsfaktor für Elektrizität kann auch zur Bewertung von Verbrauchern angewendet und dazu mit der Leistungszahl oder Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Wärmepumpe verglichen oder als solcher interpretiert werden. Für andere Anwendungen, wie etwa dem Stromverbrauch einer Wärmerückgewinnung, kann die Gewichtung als allgemeiner Faktor der Elektro-Thermo-Verstärkung (ETV) interpretiert werden.

Für die **Leistungszahl  $\varepsilon$**  (auch Coefficient of Performance (COP)) einer Wärmepumpe gilt:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{P_{\text{el}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Zu}} + P_{\text{el}}}{P_{\text{el}}}$$

$\varepsilon$  = Leistungszahl (Coefficient of Performance (COP)) [-]

$P_{\text{el}}$  = zugeführte elektrische Leistung [kW]

$\dot{Q}_{\text{Nutz}}$  = Nutzwärmeleistung [kW]

$\dot{Q}_{\text{Zu}}$  = zugeführte Wärmeleistung [kW]

Für eine Elektro-Direktheizung wird die zugeführte Wärmeleistung gleich null und die Leistungszahl gleich 1.

Die zwischen zwei Temperaturniveaus theoretisch maximal erzielbare Leistungszahl beschreibt einen linksläufigen Carnot-Prozess und wird als **Carnot-Leistungszahl  $\varepsilon_C$**  (oder auch  $\text{COP}_C$ ) bezeichnet. Es gilt:

$$\varepsilon_C = \frac{T}{T - T_U}$$

$\varepsilon_C$  = Carnot-Leistungszahl  $\varepsilon_C$  (oder auch  $\text{COP}_C$ ) [-]

$T_U$  = obere Temperatur (Nutzwärme) [K]

$T$  = untere Temperatur (zugeführte Wärme) [K]

Das Bild 2.22 zeigt den Einfluss der Temperaturen auf die Carnot-Leistungszahl.

Das Verhältnis zwischen realer und theoretischer Leistungszahl wird als Gütegrad  $\eta_{\text{WP}}$  bezeichnet und erreicht typische Werte von  $\eta_{\text{WP}} = \varepsilon / \varepsilon_C = 0.4 - 0.55$ .

Für die **Jahresarbeitszahl (JAZ)** gilt:

$$\text{JAZ} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{E_{\text{el}}} = \frac{Q_{\text{Zu}} + E_{\text{el}}}{E_{\text{el}}}$$

JAZ = Jahresarbeitszahl [-]

$E_{\text{el}}$  = jährlicher Stromverbrauch [kWh/a]

$Q_{\text{Nutz}}$  = jährlich produzierte Nutzwärme [kWh/a]

$Q_{\text{Zu}}$  = jährlich zugeführte Wärme [kWh/a]

Als Vergleich zu einem Referenzfall mit dezentralen Heizungen kann somit ein Szenario betrachtet werden, in dem ein Heizkraftwerk mit dem zuvor in Heizungen genutzten Brennstoff betrieben und die Abwärme zum Heizen und der Strom zum Antrieb von Wärmepumpen genutzt wird. Der Energiefluss für dieses Szenario ist in Bild 2.17 in einem Energiefluss- oder Sankey-Diagramm dargestellt. Für das Heizkraftwerk ist dabei ein Nutzungsgrad zu Wärme von 60% und zu Strom von 20% und einem Gesamtnutzungsgrad von 80% angenommen. Wenn für Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von 3.5 angenommen und dieser Wert als Gewichtungsfaktor für die Elektrizität interpretiert wird, resultiert ein gewichteter Gesamtnutzungsgrad von 130%. Die Differenz zwischen 130% gewichtetem Gesamtnutzungsgrad und 80% ungewichtetem Gesamtnutzungsgrad entspricht der durch die Um-

gebungswärme zugeführten Leistung von 50%, die nicht als Aufwand bewertet wird.

Mit dem gleichen Brennstoff kann somit die 1.625-fache Nutzwärme produziert werden (130% / 80%). Alternativ kann auch die gleiche Nutzwärme mit 61.5% des Brennstoffs erzeugt werden (1/1.625), was einer Einsparung um 38.5% entspricht. Das in Bild 2.17 beschriebene Beispiel ist auch in Bild 2.16 als Beispiel eingetragen.

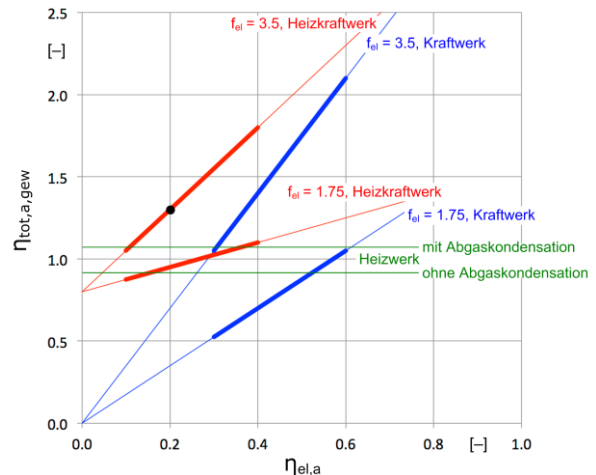


Bild 2.16 Gewichteter Gesamtnutzungsgrad für  $f_{\text{el}} = 1.75$  und  $f_{\text{el}} = 3.5$  für folgende Szenarien: Heizwerk ohne und mit Abgaskondensation, Heizkraftwerk wärmegeführt mit  $\eta_{\text{tot}} = 0.8$  sowie Kraftwerk (ohne Abwärmennutzung). Der Punkt entspricht der Anlage in Bild 2.17.

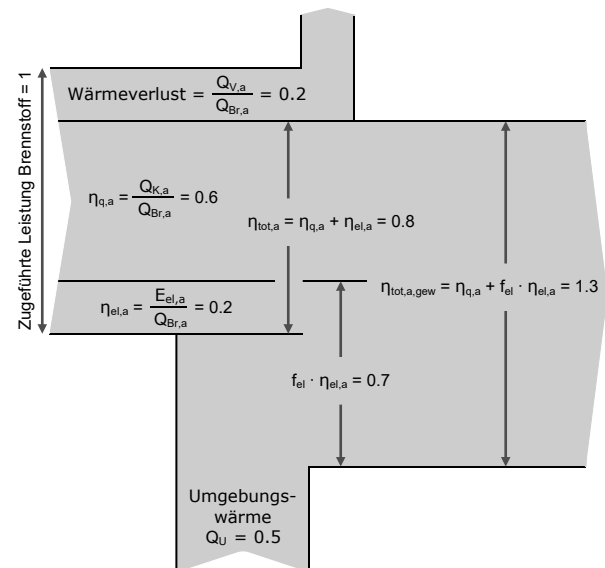


Bild 2.17 Sankey-Diagramm für ein Heizkraftwerk mit Nutzung der Stromproduktion zum Antrieb von Wärmepumpen. Annahmen: Heizkraftwerk:  $\eta_{\text{el},a} = 20\%$ ,  $\eta_{\text{q},a} = 60\%$ . Gewichtung Elektrizität:  $f_{\text{el}} = \text{JAZ} = 3.5$ . Dieses Beispiel entspricht dem in Bild 2.16 als Punkt eingezeichneten Fall mit einem gewichteten Gesamtnutzungsgrad von 130%.

## 2.5 Wärmeerzeugung

### 2.5.1 Allgemein

Eine Zentrale zur Erzeugung von Heizwärme wird als **Heizwerk** bezeichnet. Wenn Strom und Nutzwärme produziert werden, wird die Zentrale als **Heizkraftwerk** bezeichnet. Als Wärmequellen für thermische Netze dienen meist folgende Prozesse und Energieträger:

**Holzkessel:** Automatisch betriebene Heizkessel für Energieholz wie Waldhackschnitzel, Restholz, Altholz oder Holzpellets. Entsprechende Holzkessel kommen in bestehenden thermischen Netzen oft zur Deckung der Grundlast oder des gesamten Wärmebedarfs zur Anwendung. Künftig sollte Energieholz jedoch prioritär für Winter-Spitzenlast reserviert werden.

**Wärmepumpen:** Wärmepumpen zur Nutzung von Umgebungs- oder von Niedertemperaturabwärme. Umgebungswärme wird aus der Luft, aus Flüssen, Seen und Grundwasser oder mittels Erdwärmesonden (was auch als untefe Geothermie bezeichnet wird) genutzt. Niedertemperaturabwärme fällt zum Beispiel im Abwasser an, das in einzelnen Gebäuden oder zentral in der Kanalisation als Wärmequelle genutzt werden kann. Ein grosses Potenzial an Niedertemperaturabwärme enthält zudem das geklärte Wasser im Auslauf von Abwasserreinigungsanlagen (ARA). Da Energieholz begrenzt und ein Zubau von Solar- und Windstromanlagen geplant ist, wird der Einsatz von Wärmepumpen für thermische Netze weiter an Bedeutung gewinnen. Der Betrieb von Wärmepumpen kann im Winter durch Energieholz zur Spitzenlastdeckung ergänzt und damit die Bedarfsspitze an Winterstrom reduziert werden.

**WKK-Anlagen:** Kehrlichtverbrennungsanlagen, Holzheizkraftwerke, sowie Holzgas- und Biogas-BHKW stellen Abwärme bei über 70°C zur Verfügung. Da WKK-Anlagen hohe Kapitalkosten aufweisen, ist aus ökonomischen Gründen ein Betrieb mit hohen Vollbetriebsstunden und möglichst vollständiger Nutzung der Abwärme notwendig. WKK-Anlagen werden deshalb wie in Bild 2.6 beschrieben als Grundlast-Wärmeerzeuger ausgelegt und soweit möglich wärmegeführt betrieben.

**Fossile Wärmeerzeuger:** Mit Erdgas oder Heizöl betriebene Heizkessel verursachen niedrige Investitionskosten und sie ermöglichen rasche Leistungsänderungen. Bestehende thermische Netze verfügen deshalb oft über fossile Spitzenlastkessel. Für neue Anlagen kommen fossile Wärmeerzeuger dagegen nicht mehr oder höchstens als Notfallreserve infrage. Anstelle von Notkesseln kommt allerdings auch eine Anschlussmöglichkeit für eine mobile Wärmeerzeugung infrage.

**Abwärme:** Abwärme aus industriellen Prozessen auf einem Temperaturniveau von über 70°C kann direkt genutzt werden. Niedertemperaturabwärme, auf einem Temperaturniveau unter 60°C, kann für die Warmwasseraufbereitung nicht direkt genutzt werden. Je nach Temperaturniveau der Abwärmequellen ist grundsätz-

lich zu prüfen, ob der Temperaturhub auf die notwendige Vorlauftemperatur zentral oder dezentral erfolgt. Vor einer solchen Nutzung sollten allerdings Massnahmen zu Effizienzsteigerung sowie prozessinterne Nutzung und Rekuperation geprüft werden (Stichwort: Prozessintegration, Pinch-Analyse).

**Solarthermie:** Sofern geeignete Flächen zur Verfügung stehen, kommen solarthermische Anlagen als Zusatzheizung für thermische Netze infrage. Dabei werden in der Regel auf einen Tag ausgelegte Wärmespeicher eingebunden und die Solaranlagen aus wirtschaftlichen Gründen nur zur Deckung des Wärmebedarfs im Sommer ausgelegt. Für bestehende Wohnbauten wird damit ein solarer Deckungsgrad von weniger als 10% erreicht, während für Neubauten auch höhere Werte möglich sind. Die Einbindung solarthermischer Anlagen in thermischen Netzen ist in der Schweiz allerdings noch kaum verbreitet, da die Wärmeerzeugungskosten bis anhin meist höher sind als die Grenzkosten der sonstigen Wärmeerzeugung.

**Solarthermie für Kälte:** Während verglaste Kollektoren zur Wärmeerzeugung dienen, können unverglaste auch zur nächtlichen Gebäudekühlung eingesetzt oder zur Bereitstellung von Gebäudekälte in thermische Netze eingebunden werden.

**Geothermie:** In der Schweiz steht die Nutzung von Niedertemperaturwärme aus untefer Geothermie im Vordergrund, die direkt oder allenfalls nach einem Transport in thermischen Netzen als Quelle für Wärmepumpen dient. Die Nutzung von Hochtemperaturwärme aus tiefer Geothermie ist dagegen kommerziell nicht sehr verbreitet. Bekannt ist der Wärmeverbund Riehen AG in Riehen BS, welcher seit gut 30 Jahren ein thermisches Netz mit Hauptenergiequelle aus tiefer Geothermie betreibt. Der Wärmeverbund Riehen AG ist aktuell daran mit dem Projekt «geo2riehen» seine bestehende Geothermieanlage zu erweitern. Das Ziel ist, den Anteil erneuerbarer Energie von aktuell durchschnittlich 55% auf über 80% zu erhöhen [56]. Des Weiteren sind gemäss Geothermie Schweiz [57] diverse Projekte in einer frühen Vorbereitungs- und Explorationsphase, bei welchen die prognostizierten Temperaturen und Ergiebigkeit noch zu bestätigen sind.

### 2.5.2 Reine Wärmeerzeugung (Heizwerke)

#### 2.5.2.1 Holzheizkessel

Bis vor einigen Jahren kamen für thermische Netze oft Holzessel als Haupt-Wärmeerzeuger zum Einsatz, die mit einem fossilen Kessel für die Spitzenlast ergänzt wurden. Entsprechend sind die Techniken zur Energieholznutzung und auch die Versorgungsketten etabliert. Als Energieträger für kleinere Heizwerke kommen in erster Linie Waldhackschnitzel und Holzpellets zum Einsatz, während für grössere Anlagen nebst Waldhackschnitzel auch Restholz und Altholz infrage kommen. Die verschiedenen Sortimente setzen teilweise unterschiedliche Techniken zur Brennstofflagerung und

zur Verbrennung voraus und es gelten auch unterschiedliche bauliche und gesetzliche Anforderungen. Letzteres betrifft insbesondere die in der Luftreinhalteverordnung (LRV) [58] geregelten Emissionsgrenzwerte und die in der Abfallverordnung geregelte Entsorgung der Aschen (VVEA) [59].

Alle Energieholz-Sortimente zusammen liefern heute rund 15 TWh/a oder 7% der Endenergie und die Nutzung kann bei einem Potenzial von voraussichtlich um die 20 TWh/a noch um rund ein Viertel erhöht werden.

### Energieholzsorimente

Bei direkt aus dem Wald gelieferten **Waldhackschnitzeln** ist bei der Anlagenauslegung unter anderem der hohe Wassergehalt zu beachten. Der Einsatz von nassen Waldhackschnitzeln setzt geeignete Feuerungen voraus und schränkt die Möglichkeit rascher Lastwechsel und von Teillastbetrieb ein. Feuerungen mit nassen Waldhackschnitzeln sind deshalb vor allem zur Deckung der Grundlast geeignet. Bei der Lagerung von nassen Holzschnitzeln kann durch Gärung Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) gebildet werden. Da  $\text{CO}_2$  eine höhere Dichte als Luft aufweist, sinkt es in geschlossenen Räumen auf den Boden, weshalb zum Personenschutz eine Überwachung und Belüftung notwendig sind. Dies gilt auch für nasses Restholz, das meist aus der ersten Verarbeitungsstufe anfällt und zum Beispiel Rinde in Sägereien umfasst. Da Rinde zudem einen erhöhten Aschegehalt aufweist und überlange Stücke enthalten kann, sind zu deren Nutzung höhere Anforderungen an Fördereinrichtungen und Verbrennungsanlagen einzuhalten.

Für Feuerungen im kleinen und mittleren Leistungsbe-  
reich bietet sich daneben der Einsatz von **Holzpellets** an. Für nicht-industrielle Anwendungen kommen dabei in erster Linie hochwertige Holzpellets der Klasse A1 nach ISO 17225-2 infrage. Im Vergleich zu Waldhackschnitzeln weisen Holzpellets einen niedrigeren Wassergehalt und höheren Heizwert auf. Pellets sind zudem gut rieselfähig und verursachen dank der höheren Schüttdichte einen geringeren Raumbedarf für Lagerung, Fördereinrichtungen und Feuerungen. Während Holzpellets kein  $\text{CO}_2$  freisetzen, können sie durch unter bestimmten Bedingungen Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) freisetzen.  $\text{CO}$  hat eine ähnliche Dichte wie Luft und kann bei Anreicherung in zum Beispiel in Pelletsilos ab einer gewissen Grösse zu einer Gefährdung durch inneres Ersticken führen, weshalb entsprechende Sicherheitsmassnahmen zu beachten sind.

**Restholz** aus der zweiten Verarbeitungsstufe wie Schreinereien und Zimmereien oder Möbel- und Küchenfabriken kann je nach Zusammensetzung Fremdstoffe wie Leime, Lack und Farben enthalten. Ausserdem kann die Grösse von groben Stücken bis zu feinen Hobelspänen variieren. Besonders anspruchsvoll ist die Handhabung und Verbrennung von staubförmigen Brennstoffen, da Explosionsgefahr und allfällige eine Gesundheitsgefährdung (einige Stäube gelten als karzinogen) zu beachten und spezielle Verbrennungsanla-

gen notwendig sind. Für brennbare Stäube kommt deshalb oft eine Pelletierung oder Brikettierung zum Einsatz. Entsprechende Presslinge werden oft in eigenen Anlagen energetisch genutzt und dürfen nicht als naturbelassene Brennstoffe vertrieben werden.

Bei **Altholz**, also Holz von alten Möbeln, Verpackungsmaterial und Gebäudeabbrüchen, ist die Herkunft und Zusammensetzung meist nicht bekannt und kann mit Schwermetallen und anderen Fremdstoffen belastet sein. Eine Nutzung von Altholz ist deshalb nur in Anlagen erlaubt, die nach LRV für Altholz zugelassen sind und die entsprechenden Anforderungen an die Abgasreinigung und den Anlagenbetrieb einhalten.

### Feuerungstypen

Zur Nutzung der einzelnen Energieholzsorimente kommen unterschiedliche Techniken für Brennstofflagerung, Transport, Feuerung und Abgasreinigung zum Einsatz. Das **Planungshandbuch von QM Holzheizwerke** gibt eine Übersicht zu den wichtigsten Techniken [39].

Für Holzpellets stehen zahlreiche Feuerungstechniken zur Verfügung, die meist über eine automatische Zündung mittels Heissluftgebläse sowie eine periodische Entaschung über einen beweglichen Rost verfügen.

Für Waldhackschnitzel sowie Restholz und Altholz kommen meistens Rostfeuerungen zum Einsatz, die einen Brennstofftransport im Feuerraum und eine effiziente Austragung grosser Aschemengen und allfälliger Fremdstoffe im Brennstoff ermöglichen. Das Bild 2.18 zeigt den Aufbau einer Vorschubrostfeuerung, wie sie im Leistungsbereich von weniger als 500 kW bis zu über 50 MW zum Einsatz kommen.

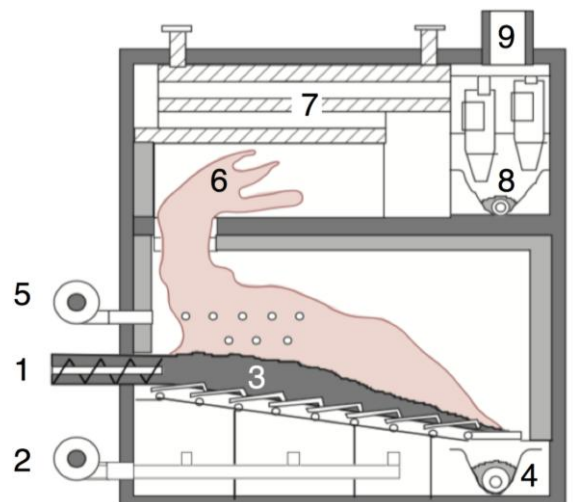


Bild 2.18 Prinzip einer Vorschubrostfeuerung für Waldhackschnitzel und andere Energieholzsorimente [60].  
1 Brennstoffzufuhr, 2 Primärluft (3 Zonen), 3 Vorschubrost mit Brennstoffbett, 4 Austragung der Rostasche, 5 Sekundärluft, 6 Nachbrennkammer, 7 Kessel, 8 Multizyklon als Grobstaub-Abscheider, 9 Abgasrohr.

Um gute Verbrennungsbedingungen sicherzustellen, verfügen solche Verbrennungsanlagen über eine sogenannte gestufte Verbrennung. Dabei wird dem Brennraum über eine oder mehrere Zuführungen sogenannte Primärluft zugeführt, welche zur Umwandlung des Holzes in Gase und Asche dient. Die Asche wird im Anschluss aus dem Feuerraum entfernt, während die brennbaren Gase mit Sekundärluft und teilweise mit Tertiärluft gemischt werden und in einer anschließenden Brennkammer zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  verbrennen. Die dazu notwendige Luftmenge wird dabei nach dem Prinzip "so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich" eingestellt. Dies wird durch die Luftüberschusszahl beschrieben, welche das Verhältnis zwischen effektiv verfügbarer Luftmenge und minimal notwendiger Luftmenge beschreibt. Die Luftüberschusszahl kann durch Messung des Sauerstoffgehalts im Abgas bestimmt werden. Ziel ist, dass ausreichend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung des Kohlenstoffs zur Verfügung steht, der Feuerung aber möglichst wenig unnötige Luft zugeführt wird, da diese die Verbrennungstemperatur reduziert und die Abgasverluste erhöht. Optimale Werte heutiger Anlagen sind Luftüberschusszahlen um 1.4 bis 1.6 oder Sauerstoffgehalte im Abgas um 6 bis 8 Vol.-%.

Im Leistungsbereich bis etwa 2.5 MW kommen für Brennstoffe mit begrenztem Aschegehalt und Wassergehalt auch etwas günstigere Unterschubfeuerungen zum Einsatz.

Für Leistungen ab etwa 5 MW oder meist eher ab 10 MW kommen auch Wirbelschichtfeuerungen zum Einsatz. Diese erzielen dank tieferem Luftüberschuss etwas höhere Wirkungsgrade und tiefere Emissionen im Rohgas als Rostfeuerungen, weisen aber einen etwas höheren Hilfsenergieverbrauch auf.

Als Sonderbauform kommen ab 1 MW auch Staubfeuerungen zum Einsatz, die oft im Feuerraum einer Rostfeuerung integriert werden und dann von Interesse sind, wenn trockener Holzstaub aus der Holzverarbeitung anfällt.

Das Bild 2.19 zeigt die typischen Einsatzgebiete der wichtigsten Bauarten von Holzheizungen.

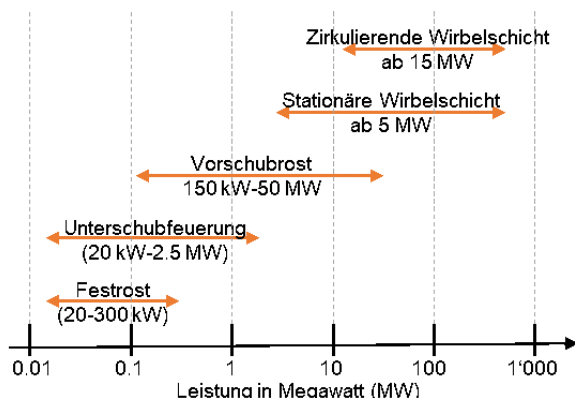


Bild 2.19 Einsatzgebiete der wichtigsten Bauarten von Holzheizungen [39].

Zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte an Feinstaub werden automatische Holzheizungen mit einer Staubabscheidung ausgerüstet. Bei der Nutzung feuchter Brennstoffe kommen meist Elektroabscheider zum Einsatz, für trockene Brennstoffe auch Gewebefilter. Elektroabscheider weisen in der Regel höhere Kapitalkosten auf, sind aber unempfindlicher im Betrieb und verursachen niedrigere Betriebskosten. Gewebefilter bieten die Möglichkeit der Zugabe von Sorptionsmittel zur Abscheidung von Schadgasen wie  $\text{HCl}$  und  $\text{SO}_2$  sowie der Zugabe von Aktivkohle zur Abscheidung weiterer Schadstoffe wie Dioxine und Furane. Gewebefilter kommen deshalb vor allem bei der Verwertung von Restholz und Altholz zum Einsatz.

Wie aus dem Aufbau eines Holzheizwerks mit Brennstofflager, Heizraum und technischen Einrichtungen nach Bild 2.20 hervorgeht, weisen Energiezentralen mit Holz einen grossen Raumbedarf auf. Damit verbunden sind auch hohe spezifische Kapitalkosten, die gemäss Planungshandbuch QM Holzheizwerke [39] vor allem für Leistungen bis 2 MW einen starken Skaleneffekt aufweisen. Ein wesentlicher Kostenfaktor ist dabei die Brennstofflagerung. Lagerhallen sind in der Regel am günstigsten. Bei Neubauten können oft auch Unterflursilos mit nur geringfügig höheren Kosten integriert werden, während nachträglich erstellte Unterflursilos hohe Kosten verursachen. Wegen des grossen Platzbedarfs zur Brennstofflagerung ist eine ganzjährig gesicherte Versorgung vorteilhaft, da dies eine Auslegung der Lagerkapazität vor Ort auf wenige Tage in der kältesten Periode erlaubt. Für die Versorgung von Heizwerken mit Energieholz ist gleichzeitig die Entsorgung der anfallenden Aschen nach Möglichkeit durch den Energieholzlieferanten sicherzustellen.

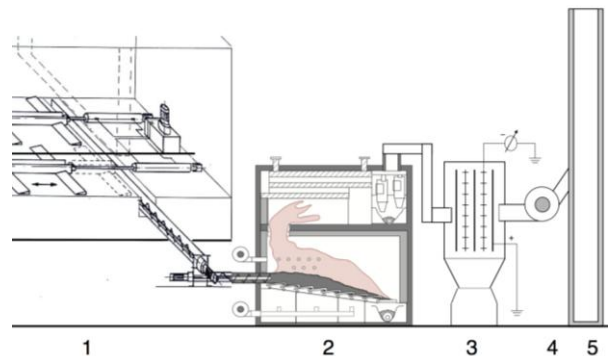


Bild 2.20 Energiezentrale mit automatischer Holzfeuerung: 1 Brennstofflager mit Austragung, 2 Heizkessel, 3 Feinstaubabscheider (im Bild Elektroabscheider), 4 Abgasventilator, 5 Kamin [60].

Tabelle 2.3 Heizwert und Energiedichte zur Lagerung für verschiedene Brennstoffe. Für Holzhackschnitzel ist ein typischer Wassergehalt (Masse Wasser pro Masse nasses Holz) von 30% angenommen. Die Lagerdichte bezeichnet die Masse pro Lagervolumen, was für Holzschnitzel der Schüttdichte entspricht. Die Energiedichte beschreibt den Energieinhalt pro Lagervolumen. Detailliertere Angaben zu Energieholz sind im Planungshandbuch QM Holzheizwerke [39] zu finden.

| Brennstoff        |        | Wassergehalt<br>Gew.-% | Heizwert<br>kWh/kg | Lagerdichte<br>kg/m <sup>3</sup> | Energiedichte<br>kWh/m <sup>3</sup> | Lagervolumen<br>(Öl=1) |
|-------------------|--------|------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Holzhackschnitzel | Fichte | 30 %                   | 3.5                | 200                              | 700                                 | 13                     |
|                   | Buche  | 30 %                   | 3.3                | 270                              | 900                                 | 11                     |
| Holzpellets       |        | 10 %                   | 4.9                | 650                              | 3200                                | 3                      |
| Heizöl            |        | 0 %                    | 11.8               | 850                              | 10'000                              | 1                      |

Wie Tabelle 2.3 zeigt, weisen Holzpellets lediglich rund einen Viertel so grossen Platzbedarf für die Lagerung wie Waldhackschnitzel, was zum Beispiel beim Ersatz einer Ölheizung ein Vorteil sein kann. Da Holzpellets teurer als Waldhackschnitzel sind, aber niedrigere Investitionskosten verursachen, sind sie vor allem für kleinere Leistungen oder als Spitzenlastkessel interessant.

Als Alternative für kleinere Feuerungen werden zum Teil auch Holzschnitzel angeboten, die durch eine technische Trocknung und Abtrennung des Feingutanteils aufbereitet und auch als „Qualischnitzel“ bezeichnet werden. QM Holzheizwerke unterscheidet dabei nach FAQ 36 zwischen Qualischnitzel fein und grob, wobei die grobe Kategorie nur für Anlagen ab 100 kW empfohlen wird [39].

#### Andere biogene Energieträger

Da bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen das Energieholzpotential zu rund 90% ausgeschöpft ist und die verbleibenden Mengen bereits weitestgehend verplant sind, besteht auch ein Interesse an anderen biogenen Brennstoffen, darunter Reststoffe aus der Landwirtschaft und der Nahrungsmittelverarbeitung wie Stroh und Getreiderückstände. Solche Sortimente weisen einen hohen Aschegehalt sowie hohe Gehalte an Stickstoff, Schwefel, Kalium, Chlor und anderen Elementen auf. Dies führt zu grossen Aschemengen, Verschlackung und Ablagerungen sowie erhöhten Schadstoffemissionen an Staub und Stickoxiden. Die Nutzung als Brennstoff verursacht deshalb höhere Anforderungen.

**Nasse Biomasse** wie Gülle, Klärschlamm und feste Küchenabfälle kommen zur direkten Nutzung in Heizkesseln nicht infrage. Dagegen bietet sich für diese Reststoffe eine Verwertung durch anaerobe Vergärung an. Zum Einsatz kommen einerseits dezentrale Biogasanlagen in Landwirtschaftsbetrieben, die aus Kostengründen jedoch eine gewisse Mindestgrösse aufweisen müssen. Daneben kommen grössere zentrale Vergärungsanlagen zum Einsatz, die oft zur Co-Vergärung von flüssigen Rückständen wie Klärschlamm und Gülle zusammen mit festen Rückständen aus der Gastronomie und von Haushalten ausgelegt sind. Das Biogas aus Vergärungsanlagen besteht üblicherweise aus rund

60% bis 70% Methan und 25% bis 40% Kohlendioxid und enthält zudem Schwefel- und Stickstoffverbindungen, die vor der Nutzung in der Regel abgeschieden werden. Aufgrund der Zusammensetzung weist Biogas einen Heizwert auf, der rund zwei Drittel desjenigen von Erdgas entspricht. Biogas kann in einem Gasmotor-BHKW eingesetzt oder zur Einspeisung ins Erdgasnetz aufbereitet werden. Im Gegensatz zu einer motorischen Nutzung muss zur Einspeisung allerdings auch das Kohlendioxid in einer Gaswäsche abgetrennt werden. Bei Nutzung in einem BHKW bietet sich eine Abwärmenutzung für thermische Netze und dabei insbesondere zur Grundlastdeckung an.

#### 2.5.2.2 Direkt nutzbare Abwärme

Abwärme aus industriellen Prozessen, die bei Temperaturen über 70°C anfällt, ist zwar zur Nutzung in thermischen Netzen geeignet, sollte aber in erster Priorität vermieden oder betriebsintern genutzt werden. Voraussetzung ist zudem, dass der Aufwand zur Abwärmenutzung wirtschaftlich und der zeitliche und örtliche Anfall geeignet und auf absehbare Zeit verfügbar ist. Die Wärmeversorgung wird daneben meist mit einer konventionellen Wärmeerzeugung abgesichert. Im Weiteren ist zu beachten, dass Verbesserungen oder Veränderungen in der Produktion den Anfall an Abwärme reduzieren können. Daneben ist zu beachten, dass für die industrielle Produktion viel kürzere Abschreibungszeiten als für thermische Netze vorausgesetzt werden, was eine Koordination der Investitionen erschwert. Aus diesen Gründen ist eine direkte Nutzung industrieller Abwärme selten. Soweit grosse Mengen an Abwärme bei über 300°C zur Verfügung stehen, bietet sich anstelle einer reinen Wärmenutzung vorab eine Stromerzeugung mit Wärme-Kraft-Kopplung mittels ORC-Anlagen an, was im Kapitel 2.5.3.4 behandelt wird.

### 2.5.2.3 Wärmepumpen

#### 2.5.2.3.1 Nutzung von Umgebungswärme und Niedertemperatur-Abwärme

Eine Wärmepumpe (WP) und eine Kältemaschine (KM) sind vom technischen Grundprinzip identisch [61]. Der Nutzen einer reinen Kälteanlage ist der Wärmeentzug der Wärmequelle auf der kalten Seite zur Kälteerzeugung bei einer Temperatur unter der Umgebungstemperatur. Im Gegensatz dazu ist der Nutzen einer Wärmepumpe die Wärmeerzeugung bei einer Temperatur über der Umgebungstemperatur zum Heizen und für Warmwasser oder für Prozesswärme. Der Einsatz einer KM bzw. einer WP ist deshalb besonders wirtschaftlich, wenn gleichzeitig ein Kältebedarf und ein Wärmebedarf gedeckt werden müssen. Ein klassisches Beispiel dafür ist die Kombination einer Eisbahn mit einem Hallenbad, wobei das Hallenbad ganz oder teilweise mit der Abwärme der Eisproduktion beheizt wird. Der Einsatz von Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen kann aber auch für die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme und Kälte mittels eines thermischen Netzes eingesetzt werden.

Das Bild 2.21 zeigt das Funktionsprinzip einer KM bzw. einer WP (oben) und den Kreisprozess im Druck-Enthalpie-Diagramm (unten) [61]. Die von der WP erzeugte Kondensationswärme stammt aus der Verdampfungswärme, die über den Verdampfer aus Abwärme oder Umweltwärme auf das im Kreisprozess verwendete Kältemittel zugeführt wird und der dem Verdichter zugeführten elektrischen Leistung:

$$\dot{Q}_{WP} = \dot{Q}_{KM} + P_{WP}$$

Die Verdampfung erfolgt bei tiefem Druck und entsprechend niedriger Verdampfungstemperatur des Kältemittels. Das gasförmige Kältemittel wird in einer Kompressions-Wärmepumpe durch Zufuhr mechanischer Energie im Verdichter auf höheren Druck und damit auf ein höheres, nutzbares Temperaturniveau gebracht. In einer Absorptions-Wärmepumpe wird als Kältemittel ein Zweistoffgemisch eingesetzt und die Druckerhöhung erfolgt durch Zufuhr von Hochtemperaturwärme und Verdampfung einer der zwei Komponenten im Kältemittel. In beiden Fällen wird die Wärme im Verflüssiger oder Kondensator als Kondensationswärme auf dem oberen Temperaturniveau an das Heizungsmedium abgegeben. Das Kältemittel wird dabei in den flüssigen Zustand zurückgeführt. Anschliessend wird das unter Druck stehende, flüssige Kältemittel über ein Expansionsventil auf niedrigen Druck entspannt und steht wieder für den Start des nächsten Kreislaufs zur Verfügung.

Das Log-p-h-Diagramm nach Bild 2.21 beschreibt den Kreisprozess und umfasst folgende Schritte:

- 1 – 2 **Druckerhöhung** (Verdichtung oder Kompression) des Dampfes durch Zufuhr mechanischer Energie (oder Hochtemperaturwärme bei Absorptions-Wärmepumpen).
- 2 – 3 **Verflüssigung** oder Kondensation des Dampfes durch Wärmeabgabe an die Wärmesenke (Heizmedium).
- 3 – 4 **Druckreduktion** (Expansion) der Flüssigkeit mit teilweiser Verdampfung.
- 4 – 1 Vollständige **Verdampfung** der Flüssigkeit durch Wärmezufuhr von der Wärmequelle.

Ein realer Prozess umfasst noch folgende Teilschritte:

- 1' – 1 **Überhitzung** des Dampfes zur Vermeidung von Tröpfchen im Verdichter.
- 2 – 2' **Enthitzung** zum Wärmeentzug auf einem Temperaturniveau über dem der Kondensation.
- 3' – 3 **Unterkühlung** der Flüssigkeit zur zusätzlichen Wärmegewinnung bei gleichem Aufwand.

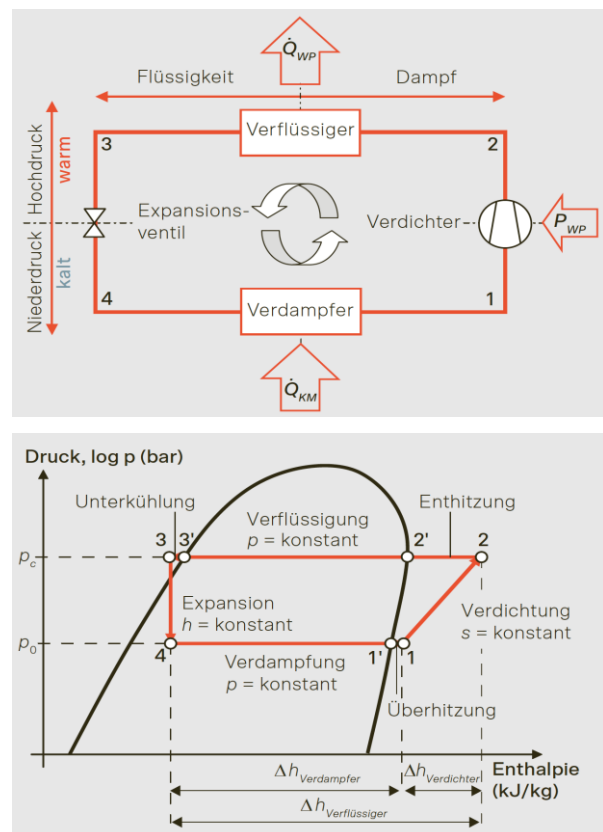


Bild 2.21 Aufbau eines Kältemittelprozesses bzw. einer Wärmepumpe (oben) und Prozess im Druck-Enthalpie-Diagramm (unten) [61]. Da der Druck logarithmisch dargestellt wird, wird letzteres als Log p-h-Diagramm bezeichnet mit p = Druck, h = Enthalpie und s = Entropie.

Wärmepumpen nutzen damit Wärme auf tiefem Temperaturniveau und erhöhen die Temperatur der Wärme auf ein nutzbares Niveau. Das Verhältnis zwischen Nutzwärme und bei Kompressions-Wärmepumpen als Elektrizität zugeführter hochwertiger Energie wird nach Kapitel 2.4.3 als Leistungszahl  $\varepsilon$  definiert und bei der Betrachtung über ein Jahr als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet.

Die Leistungszahl wird unendlich gross, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (untere Temperatur  $T_u$ ) und Wärmeproduktion (obere Temperatur  $T$ ) gegen null geht. Wenn die Temperaturdifferenz sehr gross wird, nähert sich die Leistungszahl dagegen dem Wert eins und die Wärmepumpe entspricht dann einer elektrischen Heizung. Wärmepumpen sind deshalb nur interessant, wenn Quelle und Nutzwärme eine geringe Temperaturdifferenz aufweisen. Bild 2.22 zeigt dazu die Carnot-Leistungszahl  $\varepsilon_C$  in Funktion der Temperatur für verschiedene Quelltemperaturen.

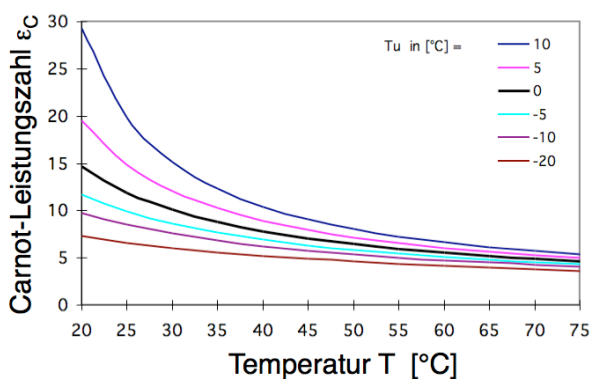


Bild 2.22 Carnot-Leistungszahl in Funktion der Temperatur  $T$  der Nutzwärme bzw. der Kondensations- oder oberen Temperatur für verschiedene Niveaus der Temperatur der Wärmezufuhr  $T_u$  bzw. der Verdampfungs- oder der unteren Temperatur zwischen  $-20^\circ$  und  $+10^\circ\text{C}$ .

Reale Prozesse erreichen niedrigere Leistungszahlen. Das Verhältnis zwischen realer Leistungszahl und Carnot-Leistungszahl wird als Gütegrad bezeichnet und weist typische Werte zwischen 0.4 bis 0.6 auf. Die Tabelle 2.4 zeigt reale Leistungszahlen für verschiedene Temperaturniveaus für einen Gütegrad von 0.5. Für thermische Netze mit einer Vorlauftemperatur von  $70^\circ\text{C}$  wird bei einer Quelltemperatur von  $10^\circ\text{C}$  eine reale Leistungszahl von 2.9 erzielt. Wenn die Wärmepumpe nur zur Erwärmung auf  $50^\circ\text{C}$  dient, wird dagegen eine Leistungszahl von 4.0 erreicht, während für Gebäudewärme bei  $35^\circ\text{C}$  ein Wert von 6.2 erreicht wird. Zur Versorgung von Gebäuden kann eine Wärmepumpe auch auf zwei Temperaturniveaus ausgelegt und zum Beispiel alternierend für Raumwärme bei  $35^\circ\text{C}$  und für Warmwasser bei  $50^\circ\text{C}$  oder  $60^\circ\text{C}$  betrieben werden. Dies ist grundsätzlich auch für thermische Netze möglich, erfordert dann allerdings ein Dreileitersystem oder alternierenden Netzbetrieb.

Tabelle 2.4 Reale Leistungszahl  $\varepsilon$  oder COP einer Wärmepumpe mit Gütegrad 0.5 für verschiedene Temperaturen der Nutzwärme ( $T$ ) und der Wärmequelle ( $T_u$ ) mit  $\varepsilon = \text{COP} = \text{Gütegrad} \cdot \varepsilon_C = \text{Gütegrad} \cdot \text{COP}_C$ .

| Temperatur Nutzwärme<br>$T$          | Temperatur Wärmequelle<br>$T_u$ |                    |                    |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
|                                      | $0^\circ\text{C}$               | $10^\circ\text{C}$ | $20^\circ\text{C}$ |
| <b><math>35^\circ\text{C}</math></b> | 4.4                             | 6.2                | 10.3               |
| <b><math>50^\circ\text{C}</math></b> | 3.2                             | 4.0                | 5.4                |
| <b><math>70^\circ\text{C}</math></b> | 2.5                             | 2.9                | 3.4                |
| <b><math>90^\circ\text{C}</math></b> | 2.0                             | 2.3                | 2.6                |

Für dezentrale Anwendungen kommen hauptsächlich Kompressions-Wärmepumpen zum Einsatz, die über einen elektrischen Antrieb des Verdichters verfügen. Der Einsatz von Absorptionsanlagen ist dann von Interesse, wenn grosse Mengen an Abwärme bei ausreichender Temperatur zur Verfügung stehen.

Wenn der Kreisprozess gleichzeitig für Heizen und Kühlen verwendet wird, kann der COP wie folgt beschrieben und im Vergleich zu einer reinen Wärmeerzeugung im Idealfall beinahe verdoppelt werden [62]:

$$\text{COP}_{H+K} = 2 \cdot \text{COP}_H - 1$$

Während sich Wärmepumpen als häufigstes Heizsystem mit Standardprodukten für Gebäude im Leistungsbereich bis 20 kW etabliert haben, werden Wärmepumpen für thermische Netze in der Regel für den spezifischen Anwendungsfall ausgelegt und hergestellt. Diese Geräte werden auch als industrielle Wärmepumpen oder als Grosswärmepumpen bezeichnet. Aktuell werden in der Schweiz jährlich mehr als 200 Wärmepumpen mit über 100 kW und mehr als 40 mit über 100 kW Heizleistung installiert [63].

Sofern Grosswärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger für thermische Netze eingesetzt werden, werden sie meist mit Vorlauftemperaturen von  $70^\circ\text{C}$  bis  $90^\circ\text{C}$  betrieben. Das Bild 2.23 zeigt eine Klassifizierung der Wärmepumpen nach Temperaturniveau der Quelle und der Senke. Der blau hinterlegte Bereich beschreibt dabei das Einsatzgebiet für typische Fernwärmenetze.

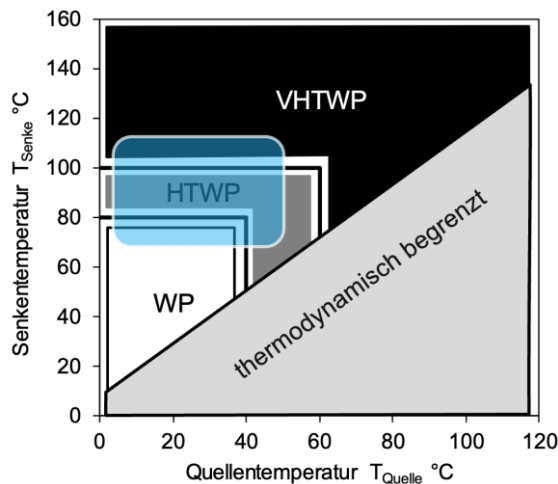


Bild 2.23 Klassifizierung der Wärmepumpen nach Temperaturniveau (Quelle/Senke).  
 VHTWP: Höchsttemperatur-WP  
 HTWP: Hochtemperatur-WP  
 WP: Konventionelle WP  
 Blauer Bereich: Typische thermische Netze in der Schweiz mit Vorlauftemperaturen (Senke) von 70°C bis 110°C und Quelltemperaturen von 0°C bis 50°C (Grundwasser bis Abwärme) [63].

Grosswärmepumpen erreichen einen typischen COP von etwa 3.0 bei einem Temperaturhub von 60 K und einem Gütegrad von rund 0.45, wie in Bild 2.24 dargestellt.

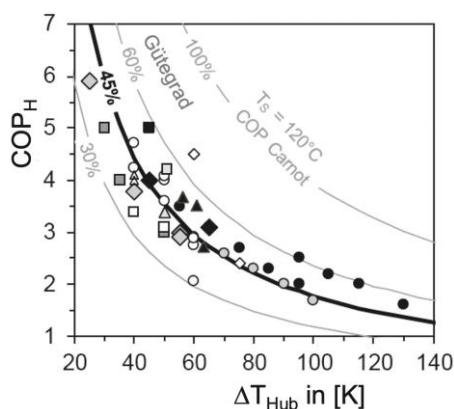


Bild 2.24 COP von industriellen Wärmepumpen in Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Senkenaustritt und Quelleneintritt [62].

Bevorzugt werden natürliche Kältemittel wie Ammoniak, CO<sub>2</sub>, Butan, Propan, Gemische davon oder synthetisches R1234ze(E) mit geringem Treibhausgaspotenzial (vgl. [64]). Die Investitionskosten variieren je nach Grösse, Aufbau und Temperaturbereich, wobei eine Faustregel 1 Mio. CHF pro MW beträgt [63], dabei weisen die spezifischen Investitionskosten nach Bild 2.25 einen deutlichen Skaleneffekt auf.

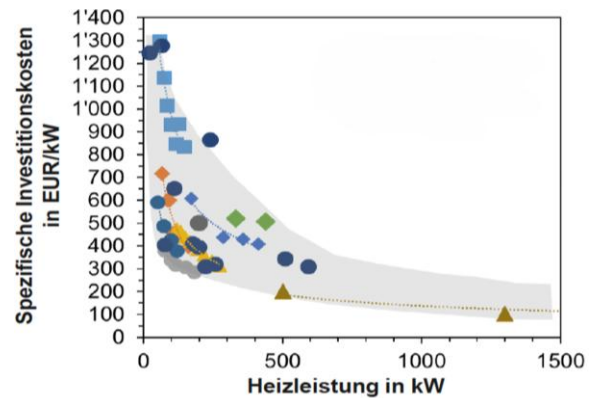


Bild 2.25 Investitionskosten industrieller Wärmepumpen in Funktion der Heizleistung [63].

### 2.5.2.3.2 Wärmequellen für Wärmepumpen

Für die Wärmeversorgung von thermischen Netzen mit Wärmepumpen kommen folgende Wärmequellen infrage:

**Umgebungsluft:** Dezentrale Wärmepumpen werden oft mit Umgebungsluft als Wärmequelle ausgeführt, da diese Anwendung nahezu überall möglich und die Erschliessung günstig ist. Umgebungsluft weist jedoch in der kalten Jahreszeit bei maximalem Heizbedarf gleichzeitig die niedrigste Temperatur auf, was die Leistungszahlen im Winter begrenzt. Aus diesem Grund kommt auch die Kombination einer Wärmepumpe mit einem zweiten Wärmeerzeuger infrage. Daneben kann die Effizienz von Luft-Wärmepumpen durch Vorwärmung der Luft zum Beispiel in Erdregistern erhöht werden. Für thermische Netze stehen bis anhin jedoch Gewässer, Abwärme und Erdwärmesonden als Wärmequellen im Vordergrund. Daher stehen bis anhin in der Schweiz für thermische Netze eher Gewässer, Abwärme und Erdwärmesonden als Wärmequellen im Vordergrund, da diese Quellen eine höhere Dichte und dadurch weniger Platzbedarf und einen besseren Wirkungsgrad aufweisen.

**Oberflächennahe Geothermie:** Das Erdreich weist ab rund 10 m Tiefe eine über das ganze Jahr nahezu konstante Temperatur von rund 11°C auf, die in weiterer Tiefe um rund 1 K pro 30 m zunimmt. Zur Nutzung des Erdreichs kommen in der Regel mit Sole betriebene Erdwärmesonden zum Einsatz, welche den Frostschutz gewährleistet. In der Schweiz betragen die Bohrtiefen meist zwischen 100 m und 300 m und die Quelltemperaturen in günstigen Fällen 10°C bis 15°C, was im Winter höhere Leistungszahlen als Umgebungsluft ermöglicht. Der langfristig nachhaltige Wärmeentzug aus einer Erdwärmesonde ist von zahlreichen Faktoren wie Bohrtiefe, Gesteinsschicht, Länge der Sonde und Abstand zwischen den Sonden abhängig. Um den Effekt der winterlichen Abkühlung teilweise zu kompensieren, werden Erdsonden im Sommer oft zur passiven Gebäudekühlung genutzt, was auch als freie Kühlung oder Free-Cooling (auch Geocooling/Geo-Cooling) bezeichnet wird. Das Erdreich kann so regeneriert und

das Sondenfeld als Saisonspeicher genutzt werden. Bei typischen Sondentemperaturen ist im Sommer eine Gebäudekühlung mit aktiven Bauteilen ohne Klimatisierung möglich. Daneben kommt auch der Einsatz von hybriden Solarsystemen mit gekühlten Fotovoltaikanlagen infrage, deren Abwärme im Sommer zur Regeneration der Sonden genutzt wird. Eine weitere Anwendung bieten unverglaste Solarkollektoren, die im Sommer nachts zur Gebäudekühlung genutzt werden und tagsüber sommerliche Überschusswärme an das Sondenfeld abführen. Neben Erdwärmesonden kommen auch Erdkollektoren in Tiefen von rund 1.5 Metern und andere Wärmeübertrager in oberen Schichten infrage. Da diese jedoch grosse Flächen benötigen und niedrigere Temperaturen als Erdwärmesonden erzielen, haben sie nur eine geringe Bedeutung.

**Gewässer:** Vom Temperaturniveau her interessant ist die Nutzung der Wärme von Grundwasser sowie von Seen und Flüssen. Während für Grundwasser ein Entnahme- und ein Schluckbrunnen erforderlich sind, genügen zur Nutzung von Seewasser zwei Leitungen. Grundwassernutzung kann auch als Sonderfall der Geothermie betrachtet werden und wird deshalb unter Geothermie weiter beschrieben. Da viele Städte und Ortschaften an natürlichen Gewässern liegen, bieten Seen und Flüsse das grösste Potenzial für Wärmepumpen. Für die Nutzung natürlicher Gewässer sind jedoch Auflagen betreffend Gewässer- und Naturschutz einzuhalten. Zudem darf das Wasser nach einem Richtwert vom Bundesamt für Umwelt nur um maximal 3 K abgekühlt werden. Seewasser weist im Winter bei Tiefen ab 10 Meter jedoch bereits typische Temperaturen von über 5°C auf, in 20 Metern sind es über 10°C bis teilweise 15°C, sodass mit Ausschöpfung der Temperaturabsenkung um 3 K hohe Leistungszahlen erzielt werden können. Da die Wassertemperaturen zudem auch im Sommer ab 20 Metern meistens unter 18°C bleiben, kann Seewasser im Sommer auch zur Gebäudekühlung genutzt werden. Die Auswirkungen auf die Temperatur der Gewässer bleiben dabei sehr gering, wobei der geringfügig kühlende Trend im Fall thermischer Netze der unerwünschten Erwärmung als Folge des Klimawandels entgegenwirkt. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass speziell Fliessgewässer immer wärmer werden, eine Wärmeentnahme kann hier einen ökologisch positiven Effekt haben, gleichzeitig ist eine Wärmeabfuhr in Flüsse in den Sommermonaten zunehmend nicht gestattet, weshalb sie sich als Quelle für Kältenetze immer weniger eignen, vor allem in den Monaten mit dem höchsten Kühlbedarf.

Während die Gewässer aus thermodynamischer Sicht geeignete Wärmequellen für Wärmepumpen sind, wird die Nutzung von See- und Flusswasser seit einigen Jahren durch die zunehmende Verbreitung der Quagga-Dreikantmuschel in schweizerischen Gewässern erschwert. Diese invasive Muschelart wurde 2014 oder 2015 zum ersten Mal im Rhein in Basel nachgewiesen und sie hat sich seit da in zahlreichen Gewässern der Schweiz angesiedelt [65]. Die Muschel setzt sich an Bauwerken und Booten fest und kann Rohre, Wärmeübertrager und Siebe verstopfen und dadurch einen

hohen Unterhaltsaufwand zur Nutzung von See- und Flusswasser verursachen.

**Abgaskondensation:** Der Wirkungsgrad von Holzkesel kann durch Kühlung der Abgase unter den Taupunkt und Nutzung der Kondensationswärme des im Abgas enthaltenen Wasserdampfs deutlich erhöht werden. Der Gewinn ist dabei abhängig vom Wassergehalt des Brennstoffs, dem Luftüberschuss der Verbrennung und der Temperatur nach der Kondensation. Bei 6 Vol.-% O<sub>2</sub> im Abgas und 40% Wassergehalt des Holzes beträgt der maximal erzielbare Wirkungsgradgewinn bei einer Kondensationstemperatur von 50°C rund 14%, bei einer Temperatur von 30°C sogar rund 24% [41]. Wenn die Rücklauftemperatur eines thermischen Netzes für eine effiziente Abgaskondensation zu hoch ist, kann die Kondensationswärme durch Einbindung einer Wärmepumpe nutzbar gemacht werden. Dies wird auch als **aktive Abgaskondensation** bezeichnet. Eine Ausführung kann auf unterschiedliche Arten mittels Kompressions- oder Absorptionswärmepumpe erfolgen.

**Abwassereinleitung:** Das Abwasser von Haushalten, öffentlichen Einrichtungen sowie der Industrie weist mit 20°C bis 25°C deutlich höhere Temperaturen auf als das mit 8°C bis 12°C zugeführte Trinkwasser [66]. Diese im Abwasser enthaltene Abwärme kann auf verschiedene Arten zurückgewonnen werden. Einerseits ist eine Rekuperation zur Erwärmung des zugeführten Frischwassers beim Verbraucher möglich. Entsprechende Einrichtungen sind zum Beispiel in Form von Duschwannen mit eingebautem Wärmeübertrager verfügbar, wobei das unverdünnte Abwasser mit Temperaturen von meist über 30°C abgekühlt wird. Da die Betriebszeiten dieser Einrichtungen in Wohnbauten jedoch kurz sind, kommt als Alternative auch eine Wärmerückgewinnung aus dem gemischt anfallenden Abwasser von mehreren Verbrauchern infrage. Bei Temperaturen von 20°C bis 25°C ist diese Abwärme eine geeignete Quelle für Wärmepumpen. Solche Anwendungen können durch Wärmeübertrager von einzelnen Gebäuden erfolgen, wobei dies aus wirtschaftlichen Gründen nur für grössere Einheiten ab etwa 150 kW infrage kommt.

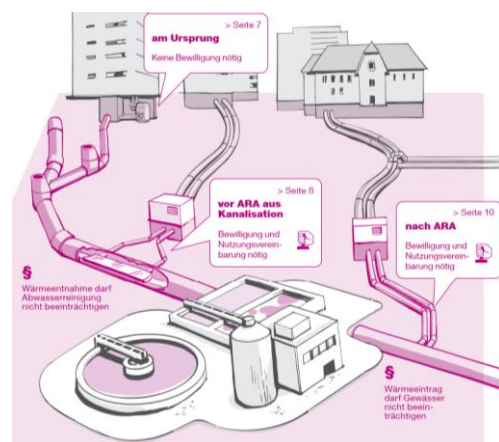


Bild 2.26 Übersicht zur Abwasser-Energie-Nutzung AEN aus Heizen und Kühlen mit Abwasser und Oberflächenwasser Planungshilfe 2025 [66].

Bei Kanalisationen mit mindestens 10 Liter pro Sekunde Tagesabflussminimum, was etwa 5000 Einwohnern entspricht, kommt auch die Nutzung aus Abwasserkanälen infrage. Das Bild 2.26 zeigt einen entsprechenden Wärmeübertrager in der Kanalisation. Alternativ kann auch ein separater Schacht mit Wärmeentnahme installiert werden.

Während dezentrale Anwendungen den Bedarf einzelner Gebäude reduzieren, kommt eine Wärmerückgewinnung aus dem Abwasserkanal auch zur Versorgung von thermischen Netzen infrage. Dabei ist zu beachten, dass das Wärmepotenzial aus dem Abwasserkanal durch eine allfällige dezentrale Rekuperation vermindert wird, weshalb eine Koordination erforderlich ist sowie entsprechende Bewilligungen und Nutzungsvereinbarungen notwendig sind.

**Abwasserreinigungsanlagen (ARA):** Eine zentrale Nutzung von Wärme aus dem Abwasser bietet sich bei Kläranlagen an. Besonders interessant ist dabei die Nutzung des geklärten Wassers im Auslauf einer ARA (Bild 2.26). Bei typischen Wassertemperaturen im Winter von über 8°C ist in der Regel eine Abkühlung um mindestens 4 K zur Nutzung in einer Wärmepumpe möglich. Wenn daneben das in der ARA anfallende Klärgas in einem BHKW genutzt wird, kann dessen Abwärme zusätzlich zur Nutzung im thermischen Netz eingesetzt werden.

### 2.5.2.3.3 Einsatz von Wärmepumpen in thermischen Netzen

Zum Einsatz von Wärmepumpen in thermischen Netzen kommen zahlreiche Varianten infrage, die wie folgt unterschieden werden können:

- zentrale und dezentrale Wärmepumpen
- Netztemperatur hoch, mittel und tief
- Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger oder als Zusatzheizung.

Die wichtigsten Anwendungsbeispiele sind in Bild 2.27 Bild 2.32 kurz beschrieben.

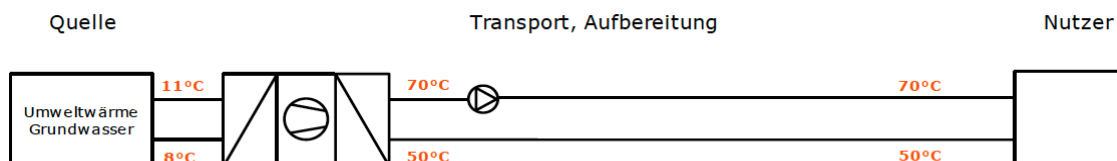


Bild 2.27 Fernwärmenetz mit 70°C und zentraler Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger [67].

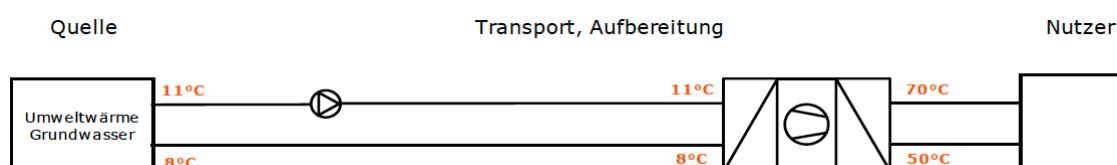


Bild 2.28 Niedertemperaturnetz mit dezentralen Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger [67].

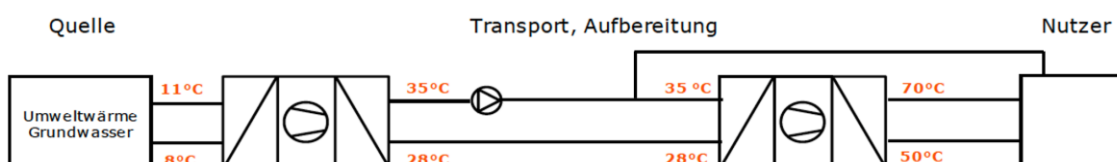


Bild 2.29 Hybride Anordnung mit zentraler Wärmepumpe zur Bereitstellung von Raumwärme bis 35°C und dezentralen Wärmepumpen zur Anhebung für Warmwasser bis 70°C [67].

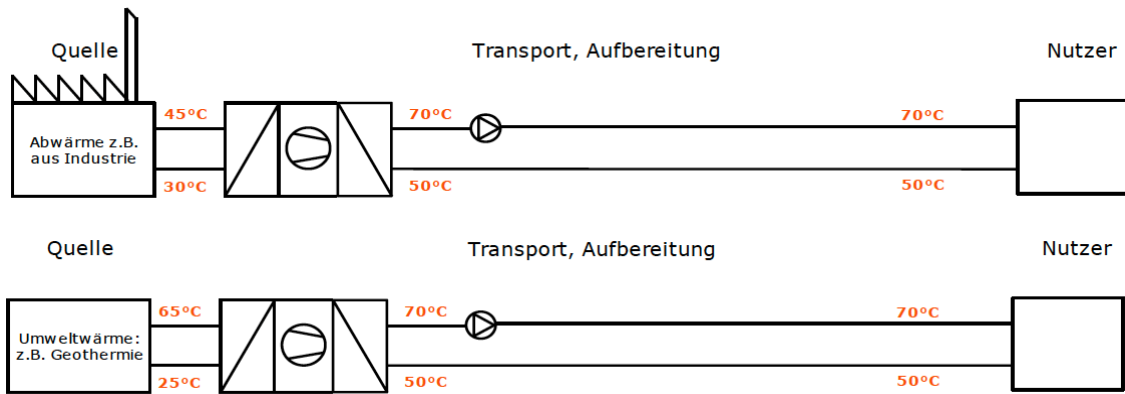


Bild 2.30 Temperaturerhöhung mit zentraler Wärmepumpe zur Nutzung von Abwärme (oben) oder Umweltwärme (unten, z.B. tiefe Geothermie oder Solarthermie) [67].

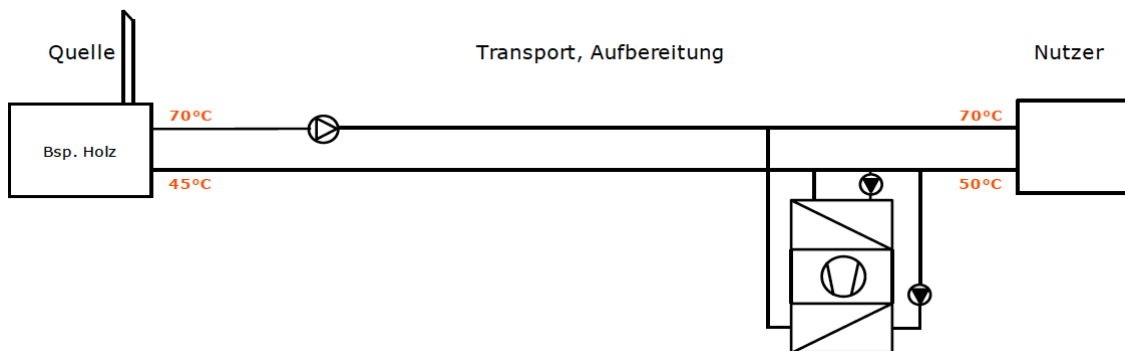


Bild 2.31 Kapazitätserhöhung mit dezentraler Wärmepumpe zur Absenkung der Rücklauftemperatur. Dies bewirkt eine Vergrößerung der Temperaturspreizung und damit eine Kapazitätserhöhung. Im Falle eines Holzheizwerks können damit auch die Effizienz und Kapazität durch Abgaskondensation im Heizwerk erhöht werden [67].

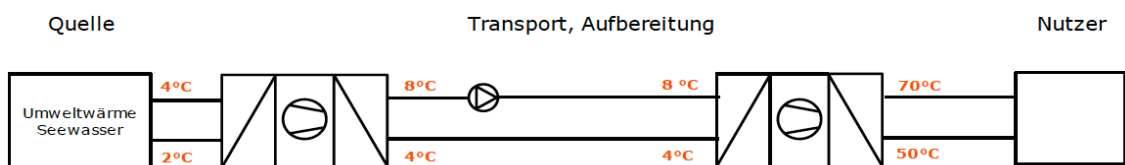


Bild 2.32 Frostschutz durch Anhebung der Netztemperatur mittels zentraler Wärmepumpe. Dies ermöglicht bei Bedarf eine direkte Kühlung ohne Frostgefahr (im Bild nicht eingezeichnet) und gleichzeitig die Versorgung dezentraler Wärmepumpen für Heizzwecke [67].

### 2.5.2.4 Solarthermie

Die Solarthermie nutzt die Sonnenstrahlung, die bei hochstehender Sonne und wolkenlosem Himmel zur Mittagszeit rund 1000 Watt pro Quadratmeter auf eine horizontale Fläche beträgt. Eine Bestrahlung mit 1000 W/m<sup>2</sup> dient auch als Referenzwert zur Beschreibung der Leistung von Solaranlagen. Für diese Standard-Testbedingungen (Standard Test Conditions STC) gelten zudem eine Temperatur von 25°C sowie ein Strahlungsspektrum, das einer 1.5-fachen Durchstrahlung der Atmosphäre entspricht.

Im Jahresmittel wird in der Schweiz ein effektiver Strahlungswert von rund 125 W/m<sup>2</sup> erreicht. Dies entspricht einem Achtel des STC-Wertes und auch einem Achtel des an einem wolkenlosen Mittag anfallenden Strahlung im Schweizer Mittelland. Die mittlere Strahlung auf einen horizontalen Kollektor entspricht damit 1/8 x 24 h oder 3 Vollbetriebsstunden pro Tag bei STC mit 1000 W/m<sup>2</sup> Bestrahlung. Pro Jahr ergibt dies 1/8 x 8760 h/a oder 1100 Vollbetriebsstunden mit 1000 W/m<sup>2</sup> Bestrahlung pro Jahr, was 1095 kWh pro Quadratmeter und Jahr entspricht.

Da Europa nördlich des nördlichen Wendekreises liegt, ist der Winkel zwischen der Sonne und der Erdoberfläche auch am längsten Tag und bei höchstem Sonnenstand am Mittag immer deutlich kleiner als 90°, wobei die Sonne dann im Süden steht. Aus diesem Grund erreichen fest installierte Kollektoren bei einer Neigung von rund 42° nach Süden den höchsten Jahresertrag. Da für Solaranlagen jedoch der Ertrag im Winterhalbjahr in der Regel wichtiger ist und die Sonne dann in flachem Winkel auf die Erdoberfläche trifft, wird mit einer Neigung von rund 60° nach Süden der maximale Winterertrag erzielt. Diese Anordnung kann durch eine entsprechende Ausrichtung eines Schrägdachs oder durch Aufständigung auf einem Flachdach erzielt werden. Der Einfluss der Ausrichtung auf den Solarertrag ist in Bild 2.10 für das Beispiel einer PV-Anlage dargestellt. Dieses zeigt, dass auch eine Anbringung an einer vertikalen Südwand interessant ist, da deren Ertrag während der kürzesten Wochen im Winter beinahe den Wert von 60° geneigten Kollektoren erzielt. Auf Flachdächern kommt aus Kostengründen oft auch eine hälftige Ausrichtung nach Osten und Westen mit flacher Neigung zum Einsatz. Diese Anordnung erzielt einen tageszeitlich ausgeglicheneren Ertrag, allerdings ist der Winterertrag gering.

Weil der Solarertrag nur tagsüber anfällt, werden thermische Solaranlagen für Anwendungen im Gebäude in der Regel mit einem Wärmespeicher ergänzt.

Weil ein Teil der Strahlung reflektiert wird (was optische Verluste zur Folge hat) und der Kollektor zudem mit Anstieg der Temperatur zunehmende thermische Verluste an die Umgebung aufweist, erreichen Solaranlagen zur Warmwasserbereitung typische Wirkungsgrade

um 60 %. Dies ist in Bild 2.33 am Beispiel der Kollektorkennlinie eines Flachkollektors (FK), der bei einer Umgebungstemperatur von 5°C und einer Bestrahlung mit 1000 W/m<sup>2</sup> betrieben wird, dargestellt. Bei reduzierter Strahlung sinken die ohne Durchströmung erzielte Stagnationstemperatur sowie der Wirkungsgrad.

Der über ein Jahr bewertete Systemnutzungsgrad umfasst zusätzliche Verluste durch Speicherung und Systemeinbindung und erreicht typische Werte um 50 %, sofern die Anlage auf einen solaren Deckungsgrad von rund 50 % ausgelegt wird, wie Bild 2.34 zeigt. Für solche Anlagen kann im schweizerischen Mittelland ein Ertrag um 550 kWh pro Jahr und Quadratmeter Absorberfläche erzielt werden. Vakuumröhrenkollektoren (VKR) erzielen dank der sehr guten Wärmedämmung höhere Temperaturen und Wirkungsgrade und damit auch höhere Erträge pro Quadratmeter Absorberfläche als Flachkollektoren, diese sind wegen der aufwendigeren Bauart jedoch auch teurer. Es gibt aber auch vakuumierte Flachkollektoren, mit denen ebenfalls hohe Ertragswerte und Temperaturen erreicht werden können. Als Beispiel sei hier die Anwendung in einem Pilotprojekt bei SIG in Genf zu erwähnen, bei dem die primäre Rücklauftemperatur des Netzes angehoben wird. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anlage eine gute thermische Stabilität mit einem solaren Gesamtwirkungsgrad von 45 % in den ersten drei Betriebsjahren bei einer mittleren Betriebstemperatur von über 80°C aufrechterhalten hat. Im gleichen Zeitraum schwankte der spezifische Ertrag zwischen 660 bis 740 kWh pro Jahr und Quadratmeter Absorberfläche ([68]).

In Wohnbauten werden Solaranlagen oft so ausgelegt, dass die Warmwasserbereitung während rund drei bis vier Sommermonaten ganz oder teilweise gedeckt werden kann. Wie das Beispiel in Bild 2.34 zeigt, genügen dafür Kollektorflächen mit Flachkollektoren von 1 m<sup>2</sup> bis 1.5 m<sup>2</sup> pro Person. Da der Ertrag in den Wintermonaten damit auf unter 25% des Bedarfs fällt, wird eine Zusatzheizung benötigt und über das Jahr ein solarer Deckungsgrad für Warmwasser von rund 50% bis maximal 60% erreicht.

Durch Vergrößerung der Kollektorfläche kann zwar der Deckungsgrad erhöht werden. Damit steigen aber die Verluste als Folge der höheren Temperaturen und der im Sommer nicht nutzbaren Überschusswärme, weshalb der Systemnutzungsgrad und der Solarertrag pro Quadratmeter Kollektorfläche sinken. Im Gegensatz dazu werden höhere Systemnutzungsgrade und Erträge von bis zu 700 kWh pro Quadratmeter und Jahr erzielt, wenn Solarwärme nur zur Vorwärmung mit einem Deckungsgrad von 5% bis 30% eingesetzt wird, wie aus Bild 2.36 hervorgeht. Auch zur Einbindung in thermische Netze ist Solarthermie deshalb nur dann wirtschaftlich, wenn sie zur Vorwärmung oder zur Deckung des sommerlichen Warmwasserbedarfs eingesetzt wird.

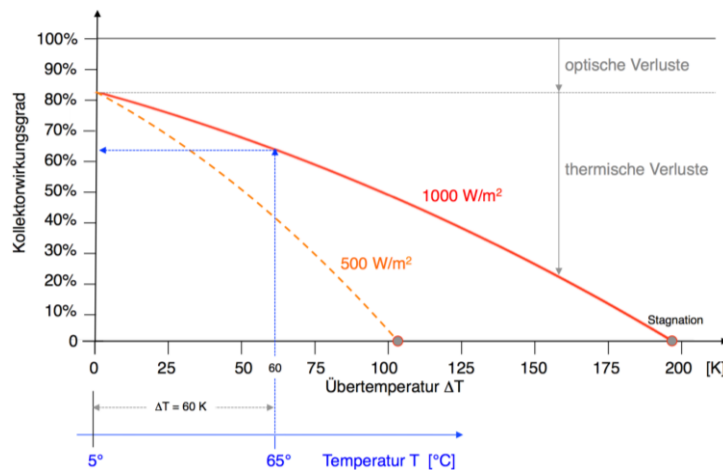


Bild 2.33 Kollektorwirkungsgrad in Funktion der Übertemperatur (= Kollektorkennlinie) eines verglasten Flachkollektors. Übertemperatur = Differenz zwischen Kollektortemperatur und Umgebungstemperatur.

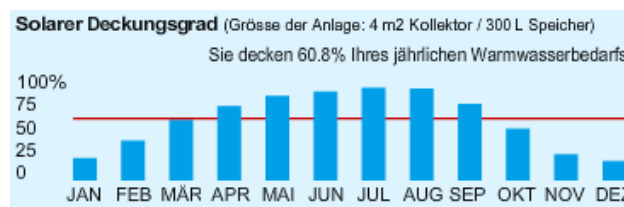


Bild 2.34 Monatlicher solarer Deckungsgrad zur Bereitstellung von Warmwasser mit einer auf den Sommerbedarf ausgelegten Solaranlage für einen Haushalt mit 4 Personen und 4 m² Kollektorfläche.

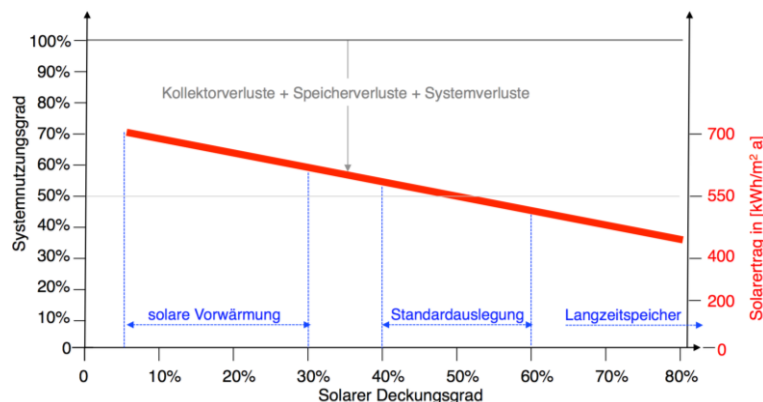


Bild 2.35 Systemnutzungsgrad (links) und Solarertrag (rechts) in Funktion des solareren Deckungsgrades.

Während für solare Vorwärmung eine Kurzzeitspeicherung genügt, ist zur Erhöhung des solareren Deckungsgrades eine Vergrößerung der Wärmespeicherkapazität erforderlich, was etwa mit Erdwärmesonden möglich ist. Damit kommen zum Beispiel folgende Konzepte für solar unterstützte thermische Netze infrage:

1. **Solar unterstützte thermische Netze mit Kurzzeitspeicher:** Bei diesem Konzept wird die Solarwärme als Vorwärmung eingesetzt, was einen hohen Wirkungsgrad ermöglicht, während Wärmeüberschüsse in einem Kurzzeitspeicher gespeichert werden. Weil Solarstrahlung und Raumwärmebedarf saisonal gegenläufig sind, kann in heutigen Netzen damit nur ein Anteil des Jahresbedarfs von etwa 5% bis 12% gedeckt werden. Da der Anteil des Warmwassers am Jahresbedarf jedoch von

rund 10% für Altbauten auf gegen 50% für Neubauten steigen wird, wird künftig auch mit Kurzzeitspeichern ein Anteil der Solarwärme von gegen 25% möglich.

2. Die Einbindung von **Solarwärme mit saisonalen Wärmespeichern** ist auf verschiedene Arten möglich. Einerseits kann die Solarwärme auf tiefem Temperaturniveau und hohem Wirkungsgrad genutzt werden, um zum Beispiel Erdsondenfelder im Sommer zu regenerieren. Die Wärmeversorgung erfolgt dann mittels Wärmepumpen, die dank hoher Quellentemperatur hohe Jahresarbeitszahlen erreichen. Da zur Regeneration der Gesteinsschichten niedrige Temperaturen ausreichen, kommen für solche Anwendungen auch unverglaste Kollektoren zum Einsatz. Diese erzielen nur bei niedrigen Über-

temperaturen hohe Wirkungsgrade und die Stagnationstemperatur ist wegen der hohen Wärmeverluste deutlich tiefer als in einem verglasten Kollektor. Unverglaste Kollektoren können auch zur passiven Kühlung während der Nacht genutzt werden. Daneben sind auch Langzeitwärmespeicher auf höherem Temperaturniveau möglich, wobei die Versorgung der Verbraucher aus dem Speicher mit Nacherwärmung zum Beispiel über einen Holzkessel auf die notwendige Vorlauftemperatur erfolgt. Damit sind solare Deckungsgrade von bis zu über 40% möglich.

3. Nebst Solaranlagen beim Heizwerk ist für künftige Netze auch die Einbindung **dezentraler solarthermischer Anlagen** möglich, die zum Beispiel durch Rücklaufanhebung des Netzes dienen.

Solarthermische Anlagen weisen hohe spezifische Investitionskosten auf, die mit der Anlagengrösse sinken. Erst in grösseren Einheiten wie für Mehrfamilienhäuser werden Wärmegestehungskosten von unter 20 Rp./kWh und bei günstigen Bedingungen solche von bis zu unter 10 Rp./kWh erzielt, wie Bild 2.36 anhand von Daten aus dem Jahr 2002 zeigt [69]. Aus dem Jahr 2020 liegen Erhebungen zur Integration von Solarthermieanlagen in mit Holzheizungen versorgten Fernwärmenetzen vor [70]. Nach diesen Abschätzungen können in günstigen Fällen wie in Bild 2.37 gezeigt Wärmegestehungskosten von 8 Rp./kWh erreicht werden, während sie in einem Beispiel rund 15 Rp./kWh betragen. Für günstige Anwendungen wird von solaren Deckungsgraden von weniger als 10% ausgegangen und vorausgesetzt, dass die Wärmespeicher der Holzkessel genutzt werden können und für die Solarwärme kein zusätzlicher Speicher erforderlich ist. Ab einem Deckungsgrad von rund 12% und mit Einsatz zusätzlicher Wärmespeicher besteht die Möglichkeit, den Sommerbetrieb fast vollständig mit Solarwärme zu decken und die Holzkessel im Sommer ausser Betrieb zu nehmen.

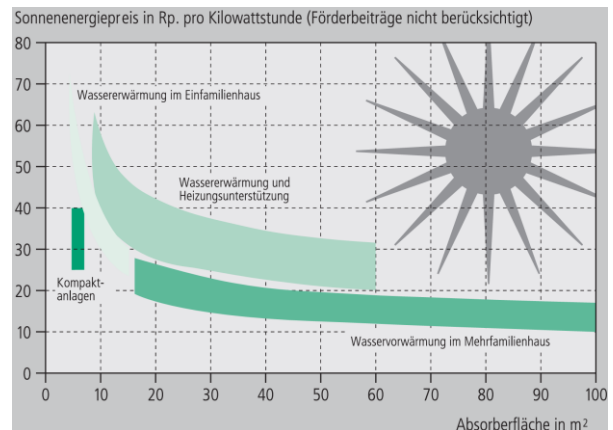


Bild 2.36 Wärmegestehungskosten für solare Warmwasser- und Heizungsunterstützung [69].

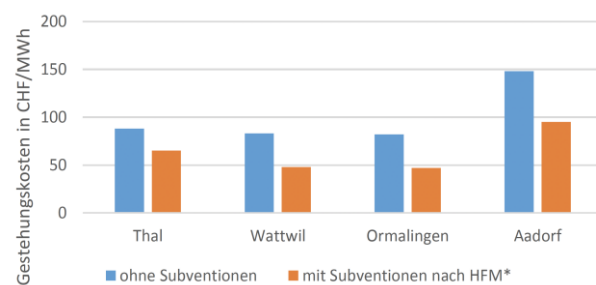


Bild 2.37 Günstigste Wärmegestehungskosten von in vier Fernwärmenetzen integrierte Solarthermieanlagen ohne und mit Subventionen. \*HFM = harmonisiertes Fördermodell der Kantone [70].

### 2.5.2.5 Geothermie

Bei der Geothermie wird zwischen untiefer, mitteltiefer und tiefer Geothermie unterschieden. Das Bild 2.38 zeigt einen Überblick zu unterschiedlichen Geothermie-Systemen und der Marktentwicklung in der Schweiz.

Welche Temperatur mit Geothermie gewonnen werden kann hängt von der Tiefe ab. Das ist je nach geologischen Gegebenheiten unterschiedlich, zum Beispiel in vulkanischen Gebieten wärmer. In der Schweiz bleibt die Temperatur ab ungefähr 10 Meter unter der Oberfläche mit ca. 10 Grad Celsius konstant. Dann steigt die Temperatur mit einem durchschnittlichen Temperaturgradient von 3 Grad pro 100 Meter Tiefe. In 1'000 Meter Tiefe ist es das ganze Jahr ca. 40 Grad Celsius warm, in 2'000 Meter Tiefe ca. 70 Grad, in 3'000 Meter Tiefe ca. 100 Grad, in 4'000 Meter Tiefe ca. 130 Grad, in 5'000 Meter Tiefe ca. 160 Grad. Geologische Unterschiede hat es auch in der Schweiz, in gewissen Regionen ist der Temperaturgradient etwas höher. Je nach Temperatur bietet die Geothermie verschiedene Anwendungsmöglichkeiten zum Wärmen, zum Kühlen, zur Energiespeicherung und zur Stromproduktion. Je nach Nutzung kann mit Wärmepumpen die Anfangstemperatur erhöht beziehungsweise gekühlt werden (vgl. [71]).

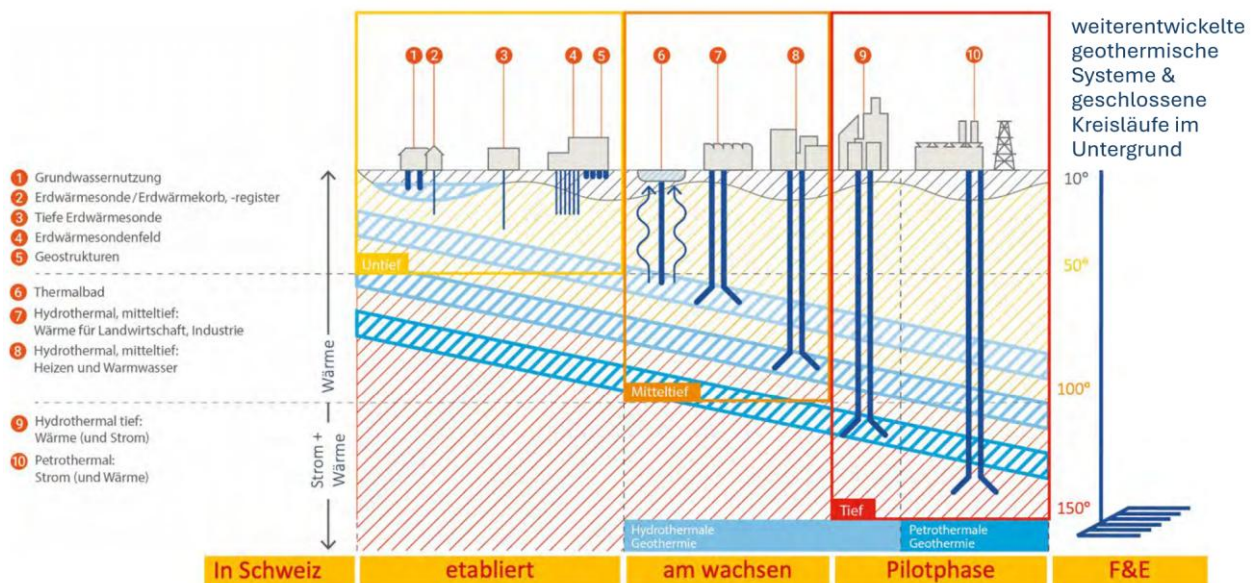


Bild 2.38 Überblick zu Geothermie-Systeme und Marktentwicklung in der Schweiz [71].

Oberflächennahe oder untiefe Geothermie reicht in der Schweiz in der Regel bis zu Tiefen von etwa 400 Metern und wird meist als Wärmequelle für Wärmepumpen genutzt. Zur oberflächennahen Geothermie zählen Erdwärmesonden, Erdkollektoren sowie Grund- und Grubenwasser.

Für thermische Netze ist die Grundwassernutzung ab etwa 100 kW interessant sowie die Erschliessung grösserer Felder mit Erdwärmesonden. Das Bild 2.39 zeigt die Anordnung für ein Feld mit 10 Erdwärmesonden zur Beheizung eines Mehrfamilienhauses. Am Standort der Wärmezentrale für ein thermisches Netz kommen auch deutlich grössere Erdsondenfelder zum Einsatz.

Da die Temperatur des Erdreichs durch die Wärmeentnahme sinkt und sich die Sonden gegenseitig beeinflussen, muss das instationäre Verhalten der Wärmeentnahme bei der Auslegung von Erdsondenfeldern berücksichtigt werden. Um die Temperaturabnahme zu verringern, werden Erdsondenfelder heute meistens im Sommer zur passiven Gebäudekühlung (freie Kühlung) genutzt und dadurch gleichzeitig regeneriert. Zusätzlich kann auch Abwärme oder Wärme aus Solaranlagen zur Regeneration genutzt werden.

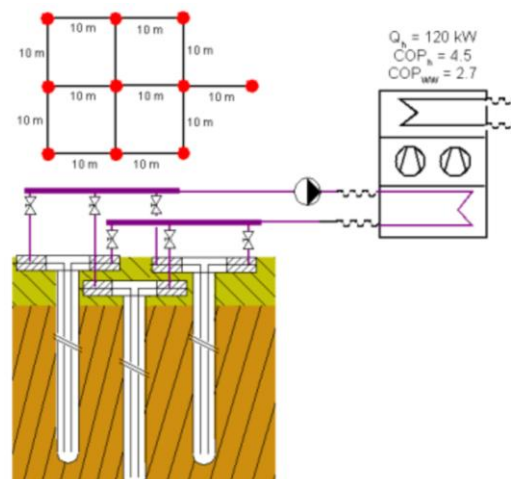


Bild 2.39 Beispiel eines Feldes mit 10 Erdwärmesonden von 210 m Bohrtiefe zur Versorgung eines Mehrfamilienhauses mit 120 kW Heizleistung mit COP von 4.5 für Raumwärme und 2.7 für Warmwasser [72].

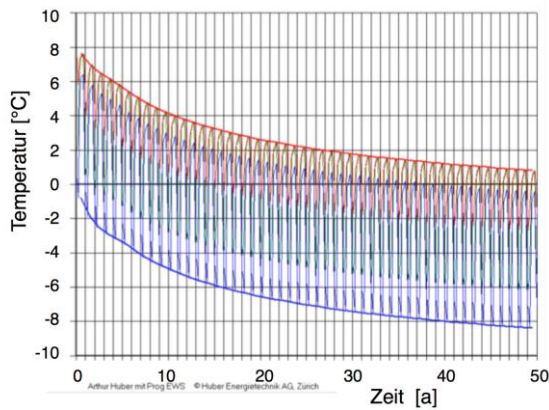


Bild 2.40 Temperaturabnahme eines Erdsondenfeldes während 50 Jahren [72]. Dargestellt sind das Monatsmaximum (rot) und -minimum (blau) der Eintrittstemperatur in die Erdsonde.

Für die Auslegung von Erdsondenfeldern stehen Berechnungsprogramme zum instationären Verhalten zur Verfügung, die auch die Einbindung von Gebäudekühlung und solarer Regeneration erlauben [73]. Das Bild 2.40 zeigt ein Berechnungsbeispiel zum Temperaturverlauf eines Erdsondenfeldes während 50 Jahren.

Erdkollektoren kommen aufgrund des grossen Flächenbedarfs von rund 25 m<sup>2</sup> pro kW meistens nur für Leistungen bis zu 10 kW für Einzelgebäude zum Einsatz und sind entsprechend selten.

Bei der Tiefengeothermie wird zwischen dem Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR-Verfahren), den tiefen Erdwärmesonden, der hydrothermalen und der petrothermalen Geothermie unterschieden (siehe Bild 2.38). Beim HDR-Verfahren wird die Erdwärme im trockenen, heissen Gestein genutzt, indem über eine Injektionsbohrung Wasser in Gesteinsschichten in einigen Kilometern Tiefe gepresst wird. Dabei werden vorhandene Risse aufgeweitet und teilweise neue geschaffen. Durch dieses System zirkuliert das Wasser, das sich aufheizt und anschliessend über eine zweite Bohrung (Produktionsbohrung) an die Oberfläche gefördert wird. Das Wasser kann zur Stromerzeugung in ORC-Anlagen oder Dampfturbinen genutzt werden. Die Wärme einer Geothermiebohrung kann auch direkt für thermische Netze genutzt werden, die Nutzung zur Stromerzeugung mit Abwärmenutzung für thermische Netze ist jedoch meist vorteilhaft. Das HDR-Verfahren ist allerdings nur in Regionen interessant, in denen der Temperaturanstieg im Gestein Werte von 50 K pro Kilometer Tiefe übersteigt.

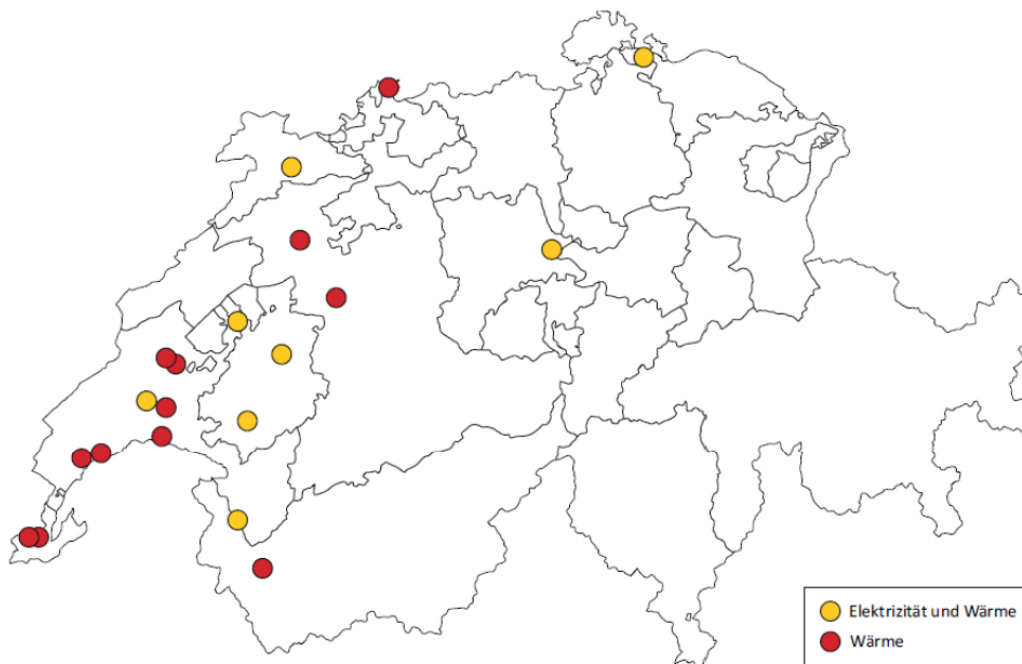


Bild 2.41 Mitteltiefe und tiefe Geothermieprojekte in der Schweiz [74].

Da die bisherigen Versuche zur Nutzung der mitteltiefen und tiefen Geothermie in der Schweiz unerwartete Beben ausgelöst oder die Ertragserwartungen nicht erfüllt haben, hat diese Technologie in der Schweiz bis anhin eine untergeordnete Bedeutung gespielt. Gemäss Bild 2.41 ist der Markt der mitteltiefen und tiefen Geothermie mit mehr als 20 Projekten aktuell sehr dynamisch ([57], [74], [75]). Die Herausforderungen sind weniger technischer Natur – die entsprechenden Technologien sind vorhanden. Eine Herausforderung ist die noch geringe Erfahrung der verschiedenen An-

spruchsgruppen aus Behörden und Wirtschaft. Eine weitere Herausforderung liegt in den geringen Kenntnissen im mitteltiefen und tiefen Untergrund der Schweiz. Hierzulande gab es wenig Erkundungen für Öl und Gas und kaum Minenaktivitäten. Die aktuellen Erkundungen sind somit eine Investition für die Energieversorgung der kommenden Generationen und jedes Projekt liefert neue Erkenntnisse.

## 2.5.3 Wärme-Kraft-Kopplung

### 2.5.3.1 Prinzip

Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) ist der in der Schweiz gebräuchliche Begriff zur Beschreibung eines Prozesses oder einer Anlage, welche gleichzeitig mechanische Energie und nutzbare Wärme erzeugt. In Deutschland und Österreich wird dieses Prinzip als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet. Die mechanische Energie wird meistens über einen Generator in Elektrizität umgewandelt. Wird die Wärme in thermischen Netzen genutzt, wird die Anlage auch als Fernheizwerk oder Heizkraftwerk bezeichnet (HKW). Bei Verwendung von Holz als Energieträger wird die Anlage somit als Holzheizkraftwerk (HHKW) bezeichnet, welches im Gegensatz zu einem Holzheizwerk zusätzlich Strom erzeugt.

Der Begriff Heizkraftwerk wird meistens für Anlagen mit Dampfprozessen verwendet, die aus wirtschaftlichen Gründen zudem meist Leistungen über 1 MW<sub>el</sub> aufweisen. Dieses Prinzip wird in Kapitel 2.5.3.3 beschrieben. Wenn zur Krafterzeugung ein Verbrennungsmotor zum Einsatz kommt, wird die Anlage auch als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet. Das Bild 2.42 zeigt das Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung am Beispiel eines BHKW, in dem die mechanische Energie einen Generator zur Stromerzeugung antreibt und die Motorenabwärme aus Kühlwasser und Abgas genutzt wird.

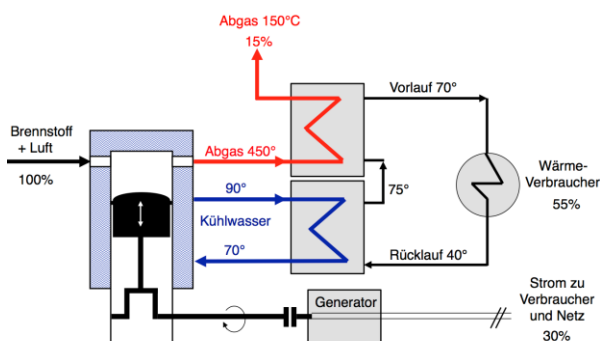


Bild 2.42 Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung am Beispiel eines Verbrennungsmotors mit Nutzung der Motorenabwärme. Dieser Anlagentyp wird auch als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet. Die Prozentwerte beschreiben den Energiefluss für ein typisches BHKW ausgehend vom Heizwert des zugeführten Brennstoffs.

### 2.5.3.2 Blockheizkraftwerke (BHKW)

Bis vor rund 20 Jahren kamen in der Schweiz mit Erdgas oder seltener mit flüssigen fossilen Treibstoffen betriebene BHKW zum Einsatz, um eine im Vergleich zu Heizkesseln hochwertigere Nutzung zu erzielen. Während fossile Treibstoffe für diese Anwendung nicht mehr infrage kommen, besteht heute ein Interesse an der Nutzung erneuerbarer Gase in BHKW. Im Vordergrund stehen der Einsatz von Holzgas in einem Holzvergaser-BHKW oder von Biogas aus Vergärungsanlagen in einem Biogas-BHKW. Das Bild 2.43 zeigt das

Beispiel eines Holzvergaser-BHKW in einem Holzverarbeitenden Betrieb.

Gasmotoren erreichen typische Wirkungsgrade von rund 25% für Leistungen unter 50 kW<sub>el</sub> oder über 35% ab etwa 100 kW<sub>el</sub> und bis zu mehr als 40% ab rund 1 MW<sub>el</sub>. Beim Betrieb mit Holzgas ist für den Gesamtwirkungsgrad noch der Wirkungsgrad der Holzvergaserung von rund 75% zu berücksichtigen, womit für Holzgas-BHKW typische Netto-Wirkungsgrade von 20% bis gegen 30% resultieren.

Da WKK-Anlagen hohe Investitionskosten aufweisen, wird aus wirtschaftlichen Gründen meist ein Betrieb mit mindestens 6000 bis 8000 Vollbetriebsstunden pro Jahr angestrebt, weshalb ein BHKW meist durch einen Spitzenlastkessel ergänzt wird. Bei Einsatz eines einzelnen BHKW erfolgt die Auslegung zum Beispiel auf rund 30% des maximalen Wärmeleistungsbedarfs, wie Bild 2.44 zeigt. Daneben kommen auch Anlagen mit mehreren BHKW zur Anwendung.



Bild 2.43 Beispiel eines Holzvergaser-BHKW mit 100 kW Nutzwärmeleistung und 50 kW elektrischer Leistung, Baujahr 2022 und Standort Kanton Zürich [55]. Oben: Holzvergaseranlage mit zwei-stufiger Vergasung (Lipro) Unten: Gasmotor mit Drei-Wege-Katalysator.

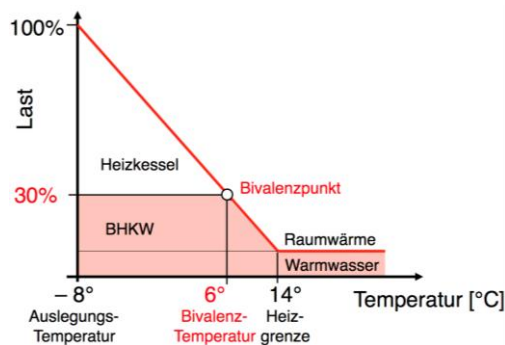


Bild 2.44 Typische Auslegung eines BHKW zur Erzielung einer hohen Vollbetriebsstundenzahl.

### 2.5.3.3 Dampfturbinen und Dampfmotoren (Rankine-Prozess)

Dampfturbinen und Dampfmotoren verwenden Wasser als Prozessmedium in einem geschlossenen Kreisprozess. Der in Bild 2.45 am Beispiel einer Dampfturbine beschriebene Prozess wird als Rankine-Prozess bezeichnet und umfasst eine Druckerhöhung des Wassers, die Erwärmung bis zum Siedepunkt, die Verdampfung gefolgt von einer Überhitzung des Dampfes, die Druckentspannung und schliesslich die Kondensation des Wassers. Um die Kondensationswärme zu nutzen, muss die Kondensationstemperatur deutlich höher als die Umgebungstemperatur sein.

Wenn Dampfturbinen zur Wärme-Kraft-Kopplung eingesetzt werden, können sie als Gegendruckturbine mit Nutzung der gesamten Abwärme oder als Entnahmekondensationsturbine mit regelbarer Abwärmenutzung ausgeführt werden. Für Holzheizkraftwerke kommen meistens Entnahmekondensationsturbinen zum Einsatz. Thermische Kraftwerke ohne Abwärmenutzung verfügen dagegen über eine Kondensationsturbine und führen die gesamte Wärme an die Umgebung ab.

Die elektrischen Netto-Wirkungsgrade von Dampfturbinen im Leistungsbereich typischer WKK-Anlagen mit Holz oder von KVA (1 MW<sub>el</sub> bis 50 MW<sub>el</sub>) betragen zwischen rund 15% und 25%. Wegen der niedrigen elektrischen Wirkungsgrade wird in dieser Leistungsgrösse in der Regel ein wärmegeführter Betrieb vorausgesetzt. In der Schweiz wird dies durch die in Kapitel 2.6.5.9 für Dampfkraftanlagen beschriebene Anforderung der Energieförderungsverordnung gefordert. Für die in der Schweiz infrage kommende Anlagengrösse setzt dies einen weitgehend wärmegeführten Betrieb voraus.

Im Leistungsbereich von Kohlekraftwerken mit bis zu über 1 GW<sub>el</sub> sind dagegen elektrische Wirkungsgrade bis über 45% möglich, während (bisher) meist keine oder nur eine teilweise Wärmenutzung erfolgt.

Obwohl auch Dampfkraftanlagen bei Teillast betrieben werden können, ist ihr Regelbereich kleiner als bei reinen Wärmeerzeugern und Laständerungen sind nur sehr träge möglich. Daneben sinkt der Wirkungsgrad bei Teillast unterhalb einer gewissen Leistung deutlich

ab. Soweit Dampfanlagen als Wärmeerzeuger in Fernheizwerken zum Einsatz kommen, werden sie deshalb meist auf die Grundlast ausgelegt und durch Spitzenlastkessel ergänzt.

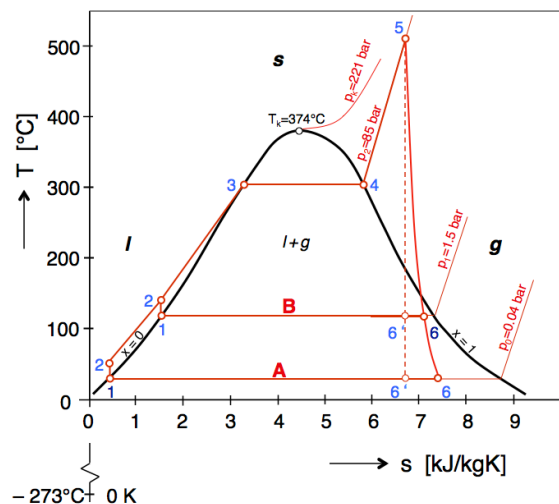
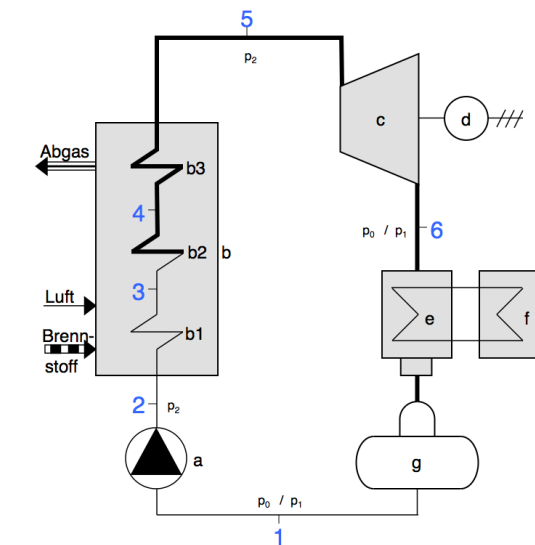


Bild 2.45 Aufbau eines Dampfturbinen-Kraftwerks (oben) und Rankine-Prozess im T,s-Diagramm (unten). 1–2 Druckerhöhung des Wassers durch die Speisepumpe a, 2–3 Erwärmung des Wassers bis zur Verdampfungstemperatur im Kessel b, 3–4 Verdampfung bei konstanter Temperatur im Verdampferteil, 4–5 Überhitzung des Dampfes im Überhitzer, 5–6' Arbeitsabgabe durch reibungsfreie Expansion des Dampfes in der Turbine c, 5–6 Arbeitsabgabe mit nicht-idealer Turbine, 6–1 Kondensation des Dampfes im Kondensator e mit Wärmeabgabe an Kühler f und Rückführung in Sammelbehälter g.

Für kleine Leistungen (bis 1 MW<sub>el</sub>) kommen anstelle von Dampfturbinen auch Dampfmotoren in Form von Kolbenmaschinen und Schraubenmotoren zum Einsatz. Aufgrund der geringen Anlagengrösse sind die elektrischen Netto-Wirkungsgrade konventioneller Maschinen allerdings auf rund 10% bis 15% begrenzt. Eine Tech-

nologie mit Flüssigsalzspeicher, Hochdruckdampferzeuger und Hochdruckdampfmotor (130 bar) verspricht dagegen bereits ab 125 kW<sub>el</sub> elektrische Wirkungsgrade von über 20%, befindet sich aber noch im Stadium der Entwicklung und Demonstration [76].

### 2.5.3.4 Organic Rankine Cycle (ORC)

Nebst mit Wasser betriebenen Dampfturbinen kommen für kleine und mittlere Leistungen (bis etwa 2 MW<sub>el</sub>) auch Prozesse mit bei tieferen Temperaturen siedenden organischen Medien zum Einsatz. Der Prozess wird dann als Organic Rankine Cycle (ORC) bezeichnet. Für Anwendungen mit Energieholz bietet dieses Prinzip den Vorteil, dass zwischen dem Wärmeerzeuger und dem Verdampfer ein mit einem Wärmeträgeröl betriebener Sekundärkreislauf möglich ist, wodurch der Anlagenbetrieb vereinfacht wird. Da ORC-Anlagen jedoch einen hohen Hilfsenergieverbrauch aufweisen, sind die elektrischen Netto-Wirkungsgrade meist auf rund 10% bis 15% begrenzt. Zudem sind die Abgastemperaturen nach dem Thermoölkessel höher als bei Wasserkesseln, weshalb in der Regel eine zusätzliche Wärmeauskopplung aus dem heissen Abgas erfolgt.

### 2.5.3.5 WKK und Wärmepumpe

Während kleinere Wärmepumpen in der Regel elektrisch angetrieben werden, kommt für grössere Leistungen auch der mechanische Antrieb mit einem Verbrennungsmotor infrage. Zur Wärmenutzung steht

dann Abwärme auf hohem und mittlerem Temperaturniveau des Motors zur Verfügung, während die mechanische Leistung zum Antrieb der Wärmepumpe dient, die Nutzwärme auf einem tieferen Temperaturniveau produziert. Entsprechende Anwendungen sind zum Beispiel dann von Interesse, wenn die Abwärme eines Biogas-BHKW nicht zur Wärmeversorgung ausreicht oder wenn ein gleichzeitiger Kältebedarf gegeben ist, der durch die kalte Seite der Wärmepumpe gedeckt werden kann. Entsprechende Anwendungen sind aber bis anhin nicht bekannt.

### 2.5.3.6 Systemvergleich

Wie Bild 2.46 zeigt, decken die Technologien zur Wärme-Kraft-Kopplung einen Bereich von wenigen kW bis über 1 GW elektrischer Leistung ab. Die erzielbaren Netto-Wirkungsgrade umfassen eine Bandbreite von weniger als 10% bis zu 60%. Bei den etablierten Verfahren der Dampfkrafttechnik zeigen die elektrischen Wirkungsgrade eine ausgeprägte Skalenabhängigkeit von weniger als 10% für Leistungen ab 10 kW bis zu rund 45% im Leistungsbereich thermischer Kraftwerke. Holzvergaser-BHKW erzielen höhere Wirkungsgrade im kleinen und mittleren Leistungsbereich. Dies gilt im Grundsatz zwar auch für Stirlingmotoren, die jedoch trotz zahlreicher Entwicklungen der letzten Jahrzehnte keine kommerzielle Bedeutung haben.

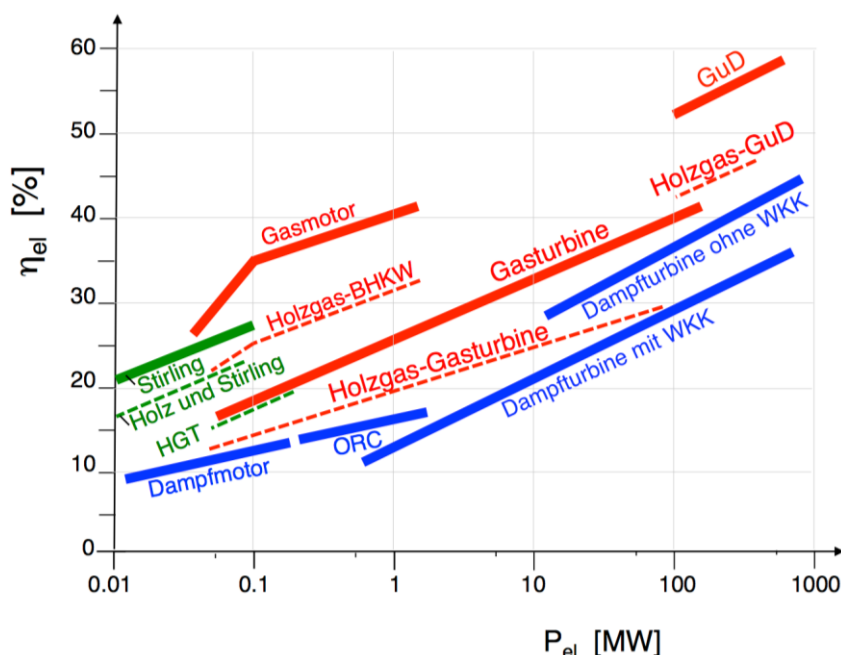


Bild 2.46 Netto-Wirkungsgrade verschiedener Techniken zur Stromerzeugung in Funktion der elektrischen Leistung. GuD = Gas- und Dampf-Kombikraftwerk, HGT = Heissgasturbine mit Holzverbrennung. Für die Einbindung in thermische Netze kommen in der Schweiz folgende Techniken zum Einsatz:

- Dampfturbine mit WKK in Anlagen zur Nutzung von Siedlungsabfall (KVA) oder von Energieholz (HHKW)
- ORC-Anlagen zur Nutzung von Energieholz
- Holzgas-BHKW zur Nutzung von Energieholz
- Gasmotoren zur Nutzung von Biogas in BHKW, wo-bei der Umwandlungswirkungsgrad der Vergärung in der Grafik nicht berücksichtigt ist.

## 2.6 Thermische Energiespeicher

Die grundsätzliche Aufgabe eines thermischen Energiespeichers (TES) ist die zeitliche Entkopplung von Wärmeproduktion und Wärmelast. Dadurch lassen sich Lastspitzen und Lastabsenkungen kompensieren, Produktionsanlagen kleiner dimensionieren und je nach Speichervolumen kann auf (fossile) Spitzenlastkessel verzichtet werden. Je nach Speichervolumen lassen sich auch saisonale Schwankungen ausgleichen und können zur elektrischen Versorgungssicherheit beitragen (Sektorkopplung), wenn sie zum Beispiel als saisonale Speicher den Einsatz von Wärmepumpen im Winter reduzieren oder deren Effizienz steigern und somit elektrische Energie im Winterhalbjahr einsparen [77]. Zudem kann bei Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen der Anlagenbetrieb flexibler gestaltet und die Wärme- und Stromproduktion optimiert werden.

Der Einsatz thermischer Energiespeicher bietet deshalb ein erhebliches Potenzial zur Optimierung des Anlagenbetriebs in Bezug auf Kosten und Primärenergieverbrauch sowie zur Integration von erneuerbaren Energieträgern.

Die folgenden Ausführungen befassen sich mit den Grundlagen zu thermischen Energiespeichern, Speicherdesign, Auslegung, Anwendung und Integration in thermischen Netzen. Als Grundlagenliteratur können folgende Quellen empfohlen werden: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration [78] und Wärmespeicher [79].

### 2.6.1 Eigenschaften und Begriffe

Die thermischen Energiespeicher können aufgrund ihrer Einsatzgebiete und Eigenschaften wie folgt unterschieden werden:

- **Temperaturniveau:** Die Temperatur, bei der ein TES geladen und entladen wird, legt seinen Einsatzbereich massgeblich fest. Zur Anwendung in thermischen Netzen liegt der Temperaturbereich meist zwischen 25°C bis etwa 90°C, wobei die Speichertemperatur sich in der Regel an der Vorlauftemperatur des Netzes orientiert. Für industrielle Prozesse, wie die Bereitstellung von Dampf werden Temperaturen von über 100°C (bis 250°C) benötigt. Hochtemperaturanwendungen von Speichern bei Temperaturen von über 300°C bis 600°C kommen zum Beispiel in solarthermischen Kraftwerken zur Anwendung. Kältespeicher für Kühlung und Klimatisierung werden in einem Temperaturbereich von 5°C bis 18°C benötigt. Für industrielle Kühlprozesse mit Anwendungen um 0°C wie etwa in der Lebensmittelindustrie sind vielfach Eisspeicher im Einsatz, während in industriellen Kältenetzen Speicher bis zu -20°C üblich sind.
- **Standort:** Der Standort der Energiespeicherung im System ist ein wichtiges Kriterium zur Charakterisierung eines thermischen Energiespeichers. Dabei werden **zentrale** und **dezentrale** Energiespeicher unterschieden. In der Regel wird ein am Standort der Wärmeerzeugung aufgestellter Energiespeicher als zentral bezeichnet, während Wärmespeicher in der Peripherie oder bei den Kunden als dezentral bezeichnet werden. Die meisten thermischen Energiespeicher sind **stationär** installiert. Dies gilt für zentrale oder dezentrale Wärmespeicher. Es gibt aber auch **mobile** Wärmespeicher. Dabei spielt vor allem die Energiespeicherdichte eine grosse Rolle und es werden meist Latentwärmespeicher oder thermochemische Speichersysteme mobil eingesetzt, allerdings erst in wenigen Pilotanlagen.
- **Speicherkapazität:** Speicher mit hoher Speicherkapazität bzw. Energiedichte sind wichtig, wenn das Platzangebot gering ist oder grosse Energiemengen gespeichert werden müssen.
- **Speicherdauer:** Ein wesentliches Merkmal für alle Energiespeicher ist die Dauer des zu überbrückenden Zeitraums zwischen Laden und Entladen. **Kurzzeitspeicher** werden im Bereich von Stunden bis wenige Tage eingesetzt, während **Langzeitspeicher** Energie über Wochen bis mehrere Monate in einem Jahr speichern können. In der Regel müssen Langzeitspeicher grosse Mengen thermischer Energie bei geringer Lade- und Entladeleistung speichern können, während Kurzzeitspeicher hohe Lade- und Entladeleistung und geringere gespeicherte Wärmemengen aufweisen.
- **Speicherkapazität:** Als Speicherkapazität wird die Energiemenge bezeichnet, die ein Speicher unter bestimmten Prozessbedingungen zur Verfügung stellen kann. Aus Sicht der Exergie hängt die Speicherkapazität entscheidend von der Umgebungstemperatur ab. Wird die Speicherkapazität von der technisch nutzbaren Seite bewertet, so hängt diese von der tatsächlichen Temperaturveränderung im Speicher ab. Wird lediglich ein Speichermedium erwärmt, ist die Kapazität direkt proportional zum Temperaturunterschied. Findet bei der Temperaturerhöhung des Mediums ein Phasenwechsel statt, trägt die Schmelz- oder Verdampfungsenthalpie ebenfalls zur Kapazitätserhöhung bei. Die Speicherkapazität wird absolut in J oder kWh sowie als spezifische Grösse zum Beispiel volumetrisch in kWh/m<sup>3</sup> angegeben. Für eine ökonomische Betrachtung muss die Speicherkapazität auf die Kosten des Speichers bezogen werden.
- **Lade- und Entladeleistung:** Die Lade- und Entladeleistung beschreibt, wie schnell ein Speicher eine bestimmte Wärmeleistung aufnehmen und wieder abgeben kann. Sie ist entscheidend für eine optimale Anpassung eines Speichers an das durch die Anwendung vorgegebene Lade- und Entladeprofil. Die Leistung hängt im Gegensatz zur Kapazität nicht von dem physikalischen Speichereffekt ab. Vielmehr spielt neben dem Temperaturunterschied der Massenstrom oder der Wärmeübergang eine

entscheidende Rolle. Die Dimensionierung der zu- und abführenden Leitungsquerschnitte bzw. die technische Ausführung beispielsweise eines Wärmeübertragers oder Reaktors mit spezifischen Übertragungsflächen, ist dabei von Bedeutung. Die Leistung eines Speichers wird oft unter Auslegebedingungen als Nennleistung angegeben. Die tatsächlichen Leistungen hängen dann von den aktuellen Prozessparametern ab. Für eine wirtschaftliche Beurteilung eines Speichers muss auch hier die Leistung auf die Kosten bezogen werden. Eine ebenfalls übliche Darstellung, speziell für Latent-Wärmespeicher, ist der Bezug der Kapazität (in kWh) relativ zur Leistung (in kW). Dieser Quotient ergibt eine Zeit in Stunden, die zum Beladen oder Entladen benötigt wird und die für Beladen und Entladen unterschiedlich sein kann.

- **Nutzungsgrad:** Der Nutzungsgrad beschreibt das Verhältnis der nutzbaren Energie beim Entladen zur vom Speicher beim Laden aufgenommenen Energie. Die Nutzwärme ist wegen der Speicher- verluste geringer als die zugeführte Wärme. Ebenso nimmt die gespeicherte Exergie mit sinkender Temperatur ab. Der Nutzungsgrad ist dimensionslos und wird in der Regel in Prozent angegeben. Zum Begriff Nutzungsgrad siehe auch Kapitel 2.4.1.

- **Speicherzyklen:** Der Zeitraum zwischen dem Belade- und Entladevorgang wird als Speicherdauer (auch Speicherperiode) bezeichnet (Bild 2.47). Die Summe aus Lade-, Speicher- und Entladedauer, und unter Umständen noch einer Stillstanddauer im entladenen Zustand, bildet einen Speicherzyklus. Wie Speicherzyklen in der Praxis aussehen, hängt von den zeitlichen Lastprofilen ab. Auch die Speicherkapazität und die möglichen Lade- und Entladeleistung spielen dabei eine Rolle. Mathematisch wäre ein Speicherzyklus, wenn einmal die gesamte Speicherkapazität entnommen wurde, unabhängig davon, ob dies ein einem oder mehreren Entladevorgängen passiert. Bei thermischen Energiespeichern liegen diese Zeiten in einem Bereich von Minuten bis zu mehreren Monaten. Finden innerhalb eines Speicherzyklus irreversible Prozesse statt, welche die Speicherkapazität beeinträchtigen, so ist die Anzahl der ausführbaren Speicherzyklen begrenzt. Die Stabilität thermischer Energiespeicher wird an ihrer Degradation über eine bestimmte Zyklenzahl bestimmt. Werden mit einem Speichersystem viele Zyklen pro Jahr gefahren, wirkt sich das positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus. Das System setzt dann viel Energie um, stellt oft die gespeicherte Energie bereit und wird damit schneller amortisiert.

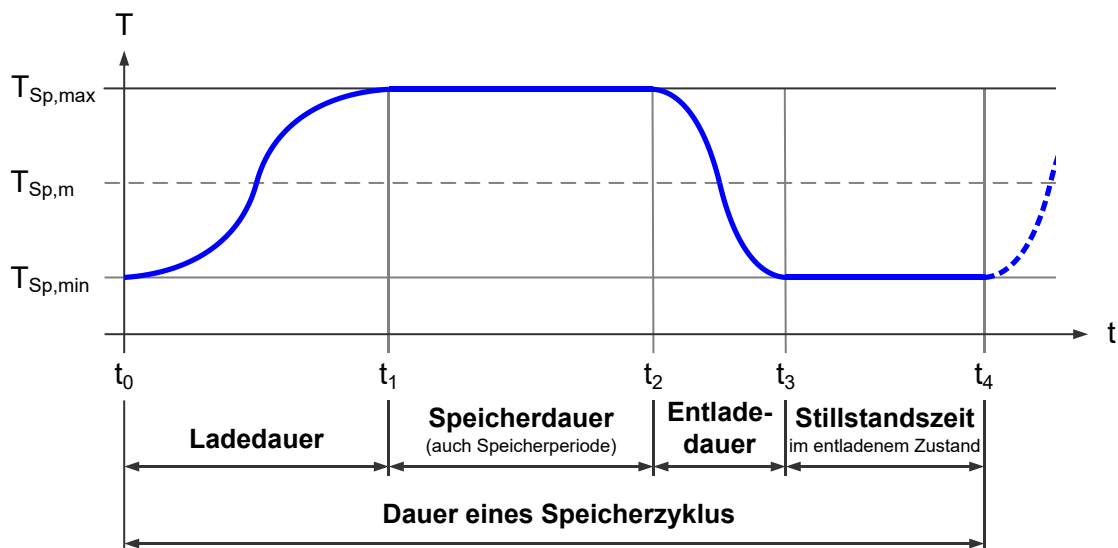


Bild 2.47 Speichertemperatur als Funktion der Zeit und Begriffe zur Beschreibung eines Speicherzyklus.

## 2.6.2 Speichertechnologien

Thermische Energie kann in verschiedenen Speichertechnologien gespeichert werden. Für die Anwendung in thermischen Netzen kommt hauptsächlich die sensible Wärmespeicherung zur Anwendung, da diese Technologie am weitesten entwickelt und relativ kostengünstig ist. Vollständigkeitshalber werden auch die latente und die thermochemische Wärmespeicherung eingeführt, welche bei der Anwendung in thermischen Netzen bis anhin eher eine untergeordnete Rolle spielen. Je nach Anwendungsfall und vielfach als dezentrale Ergänzung am Standort des Kunden, könnten in Zukunft latente oder thermochemische Wärmespeicher immer mehr eine Rolle spielen.

### 2.6.2.1 Sensible Wärmespeicherung

Bei der sensiblen Speicherung wird ein Speichermedium ohne Phasenwechsel erwärmt oder abgekühlt. Die Menge der gespeicherten Energie ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des Stoffes in  $\text{kJ}/(\text{kg K})$ . In den meisten Fällen wird Wasser eingesetzt, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und zudem umweltverträglich, kostengünstig, thermisch stabil und praktisch überall verfügbar ist.

Der Einsatzbereich von drucklosen Speichern mit Wasser liegt im Temperaturbereich von  $0^\circ\text{C}$  bis  $100^\circ\text{C}$ . Über  $100^\circ\text{C}$  stehen Speicher mit Wasser als Medium unter Druck, dabei steigt der Dampfdruck stark an, was hohe Druckanforderungen an die Behälter stellt und zu entsprechend höheren Investitions- und Betriebskosten führt (Bild 2.48). Typisch für druckbehaltete Speicher sind Temperaturen bis etwa  $200^\circ\text{C}$  für Prozesswärme.



Bild 2.48 Druckbehalteter Wärmespeicher Dolder der IWB. Installiert sind 9 Behälter mit einem Gesamtvolumen von  $1260 \text{ m}^3$  bei Auslegebedingungen von  $150^\circ\text{C}$  und 16 bar [80].

Wärmespeicher mit Thermoöl können aufgrund der höheren Siedetemperatur auch bei höheren Temperaturen, je nach Thermoöl von bis etwa  $400^\circ\text{C}$ , drucklos betrieben werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Thermoöl ist erheblich niedriger und die Wärmekapazität beträgt etwa die Hälfte im Vergleich zu Wasser. Durch die Kombination von Thermoöl mit einer Gesteinsschichtung hoher Wärmekapazität kann die Speicherkapazität

erhöht und die Menge an relativ teurem Thermoöl reduziert werden. Diese Kombination ist mit einem Kies/Wasser-Speicher für Niedertemperaturanwendungen vergleichbar. Für höhere Temperaturen kommen auch Feststoffspeicher wie Beton oder spezielle Keramiken infrage.

Für Temperaturen unter  $0^\circ\text{C}$  sind Wasser-Ethanol- oder Wasser-Glykol-Mischungen im Einsatz.

Bei sensiblen Energiespeichern ist in der Regel die Temperaturdifferenz zwischen dem Speichermedium und der Umwelt relativ gross, daher spielt die Wärmedämmung eine wichtige Rolle zur Reduktion der Wärmeverluste während der Speicherdauer.

In Abhängigkeit vom Temperaturhub und den anwendungsspezifischen Be- und Entladetemperaturen weisen latente und thermochemische Wärmespeicher in der Regel höhere Energiedichten auf als sensible Wärmespeicher. Für die sinnvolle Anwendung von Latent-Wärmespeicher liegt der maximale Temperaturhub bei rund 20 K (z.B. Eisspeicher). Bei einem Temperaturhub von über 50 K weist ein sensibler Wärmespeicher mit Wasser bereits eine höhere Energiedichte auf. Zudem verfügen sensible Wärmespeicher über eine ausgereifte Technik und sind deutlich kostengünstiger.

### 2.6.2.2 Latente Wärmespeicherung

Bei Latent-Wärmespeichern wird zusätzlich zur sensiblen Wärme die für einen Phasenwechsel notwendige Energie gespeichert. In der Praxis wird üblicherweise der Phasenübergang fest-flüssig genutzt. Die Volumenänderung von über 10% ist technisch beherrschbar. Zudem ist die Phasenänderungsenthalpie ausreichend hoch.

Latentwärmespeicher spielen ihre Vorteile vor allem bei kleinen bis mittleren Temperaturhuben aus (z. B. Eisspeicher mit etwa 20 K Spreizung). Bei anorganischen Speichern wie Natriumacetat-Trihydrat gilt dies jedoch nur eingeschränkt, da auch bei grösseren Temperaturhuben der sensible Anteil wesentlich zur Speicherdichte beiträgt. So erreicht ein Speicher mit 50 K Spreizung eine Energiedichte, die deutlich über jener von Wasserspeichern liegt (Natriumacetat-Trihydrat ca.  $115 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , Wasser rund  $58 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ). Sie weisen für solche Anwendungen also eine höhere Energiedichte auf und können dank der hohen Speicherkapazität wesentlich kompakter gebaut werden. Dies macht sie insbesondere dort interessant, wo Platz eine limitierende Ressource ist. Während ihr Nutzen häufig mit kleinen Temperaturhuben in Verbindung gebracht wird (z. B. Eisspeicher), können anorganische PCMs wie Natriumacetat-Trihydrat auch bei grösseren Temperaturdifferenzen gegenüber Wasser eine höhere Energiedichte erreichen. Damit können Latentwärmespeicher auch in der Gebäudetechnik und in thermischen Netzen eine sinnvolle Option darstellen, wenn kompakte Speicherlösungen gefragt sind. Einschränkungen ergeben sich aber durch die fixe Speichertemperatur und die Hysterese beim Laden und Entladen.

Erste marktfähige Lösungen sind im Einsatz, welche in thermischen Netzen gut als dezentrale Speicherlösungen eingesetzt werden können, um direkt beim Kunden Lastspitzen zu brechen, die notwendige Anschlussleistung reduzieren und gleichzeitig Kapazitäten für weitere Anschlüsse ermöglichen (vgl. Bild 2.49 und [81]).

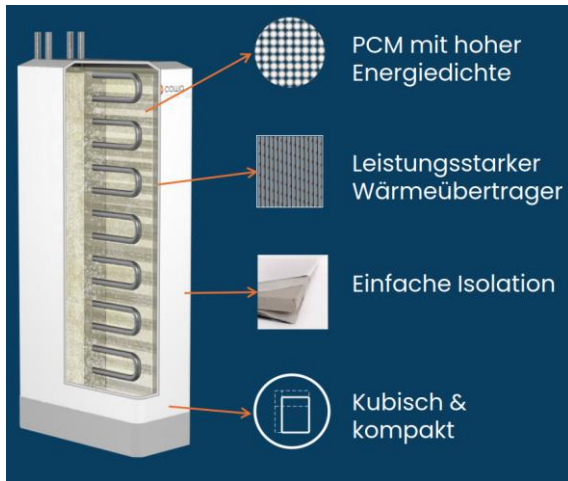


Bild 2.49 Beispiel für einen kompakten thermischen Energiespeicher basierend auf Phasenwechsel-Materialien mit hoher Energiedichte (Quelle Cowa Thermal Solutions AG [82]).

Für den Transport von thermischer Energie eignen sich sogenannte Phase Change Slurries (PCS), auch kurz Slurries (Deutsch: Schlamm) genannt. Slurries haben den Vorteil, dass Sie unabhängig vom Aggregatzustand immer pumpfähig sind. Anwendung findet dies beispielsweise bei der Klimatisierung von Gebäuden oder in Industrieanlagen.

### 2.6.2.3 Thermochemische Wärmespeicherung

Unter dem Begriff der thermochemischen Energiespeicherung sind chemisch reversible Reaktionen zu verstehen, bei denen die Reaktionsprodukte getrennt und über eine lange Zeit gespeichert werden können. Durch die Trennung treten keine Speicherverluste auf und erst bei der Entladung gibt die exotherme Reaktion die gespeicherte Energie wieder frei. Thermochemische Energiespeicher erlauben sehr hohe Energiedichten, finden derzeit aber kaum Anwendung in der Praxis, da sich die Technologie grösstenteils noch in der Grundlagenforschung befindet.

## 2.6.3 Grundlagen der Energiespeicherung

### 2.6.3.1 Speichervorgang

Thermische Energiespeicher erhöhen durch die Energiezufuhr beziehungsweise durch Zufuhr eines Energieträgers ihren Energieinhalt (Laden), speichern diesen Energieinhalt über einen bestimmten Zeitraum möglichst verlustfrei (Speichern) und geben bei Bedarf Energie beziehungsweise den Energieträger wieder ab (Entladen). Beim Entladen reduziert sich der Energieinhalt des Speichers (Bild 2.50).

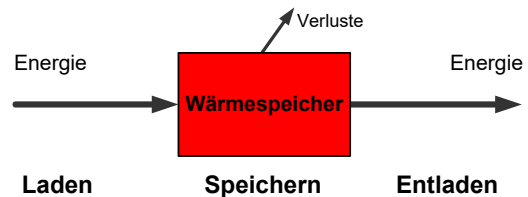


Bild 2.50 Prozess der thermischen Energiespeicherung. Laden – Speichern – Entladen.

### 2.6.3.2 Thermische Energie

Werden der Energieinhalt im Speicher beziehungsweise die darin enthaltene Wärmemenge betrachtet, so wird als sensible Wärme die Wärmefaufnahme oder -abgabe verstanden, die eine fühlbare Änderung der Temperatur zur Folge hat. Das verwendete Speichermedium wird erhitzt oder abgekühlt. Der Zusammenhang zwischen der im Speicher enthaltenen Wärmemenge  $Q$  und der Temperaturänderung  $\Delta T$  wird wie folgt beschrieben:

$$Q = m c_p \Delta T = V \rho c_p \Delta T$$

$Q$  = Energieinhalt im Speicher [kWh]

$m$  = Masse des im Speicher enthaltenen Wärmespeichermediums [kg]

$V$  = Volumen des im Speicher enthaltenen Wärmespeichermediums [kg]

$c_p$  = spez. Wärmekapazität Wärmespeichermedium [J/(kg K)]

$\Delta T$  = Temperaturänderung im Speicher [K]

Neben der Temperaturänderung  $\Delta T$  und der Masse des Speichermediums  $m$  ist die Wärmemenge  $Q$  von der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  des Speichermediums anhängig. Eine hohe spezifische Wärmekapazität ist für die Wärmespeicherung hilfreich, da für eine zu speichernde Energiemenge eine geringere Menge des Speichermediums benötigt wird und der Speicher damit kleiner ausfällt. Wasser hat von allen praktisch einsetzbaren Speichermedien mit rund 4.2 kJ/(kg K) die höchste spezifische Wärmekapazität pro Masseneinheit. Gemäss Bild 2.51 hat auf das Volumen bezogen Wasser den höchsten Wert bei den sensiblen Wärmespeichern, also den höheren Wert als Metalle oder Naturmaterialien wie Stein. Der gelegentlich diskutierte Kiesbettspeicher weist in Summe also eine geringere Wärmekapazität auf als ein reiner Wasserspeicher.

| Technik                                           | Temperatur                                      |                   | Speicherdichte pro Volumen         |                                   | Speicherdichte pro Gewicht |                      |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------|
|                                                   | unterer Wert<br>°C                              | oberer Wert<br>°C | unterer Wert<br>kWh/m <sup>3</sup> | oberer Wert<br>kWh/m <sup>3</sup> | unterer Wert<br>kWh/t      | oberer Wert<br>kWh/t |
| <b>Niedertemperatur</b>                           |                                                 |                   |                                    |                                   |                            |                      |
| Erdreich Niedertemperatur                         | 0                                               | 30                | 15                                 | 30                                | 6                          | 15                   |
| Aquifer                                           | 10                                              | 18                | 3                                  | 7                                 | 1.5                        | 3.5                  |
| Eisspeicher                                       | -5                                              | 25                | 93                                 | 125                               | 84                         | 113                  |
| <b>Nutztemperatur</b>                             |                                                 |                   |                                    |                                   |                            |                      |
| Wassertank & Erdbecken                            | 10                                              | 90                | 69                                 | 92                                | 69                         | 92                   |
| Erdbecken mit Kies                                | 20                                              | 90                | 50                                 | 60                                | 20                         | 30                   |
| Erdreich                                          | 20                                              | 80                | 30                                 | 60                                | 12                         | 30                   |
| Aquifer                                           | 20                                              | 80                | 30                                 | 50                                | 15                         | 25                   |
| <b>Forschung, Entwicklung, Spezialanwendungen</b> |                                                 |                   |                                    |                                   |                            |                      |
| PCM, < 200 °C                                     | T <sub>pc</sub> - 5 K bis T <sub>pc</sub> + 5 K |                   | 30                                 | 170                               | 22                         | 200                  |
| PCM, > 400 °C                                     | T <sub>pc</sub> - 5 K bis T <sub>pc</sub> + 5 K |                   | 140                                | 300                               | 70                         | 200                  |
| Sorption (Ab / Ad), < 200 °C                      | 10 °C bis + 200 °C                              |                   | 100                                | 870                               | 90                         | 580                  |
| Flüssigsalz (sensible Wärme)                      | 150 - 250                                       | 400 - 500         | 80                                 | 150                               | 50                         | 110                  |

Bild 2.51 Temperaturbereiche und Speicherdichten verschiedener Wärmespeichertechniken (Abbildung aus [77]). PCM = Phase Change Material; T<sub>pc</sub> = Phasenwechseltemperatur.

Die Speicherdichte der Absorptionsspeicher bezieht sich auf das Volumen der konzentrierten Lösung und der Annahme einer minimalen Verdampfungstemperatur von 10°C und einer minimalen Absorbertemperatur von 20°C. Für Adsorptionsspeicher beruht die Annahme auf dem trockenen Substrat (Zeolith, respektive Silikagel). Für alle Sorptionsprozesse wurde die Kondensationsenthalpie von Wasser, welche von der kalten (10°C) Wärmequelle zur Verfügung gestellt wird bei Entladung, in der ausgewiesenen Wärmespeicherdichte inkludiert.

Durch Kombination von Nieder- und Nutztemperaturanwendung kann der jeweilige Temperaturbereich erweitert und die erreichbare Speicherdichte entsprechend erhöht werden. So kann zum Beispiel ein Eisspeicher nach Schmelzen des Eises auch zusätzlich als sensibler Speicher genutzt werden

### 2.6.3.3 Wärmedämmung

Zur Reduktion thermischer Verluste spielt die Wärmedämmung bei sensiblen Wärmespeichern eine besonders grosse Rolle. Der Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenzen und Wärmeverlusten eines Speichers wird wie folgt beschrieben:

$$\dot{Q}_V = U \cdot A \cdot (T_{Sp} - T_U)$$

$\dot{Q}_V$  = Wärmeverlustleistung Speicher [W]

$U$  = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

$A$  = Oberfläche Speicher [m<sup>2</sup>]

$T_{Sp}$  = Speichertemperatur [K]

$T_U$  = Umgebungstemperatur [K]

Neben der Oberfläche  $A$  des Speichers, der Speichertemperatur  $T_{Sp}$  und der Umgebungstemperatur  $T_U$  ist der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  der entscheidende Kennwert der Wärmedämmung. Der  $U$ -Wert wird in W/(m<sup>2</sup> K) angegeben und beschreibt, welche Leistung pro Kelvin Temperaturdifferenz durch einen Quadratmeter Oberfläche übertragen wird.

Je nach Bauform des Speichers (Kugel, Zylinder, etc.) muss der Wärmedurchgangskoeffizient individuell berechnet werden. Für eine ebene Wand mit  $n$ -Schichten kann er wie folgt bestimmt werden:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

$U$  = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

$s$  = Schichtdicke der Dämmung [m]

$\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]

$i$  = Innen (Speicher)

$a$  = Aussen (Umgebung)

Der Wärmedurchgangskoeffizient hängt somit von der Wärmeleitfähigkeit und den Schichtdicken der Dämmmaterialien sowie von den Wärmeübergangskoeffizienten auf der Innen- und Aussenseite ab. Der Wärmeübergangskoeffizient ist keine Materialkonstante, sondern ist von der Strömungsgeschwindigkeit, der Art des Fluids, den geometrischen Verhältnissen und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

Bei üblichen **Dämmmaterialien** wie porösen Schäumen oder Faserdämmstoffen wird die Luftkonvektion durch einen kleinporigen Aufbau unterdrückt. Das Dämmmaterial selbst muss dabei grundsätzlich ein schlechter Wärmeleiter sein. Die Dämmmaterialien werden entweder als Platten oder auch als rieselfähige Flocken angeboten, wodurch sie sich einer beliebigen

Speichergeometrie optimal anpassen können. Auch biegbare Vliesdämmstoffe, wie Mineral- oder Glaswolle sind verbreitet, haben jedoch die nachteilige Neigung, Feuchtigkeit aufzunehmen und zu speichern. Handelsübliche Dämmmaterialien weisen eine Wärmeleitfähigkeit von 0.025 bis 0.07 W/(m K) auf.

Neben der Auswahl des Dämmmaterials sind in der Praxis noch **weitere Aspekte** zu beachten, um eine gute Wärmedämmung zu erreichen:

- Wasserdampfdiffusion (oder kleine Leckagen) führen zu feuchten Dämmschichten, die schlechter dämmen.
- Das Dämmmaterial kann durch Sonneneinstrahlung und durch Temperaturbelastung altern.
- Bei Plattenmaterialien können bei nachlässiger Installation, aber auch durch thermische Ausdehnung im Betrieb irreversible Luftspalte und damit Konvektion und Kamineffekte entstehen.
- Bei Flockenschüttungen kann eine Setzung des Materials stattfinden, so dass gerade im oberen Bereich mit meist höchster Temperatur ein ungeämmter luftgefüllter Raum mit hohem Wärmeverlust entsteht.
- Die Dämmung des unteren Speicherbereichs sollte nicht vernachlässigt werden, da dort bei höheren Rücklauftemperaturen und bei durchgeladenem Speicher temporär grosse Verluste auftreten können.
- Durch eine grosse Anzahl und/oder schlecht gedämmte Anschlüsse und der im Bodenbereich zur Aufstellung notwendigen Standzarge können Verluste in der Grössenordnung bis zur Hälfte der gesamten Hüllverluste der Waddämmung auftreten.
- Schliesslich ist natürliche Konvektion in den Zuleitungen vorzugsweise durch Thermosiphons oder durch den Einbau von Konvektionsbremsen auszuschliessen.

Eine besonders hohe Dämmwirkung kann durch ein Vakuum erreicht werden (analog zur doppelwandigen Thermoskanne), welches das Dämmmaterial ersetzt. Wegen der Grösse der in thermischen Netzen eingesetzten Wärmespeicher kommt diese Art der Dämmung in der Regel jedoch nicht zur Anwendung.

### 2.6.3.4 Auskühlung über die Zeit

Die Auskühlung eines sensiblen Speichers wird mit der Exponentialfunktion über folgende Gleichung beschrieben:

$$T_{SP}(t) = T_U + [T_{SP}(0) - T_U] e^{-\frac{A U}{V \rho c_p} t}$$

$T_{SP}(t)$  = Temperatur im Speicher zum Zeitpunkt  $t$  [°C]

$T_U$  = Umgebungstemperatur [°C]

$T_{SP}(0)$  = Temperatur im Speicher zum Zeitpunkt Null [°C]

$A$  = Oberfläche Speicher [m<sup>2</sup>]

$V$  = Volumen Speicher [m<sup>3</sup>]

$U$  = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]

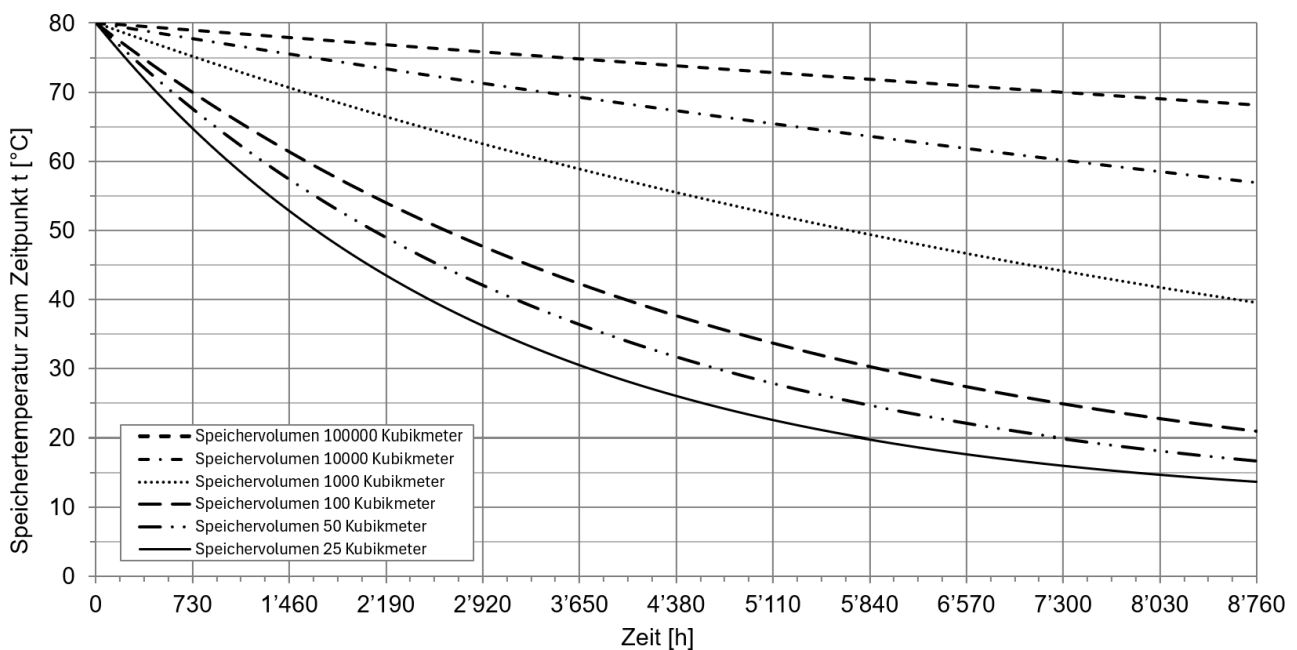
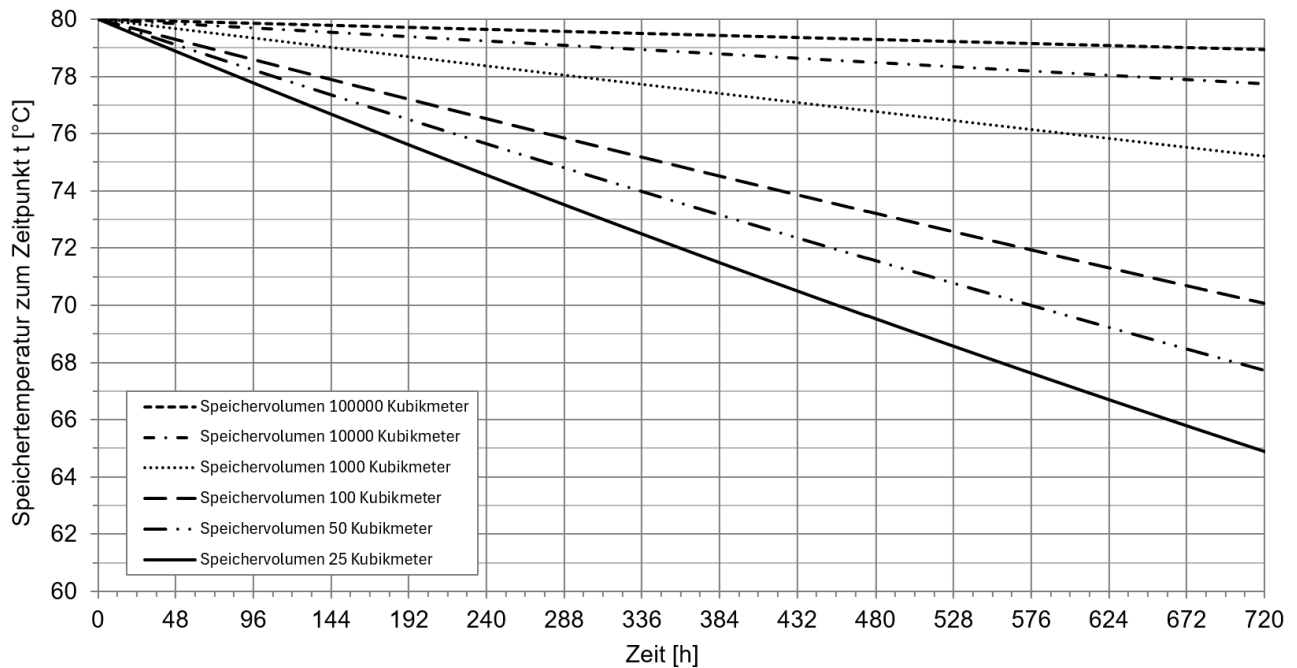
$\rho$  = Dichte Speichermedium [kg]

$c_p$  = spez. Wärmekapazität Speichermedium [J/(kg K)]

$t$  = Betrachtungsdauer [s]

Es ist ersichtlich, dass für die Auskühlung nicht nur der Wärmedurchgangskoeffizient, sondern auch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis ( $A/V$ ) des Speichers sowie die Dichte und die spezifische Wärmekapazität des Speichermediums eine wichtige Rolle spielen.

Beispielhaft in Bild 2.52 ist die Auskühlung der Speichertemperatur über die Zeit für unterschiedliche Speichervolumen dargestellt. Es handelt sich dabei jeweils um einen Zylindrischen Speicher mit einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 1.5. Die Ergebnisse zeigen, dass sich grössere Speicher weniger schnell auskühlen als kleinere, das ist vor allem auf das Oberflächen-Volumen-Verhältnis zurückzuführen. Der 100'000 m<sup>3</sup> Speicher hat um ein 16-faches besseres Oberflächen-Volumen-Verhältnis als der 25 m<sup>3</sup> Speicher. Auf der anderen Seite ist die Auskühlung über die gesamte Bandbreite der Speichervolumen am Anfang nicht so dramatisch, beispielsweise beträgt diese in den ersten 48 Stunden im schlechtesten Fall lediglich gut 1.1°C. Je weniger Speicherzyklen gefahren werden (z. B. Saisonspeicher), umso wichtiger ist aber die Grösse und das Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Wärmespeichers. In einem Jahr kühlt sich der 100'000 m<sup>3</sup> Speicher auf lediglich 68.1°C aus, während der 25 m<sup>3</sup> Speicher noch eine Temperatur von 13.6°C aufweisen würde.



| Speichervolumen in m <sup>3</sup>  | 25   | 50   | 100   | 1'000 | 10'000 | 100'000 |
|------------------------------------|------|------|-------|-------|--------|---------|
| Oberfläche in m <sup>2</sup>       | 48.2 | 76.4 | 121.4 | 563.3 | 2614.5 | 12135.5 |
| Radius in m                        | 1.38 | 1.74 | 2.20  | 4.73  | 10.20  | 21.97   |
| Höhe in m                          | 4.15 | 5.23 | 6.59  | 14.20 | 30.60  | 65.92   |
| Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V | 1.93 | 1.53 | 1.21  | 0.56  | 0.26   | 0.12    |

Bild 2.52 Auskühlung der Speichertemperatur zum Zeitpunkt t, oben für einen Zeitraum von 30 Tagen (720 Stunden) und unten für einen Zeitraum von einem Jahr (8'760 Stunden). Es handelt sich dabei jeweils um einen Zylindrischen Speicher mit einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 1.5 (siehe Tabellenwerte). Der Speicher ist bei t=0 bei einer Temperatur von 80°C durchgeladen und die mittlere Umgebungstemperatur beträgt 10°C. Der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Speicherhülle beträgt 0.2 W/(m<sup>2</sup> K).

## 2.6.4 Speicherdesign und Auslegung

Thermische Energiespeicher können in einer Vielzahl verschiedener Bauformen realisiert werden. Die Bauformen ergeben sich aus der genutzten Speichertechnologie, der Speicherdauer und den Anforderungen der jeweiligen Anwendung.

Für die in thermischen Netzen eingesetzten sensiblen Wärmespeicher hat sich die sogenannte direkte Beladung als einfachste Bauform bewährt. Dabei ist das Wärmespeichermedium gleichzeitig das Wärmeträgermedium im thermischen Netz. Der Speicher enthält chemisch gesehen nur eine Komponente, die ihre Temperatur ändert, aber nicht ihren Aggregatzustand. Vorteil der Direkt-Beladung ist die einfache Bauweise und mit Ausnahme von Be- und Entladungseinrichtungen für eine optimale Einstromung auch der Verzicht auf innere Einbauten.

Bei der indirekten Beladung wird Wärme über Wärmeübertrager an das Speichermedium abgegeben. Dieses Konzept wird dann verwendet, wenn bei der Wärmeversorgung unterschiedliche Flüssigkeiten verwendet werden (zum Beispiel Wasser-Ethanol/Wasser) und/oder unterschiedliche Systemdrücke zwischen Netz und Speicher dies erfordern. Nachteilig ist der erhöhte Exergieverlust über die Wärmeübertrager.

In der Regel sind die Speicher als geschlossenes System eingebunden, dies hat den Vorteil des Schutzes vor Korrosion, Verschmutzung und Speichermaterialverlust, da die Speicher dadurch keine stoffliche Anbindung an die Umwelt aufweisen.

### 2.6.4.1 Be- und Entladungseinrichtung

Um Wärmespeicher optimal nutzen zu können, ist insbesondere die durch Dichteunterschiede auftretende Temperaturschichtung zu erhalten, mit einer heißen Schicht in der oberen Zone und einer kalten Schicht am unteren Ende des Speichers, getrennt durch eine Trennschicht, der sogenannten Thermokline. Drei Phänomene bewirken eine Störung oder Zerstörung der Temperaturschichtung im Speicher. In der Reihenfolge ihrer möglichen negativen Auswirkungen sind dies (vgl. [83]):

- Impulsreiche Einstromung
- Mitreissende Strömung
- Wärmeleitung und Diffusion

**Impulsreiche Einstromung** führt zu Turbulenzen und infolgedessen, durch Ablenkung an der dem Eintritt gegenüberliegenden Speicherwand oder an Einbauten, zu Strömungen in vertikaler Richtung (nach oben und unten). Diese Prozesse können die Schichtung nicht nur behindern, sondern innert kurzer Zeit komplett zerstören (siehe Bild 2.53).

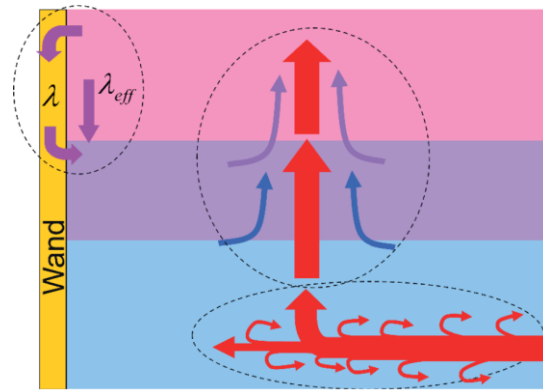


Bild 2.53 Die Temperaturschichtung störende Phänomene in Wärmespeichern [83].

Zur Beruhigung des Ein- und Austritts aus grossen Speichern haben sich horizontale (kreisförmige) Prallplatten bewährt, sogenannte Diffusoren. Dabei muss auf eine ausreichende Länge des Fließkanals geachtet werden. Für Speicher, welche in Kolbenströmung von oben nach unten beladen werden, kann durch ein Bogenrohr mit Ausströmung in den Klöpperboden oder -deckel sowie zusätzlicher Abgrenzung des Einstrombereichs mit einem Lochblech gute Resultate erzielt werden.

Sogenannte Sprührohre, welche als horizontale Rohre mit seitlichen Löchern ausgeführt sind, haben sich jedoch nicht bewährt. Bei grossen Löchern ist der Druckverlust über die Austrittsöffnungen zu gering, und das Fluid strömt hauptsächlich aus den letzten Löchern in Fließrichtung. Bei kleinen Löchern ist die Austrittsgeschwindigkeit zu hoch, was zu Turbulenzen und Fehlströmungen im Speicher führt.

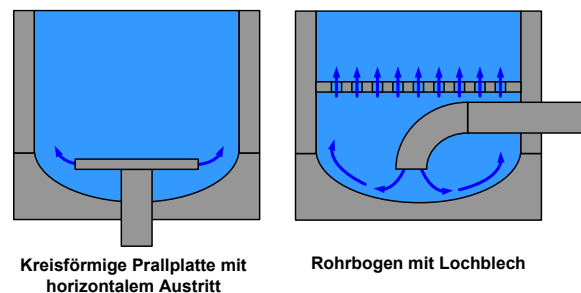


Bild 2.54 Geeignete Bauformen von Be- und Entladungseinrichtungen.

Allgemein betrachtet sind Be- und Entladungseinrichtungen jeglicher Art genügend gross zu dimensionieren, um die Einstromgeschwindigkeit und somit die Wirbelbildung gering zu halten (siehe Bild 2.54). Es gelten folgende Empfehlungen:

- Reduktion der Einstromgeschwindigkeit auf unter 0.1 m/s durch Umlenkung und Erweiterung des Querschnitts.
- Nach Umlenkung oder Querschnittserweiterung ist eine Beruhigungsstrecke von mindestens 6-fachem hydraulischem Durchmesser notwendig.

Bei der **mittreissenden Strömung** tritt das Fluid bei der direkten Beladung an einer Stelle in den Speicher, die nicht seiner Temperatur entspricht, so sorgen Auftriebskräfte dafür, dass das Fluid in jene Richtung beschleunigt wird, in welcher die Temperatur und damit die Dichte im Speicher passend ist. Auf dem Weg zu dieser Position wird Fluid aus der Nachbarschaft mitgerissen und mit der eigentlichen Strömung vermischt. Zudem kann es auf Grund des Momentums dieser Bewegung zu einem Überschiessen über die korrekte Position hinaus kommen.

Empfehlung:

- Fluid an der Stelle in den Speicher führen, an welcher die Temperatur im Speicher passend ist
- Bei veränderlichen Eintrittstemperaturen, mit Umschaltventilen oder vertikalen Schichtladelanlagen arbeiten.

Auf Grund von **Wärmeleitung und Diffusion** gleichen sich Temperaturunterschiede im Speicher aus. Dieser Prozess ist langsam und wird vor allem dann relevant, wenn die Wärme über einen längeren Zeitraum gespeichert werden soll (zum Beispiel über Wochen oder Monate). Als Gegenmassnahme sind vor allem hohe und schlanke Speicher einzusetzen, was im nächsten Kapitel thematisiert wird.

#### 2.6.4.2 Höhen-Durchmesser-Verhältnis

Das Höhen-Durchmesser-Verhältnis ist eine weitere Kennzahl, die sich auf die Dimensionierung und Auslegung des Speichers auswirkt und vom Betreiber, Hersteller und Lieferanten zu beachten ist. Es gibt bei der Betrachtung jedoch zwei sich gegenseitig beeinflussende Faktoren zu beachten:

- Einerseits kann ein optimales Oberflächen-Volumen-Verhältnis mit minimalen Wärmeverlusten angestrebt werden. Die Ideale Form ist dabei eine Kugel oder angenähert ein Würfel respektive ein Zylinder mit gleichem Durchmesser und Höhe.
- Auf der anderen Seite ist eine gute Temperaturschichtung anzustreben, welche tendenziell hohe und schlanke Speicherformen benötigt.

Wie in Bild 2.52 zu sehen, ist die Auskühlung des Speichers für unterschiedliche Speichergrossen bzw. Oberflächen-Volumen-Verhältnisse gut erkennbar. Bei gleichbleibendem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 1.5 (Annäherung an eine Kugel) verbessert sich das Oberflächen-Volumen-Verhältnis vom 25 m<sup>3</sup> Speicher mit einem Wert von 1.93 um das 16-fache auf einen Wert von 0.12 beim 100'000 m<sup>3</sup>. Es ist gut erkennbar, dass das Oberflächen-Volumen-Verhältnis einen erheblichen Einfluss auf das Abkühlverhalten und auf die Wärmeverluste aufweist.

Für die optimale Ausbildung einer Temperaturschichtung wird jedoch ein Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 5 bis 10 empfohlen. Was in der Praxis relativ hohe und schlanke Zylinder ergibt, welche dabei ein eher ungünstiges Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweisen.

In der Praxis muss daher immer ein Kompromiss zwischen einem optimalen Oberflächen-Volumen- und einem optimalen Höhen-Durchmesser-Verhältnis eingegangen werden.

Für eine **optimale Temperaturschichtung** ist der Fokus auf ein **gutes Höhen-Durchmesser-Verhältnis (5 bis 10)** zu richten, also tendenziell hohe und schlanke Speicher. Dies gilt unabhängig von der Speicherdauer – also sowohl für Kurzzeit- als auch für Langzeitspeicher – insbesondere dann, wenn die Wärme über einen längeren Zeitraum von mehreren Wochen oder Monaten gespeichert werden soll.

Für **geringe Wärmeverluste** wird das **Oberflächen-Volumen-Verhältnis** immer wichtiger. Bei grösseren Energiespeichern ist auch bei einem guten Oberflächen-Volumen-Verhältnis mit entsprechender Höhe zu rechnen, womit ebenfalls ein gute Temperaturschichtung gewährleistet werden kann (Ausbildung einer Thermokline).

Mitzuberücksichtigen ist dabei immer eine optimale Einstromgeschwindigkeit gemäss Kapitel 2.6.4.1.

#### 2.6.4.3 Serieller oder paralleler Betrieb

Je nach Anwendung, Platzbedarf und notwendigem Volumen des Speichers sind mehrere Behälter notwendig. Dabei ist zwischen seriellem und parallelem Betrieb zu unterscheiden.

Ein **serieller Betrieb** der Speicher wird empfohlen, wenn bei maximalem Bezug die Temperaturschichtung erhalten bleibt respektive die maximale Einstromgeschwindigkeit gemäss Kapitel 2.6.4.1 mit vernünftigem Aufwand sichergestellt werden kann. Ansonsten wird ein **paralleler Betrieb** empfohlen, bei dem auf das Prinzip des konstanten Druckabfalls und gleiche Volumenströme geachtet werden muss, dem sogenannten Tichelmann-Prinzip. Das Prinzip besteht darin, dass das durchfliessende Medium überall die gleiche Distanz zurücklegen muss (gleiche Rohrdurchmesser, gleiche Länge). Damit treten über jedem Element gleiche Druckverluste auf, alle Stränge werden gleichmässig durchströmt und die Speicher werden gleichmässig befüllt beziehungsweise entladen. Es ist auch möglich mehrere Speicher über Klappen entweder im seriellen oder im parallelen Betrieb zu bewirtschaften. Das kann zum Beispiel sinnvoll sein, wenn die effektive Lade- und Entladeleistung nicht abschliessend ermittelt werden kann. Dies ist jedoch aufwändiger und kostenintensiver.

#### 2.6.4.4 Transport

Speichergrossen bis 4.5 m Durchmesser sind für den Transport auf öffentlichen Strassen geeignet. Grössere Wärmespeicher müssen vor Ort geschweisst oder betoniert werden und sind in der Regel auch nicht druckfest. Bei einem Durchmesser von 4.5 m und einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 5 (Höhe 22.5 m) ergibt das ein Volumen von knapp 358 m<sup>3</sup>.

### 2.6.4.5 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit des Speichers sollte nur so hoch angesetzt werden wie notwendig. Da ein Speicher in der Regel im Rücklauf eingebunden ist, kann sich der Speicher am tieferen Rücklaufdruck orientieren. Handelsübliche Speicher werden in der Regel für eine Druckfestigkeit von 6 bar bis 10 bar (selten 15 bar) angeboten. Darüber werden die notwendigen Wandstärken zu gross, um noch wirtschaftlich zu sein. Speicher bis 100°C werden drucklos mit Gaspolster ausgeführt (z. B. mit Stickstoff (N<sub>2</sub>)). Speicher über 100°C (Druckspeicher) werden ohne Druckpolster ausgeführt.

### 2.6.5 Wärmespeicher für thermische Netze

Im Rahmen des Projekts BigStoreDH [84] hat die Ostschweizer Fachhochschule OST und das Institut für Solartechnik SPF zusammen mit dem Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme (Soites) Faktenblätter zu Wärmespeicher in thermischen Netzen erstellt. Diese Faktenblätter stellen den aktuellen Stand der Technik sowie die Anwendung im schweizerischen und internationalen Kontext dar und werden nachfolgend kurz beschrieben.

#### 2.6.5.1 Stahltank drucklos

Der oberirdisch angeordnete und drucklose Stahltank ist die am häufigsten anzutreffende Bauart von Grosswärmespeichern von > 500 m<sup>3</sup> in thermischen Netzen. Er wird auch als Flachbodentank bezeichnet und mit Wasser als Speichermedium und einer thermischen Schichtung im Speichervolumen betrieben [85].

Die Be- und Entladung des Speichers erfolgt über Diffusoren und einen direkten Austausch des Speichermediums Wasser. Dadurch sind grosse Be- und Entlade-Fluidströme und -leistungen möglich. Die Diffusoren reduzieren die Einströmeffekte und ermöglichen den Erhalt der thermischen Schichtung im Speicher. Für die Einbindung von drucklosen Speichern in ein Wärmenetz wird oft eine Systemtrennung mit externem Wärmeübertrager benötigt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Systemeinbindung, welche im Kapitel 2.6.5.9 genauer beschrieben sind.

Grosse Speicher mit mehr als rund 400 m<sup>3</sup> werden vor Ort errichtet, da sie nach Fertigstellung nicht mehr transportabel sind. Sie werden entweder mit dem traditionellen Hubverfahren, dem kontinuierlichen Spiralmontage- oder Wickelfalzverfahren hergestellt. Je nach Grösse des Speichers und der Untergrundbedingungen sind mehr oder weniger aufwändige Fundamentierungen notwendig. Aufgrund ihrer Grösse werden drucklose Speicher meist im Freien aufgestellt und mit einer Wärmedämmung sowie einer Wetterschutzhülle versehen (Bild 2.55).



Bild 2.55 Speicher der Agro Energie Schwyz Ag im Bau (28'000 m<sup>3</sup>, [85]).

Dabei stellen sie grosse, auffällige Bauwerke dar, deren Bewilligungsfähigkeit je nach Bauzone eingeschränkt ist, respektive die Schaffung einer Sondernutzungszone erfordert.

Herkömmliche drucklose Stahltanks können im oberen Speicherbereich mit Maximaltemperaturen bis < 100°C betrieben werden. Höhere Temperaturen sind dennoch auch bei Flachbodentanks mit so genannten Zwei-Zonen-Speichern möglich (Bild 2.56). Dabei wird das Gesamtvolumen des Speichers durch eine Zwischendecke in zwei Teilvolumina getrennt. Das obere Teilvolumen dient dabei als Auflast, um im unteren Volumen einen höheren Druck zu erzeugen und somit Temperaturen > 100°C zu ermöglichen.

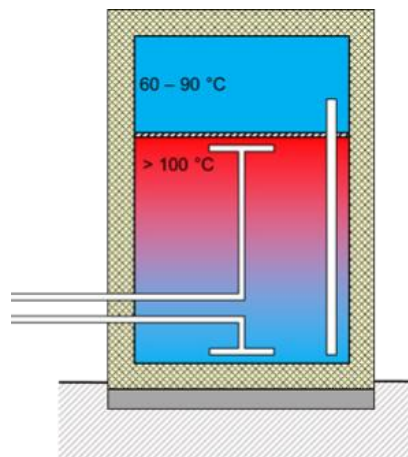


Bild 2.56 Schema eines Zwei-Zonen-Seichers [85].

Ein druckloser Speicher kann auch zur Druckhaltung im Versorgungssystem genutzt werden, wenn der Wasserspiegel des Speichers über dem hydrostatischen Druck des Wärmenetzes liegt. Zur Vermeidung unzulässiger Über- oder Unterdruck-Zustände werden im Deckel installierte Wasserschleusen oder Kombinationen aus Vakuumbrecher und Überdruckventil verwendet. Zur Verhinderung von Sauerstoffeintrag wird in den Freiraum über dem Wasserspiegel Dampf eingeleitet und ein Dampfpolster mit konstantem Druck erzeugt.

#### Vorteile

- Stand der Technik
- Hohe Speicherkapazität
- Hohe Speichereffizienz
- Hohe Be- und Entladeleistungen möglich
- Wenig Standfläche benötigt
- Einbindung als Expansion und -druckhaltung möglich
- Hoher Freiheitsgrad im Speicherdesign.

#### Nachteile

- Investitionskosten
- Platzbedarf auf Gelände
- Sichtbare Installation
- Bewilligungsfähigkeit
- Begrenzte städtebauliche Integrationsmöglichkeit
- Maximaltemperatur in der Regel  $< 100^{\circ}\text{C}$ .

Speicher in der Ausführung als drucklose Stahltanks sind in der Schweiz weit verbreitet und besonders in grossen Wärmenetzen im Einsatz. Verschiedene nationale und europäische Hersteller können entsprechende Anlagen liefern. Beispiele ausgeführter Projekte in der Schweiz:

- Agro Energie Schwyz AG, 28'000 m<sup>3</sup>, 2020, Ibach SZ
- EBL Energiezentrum Rigi AG, 18'000 m<sup>3</sup>, 2020, Küssnacht SZ
- Energie Ausserschwyz AG, 1'450 m<sup>3</sup>, 2021, Galgenen SZ

#### 2.6.5.2 Stahltank druckbehaftet

Druckbehaftete Stahltanks werden aufgrund des Überdrucks nicht als Flachbodentanks sondern mit Klöpperboden ausgeführt und können dafür mit deutlich höheren Drücken und Temperaturen betrieben werden [80].

Bei der Be- und Entladung des Speichers muss ebenfalls auf eine Strömungsberuhigung geachtet werden, um eine Temperaturschichtung im Speicher zu gewährleisten (siehe Kapitel 2.6.4.1). Während bei drucklosen Flachbodentanks die temperaturbedingten Volumenänderungen im Speicher durch eine Änderung des Wasserspiegels ausgeglichen werden können, wird bei Druckbehältern eine externe Druckhaltung benötigt.

Speicher bis rund 300 m<sup>3</sup> werden in der Regel vorgefertigt und sind transportierbar, was vergleichsweise kostengünstig ist. Solche Speicher können für Temperaturen bis etwa 180°C (20 bar) ausgelegt werden.

Grössere Behälter werden auf Platz geschweisst und ab rund 1'000 m<sup>3</sup> werden diese auf rund 160°C limitiert, um die Kosten (Wandstärke Material) in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Die Behälter werden dabei entweder traditionell aus einzelnen Platten gefertigt

oder mittels Schweisssroboter im Spiralmontageverfahren und mit hydraulischer Hebevorrichtung hergestellt. Die Dicke der Behälterwandung richtet sich in erster Linie nach dem vorgesehenen Druckniveau im Speicher unter zusätzlicher Berücksichtigung des statischen Wasserdrucks. Boden und Deckel werden bei Drucktanks in gewölbter Form hergestellt, um eine bessere Druckverteilung zu erreichen (Bild 2.57).



Bild 2.57 Wärmespeicher der Renergia im Bau (5'000 m<sup>3</sup>, [80]).

Für grosse Speichervolumina werden häufig auch mehrere werkstoffgefertigte Behälter installiert und hydraulisch verbunden (seriell oder parallel). Bei Mehrspeicheranlagen ist die Einbindehydraulik und die Be- und Entladelogik jedoch komplexer, somit aufwendiger und teurer im Betrieb als bei einem grossen Speicher.

Generell fallen Druckspeicher unter die gängigen Druck-Prüfnormen (vgl. [86], [87], [88], [89]). Diese führen zu erhöhtem Wartungsaufwand, da in regelmäßigen Abständen (meist alle vier bis sechs Jahre) wiederkehrende Begutachtungen, sowie alle zehn Jahre wiederkehrende Druckprüfungen erforderlich sind.

#### Vorteile

- Stand der Technik
- Hohe Speichertemperaturen möglich
- Hohe Speicherkapazität
- Hohe Speichereffizienz
- Hohe Be- und Entladeleistungen möglich
- Wenig Standfläche benötigt
- Einfache Systemeinbindung.

#### Nachteile

- Grösse der Einzelspeicher auf wenige 10'000 m<sup>3</sup> begrenzt
- Hohe Investitionskosten im Vergleich zu drucklosen Stahltanks
- Platzbedarf auf Gelände
- Sichtbare Installation
- Bewilligungsfähigkeit

- Wartungsaufwand gegenüber drucklosen Speichern
- Städtebauliche Integrationsmöglichkeit.

Speicher in der Ausführung als druckbehaftete Stahl-tanks sind in der Schweiz weit verbreitet und besonders in grossen Wärmenetzen im Einsatz. Beispiele ausgeführter Projekte in der Schweiz:

- Renergia Zentralschweiz AG, 1 x 5'000 m<sup>3</sup>, 2022, Perlen LU
- KVA Buchs, CH, 12 x 200 m<sup>3</sup>, Buchs SG
- KVA Linth, CH, 1 x 500 m<sup>3</sup>, 2021, Linth GL
- IWB, Dolder Speicher, CH, 9 x 140 m<sup>3</sup>, 2020, Basel BS
- EWZ Zürich, CH, 3 x 175 m<sup>3</sup> Speicher, EV Altstetten-Höngg ZH

### 2.6.5.3 Betontank

Erdvergrabene und mit Wasser befüllte Stahlbeton-Tanks bieten eine kostengünstigere Alternative zu klassischen oberirdischen Stahlbehältern. Zur Integration eines Speichers in den Untergrund kann entweder vorab eine Baugrube erstellt werden oder, wie im Bild 2.58 dargestellt, der fertiggestellte Tank im Nachhinein durch Anschütten von aussen eingegraben werden. Geeignete geologische Formationen für erdvergrabene Betontanks sind gutstehende Böden, möglichst ohne oberflächennahes Grundwasser [90].

Die Einbausituation im Untergrund erfordert einen speziellen Wandaufbau der, neben der statischen Funktion, auch den Schutz der Wärmedämmung vor Durchfeuchtung gewährleistet. Das Eindringen von Feuchtigkeit von aussen aus dem umgebenden Erdreich ist ebenso zu verhindern wie Leckagen und Diffusionsvorgänge von innen nach aussen. Der Boden des Speicherbehälters wird meist vor Ort aus Stahlbeton gefertigt. Wände und Dach bestehen entweder aus vorgefertigten Stahlbetonelementen oder werden ebenfalls vor Ort aus Stahlbeton gefertigt. Im Inneren sind die Speicher mit einer Auskleidung aus Edelstahlblech versehen, um die Dichtigkeit gegenüber Wasser und Wasserdampf zu gewährleisten. Die Wärmedämmung wird auf der Aussenseite der Stahlbetontanks an Boden, Wänden und Deckel angebracht. Als Dämmmaterialien werden zum Beispiel Schaumglasschotter für den Boden und Blähglasgranulat in einer Membranfolienschalung für Wände und Dach verwendet. Typische Dämmstärken für die Wärmedämmung liegen zwischen 30 cm am Boden und 70 cm auf dem Dach. Wichtig ist, den Dämmstoff während der Bau- und der Betriebszeit vor Durchfeuchtung von innen und von aussen zu schützen, da er sonst einen Grossteil seiner Dämmwirkung verliert (vgl. [90]).

Betontanks sind in der Regel offen gegenüber dem Atmosphärendruck. Die Speichertemperaturen sind in diesem Fall auf unter 100°C begrenzt. Bei unter Innendruck stehenden Tanks sind jedoch auch höhere Temperaturen möglich.

Bei entsprechender Stabilität der Betondecke können diese Speicher nach Fertigstellung begrünt und begangen werden und eröffnen somit gute städtebauliche Integrationsmöglichkeiten (Bild 2.58).



Bild 2.58 6'000 m<sup>3</sup> Speicher der Stadtwerke München in München-Ackermannbogen im Bau (oben) und nach Fertigstellung (unten) [90].

Die Temperaturwechsel im Behälter führen zu komplexen Anforderungen an die Behälterstatik für die keine Standard-Auslegungsverfahren existieren. Die Anforderungen an das Planungsbüro, eine kosteneffiziente Konstruktion zu entwickeln, sind daher hoch.

Speicher in der Ausführung als erdvergrabene Betonbehälter wurden in der Schweiz bisher (Stand 2022) keine gebaut. Mehrere Projekte wurden jedoch in Deutschland realisiert:

- Stadtwerke München, DE, 6'000 m<sup>3</sup>, 2007, München-Ackermannbogen
- Stadtwerke Friedrichshafen, DE, 12'000 m<sup>3</sup>, 1996, Friedrichshafen
- HanseWerk Natur GmbH, DE, 4'150 m<sup>3</sup>, 2010, Hamburg-Bramfeld
- Avacon Natur GmbH, DE, 2'750 m<sup>3</sup>, 2000, Hannover-Kronsberg
- Stadtwerke Crailsheim, DE, 100 und 480 m<sup>3</sup> Speicher unter Innendruck, 2007, Crailsheim.

#### Vorteile

- Investitionskosten niedriger als bei Stahltanks
- Hohe Speicherkapazität
- Hohe Speichereffizienz

- Hohe Be- und Entladeleistungen möglich
- (Land-) Oberfläche ist begeh- und nutzbar
- Unsichtbare Installation
- In Erdbebenzonen ggf. statisch vorteilhafter als oberirdische Tanks.

#### Nachteile

- Nicht Stand der Technik
- Wenige Anbieter
- Feuchteschutz der Wärmedämmung komplex
- Wartung und Instandhaltung schwieriger als bei oberirdischen Speichern

#### 2.6.5.4 Erdbecken

Bei einem Erdbecken-Wärmespeicher wird eine mit Kunststoffbahnen als Dichtung ausgekleidete Grube befüllt und mit einer wärmegeprägten Abdeckung geschlossen (Bild 2.59). Bei sehr grossen Speichern kann aufgrund des günstigeren Oberflächen-zu-Volumen Verhältnisses häufig auf eine Wärmedämmung von Boden und Seitenwänden verzichtet werden. Im Einzelfall werden kleinere Erdbeckenspeicher gegen das Erdreich wärmegeädmt [91].

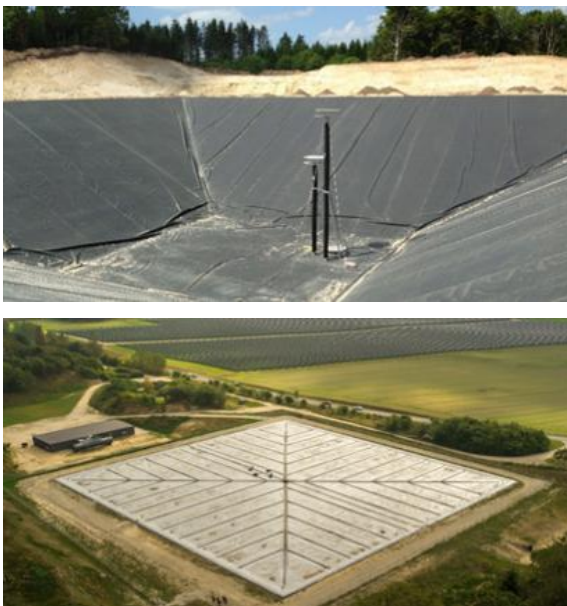


Bild 2.59 60'000 m<sup>3</sup> Erdbecken - Wärmespeicher in Dronninglund DK im Bau (oben) und im Endzustand (unten) [91].

Als Speichermedium kann bei Erdbecken-Wärmespeicher entweder Wasser oder ein Kies-Wasser-Gemisch verwendet werden. Wasser als Speichermedium ermöglicht eine hohe Wärmekapazität, ein gutes thermisches Schichtungsverhalten und hohe Be- und Entladeleistungen. Die Abdeckung schwimmt in der Regel auf der Wasseroberfläche und kann nur zu Wartungszwecken betreten werden. Bei der Verwendung von Kies-Wasser-Gemischen sind sowohl die spezifische Wärmekapazität als auch die erreichbaren Temperaturspreizungen im Speicher geringer als bei reinem

Wasser. Dafür kann der Deckel auf dem festen Kies aufliegen und stärker belastet werden. Die Oberfläche des Speichers kann so während des Speicherbetriebs genutzt werden, zum Beispiel als Grün- und Parkanlage.

Die Temperaturen im Speicher werden in der Regel durch die technische Nutzungsdauer des Auskleidungsmaterials auf maximal 80°C bis 95°C begrenzt. Bei höheren Temperaturen würde die Kunststoffauskleidung zu rasch altern.

Baukosten von Erdbecken-Wärmespeichern werden minimiert, wenn der Erdaushub für den Bau eines Dammes um das Erdbecken herum verwendet werden kann, da auf diese Weise kein Erdreich an- oder abtransportiert werden muss und das Volumen des Speichers zusätzlich vergrössert wird. Grosse Erdbeckenspeicher werden sowohl direkt als auch mit Hilfe von Wärmepumpen auf tiefe Temperaturen von bis zu 10 - 15 °C entladen, wodurch die nutzbare Speicherkapazität deutlich erhöht werden kann.

Bei wassergefüllten Speichern erfolgt die Be- und Entladung durch Diffusoren. Bei Kies-Wasser gefüllten Speichern durch Kunststoff-Rohrleitungen als Wärmeübertrager oder durch Brunnenschächte.

Speicher in der Ausführung als Erdbecken-Wärmespeicher wurden in der Schweiz bisher (Stand 2022) keine gebaut. Mehrere Projekte wurden jedoch in Europa realisiert (Ort, Land, Volumen Speichermedium, Jahr):

- Dronninglund, DK, 60'000 m<sup>3</sup> Wasser, 2014
- Marstal, DK, 75'000 m<sup>3</sup> Wasser, 2012
- Gram, DK, 120'000 m<sup>3</sup> Wasser, 2015
- Vojens, DK, 210'000 m<sup>3</sup> Wasser, 2015
- Toftlund, DK, 85'000 m<sup>3</sup> Wasser, 2017
- Hoje Taastrup, DK, 70'000 m<sup>3</sup> Wasser 2022
- Eggenstein-Leopoldshafen, DE, 4'500 m<sup>3</sup> Kies-Wasser, 2008

#### Vorteile

- Grosse Speichervolumen möglich
- Einfache Bauweise
- Niedrige Investitionskosten möglich
- Bei Wasser als Speichermedium:
  - Hohe Be- und Entladeleistungen möglich
  - Als Kurz- und Langzeit-Wärmespeicher verwendbar
  - Gute thermische Schichtung
  - Hohe Speicherkapazität
- Bei Kies-Wasser: Oberfläche nutzbar (bei Wasser als Speichermedium nur für Wartungszwecke begehbar).

#### Nachteile

- Kein Stand der Technik
- Hoher (Land-) Flächenbedarf
- Maximaltemperatur 80°C bis 95°C
- Technische Nutzungsdauer der Dichtung ist stark abhängig vom Jahresgang der Temperaturen
- Wartung und Instandhaltung schwierig
- Erhöhte Investitionskosten an Standorten mit hohem Grundwasserstand wegen Zusatzaufwand für Wärmedämmung.

### 2.6.5.5 Erdsonden

In einem Hochtemperatur-Erdsonden-Wärmespeicher, es werden nachfolgend nur Speicher mit einer Speichertemperatur > 50°C thematisiert, wird der am Standort vorliegende Untergrund als Speicher verwendet. Dabei eignen sich grundsätzlich alle Gebiete in denen auch Erdwärmesonden gebohrt werden können. Wenn Erdsonden-Wärmespeicher auf ein hohes Temperaturniveau erwärmt werden sollen, muss allerdings fließendes Grundwasser ausgeschlossen werden. Dies sowohl aus bewilligungstechnischen als auch aus energetischen Gründen, um Wärmeverluste zu verhindern. In einem kürzlich gestarteten Projekt untersucht das Wasserforschungsinstitut Eawag, wie sich der Einsatz von Erdsonden-Wärmespeicher auf das umliegende Erdreich, das Grundwasser und die darin lebenden Mikroorganismen auswirkt (siehe Bild 2.60, [92]).

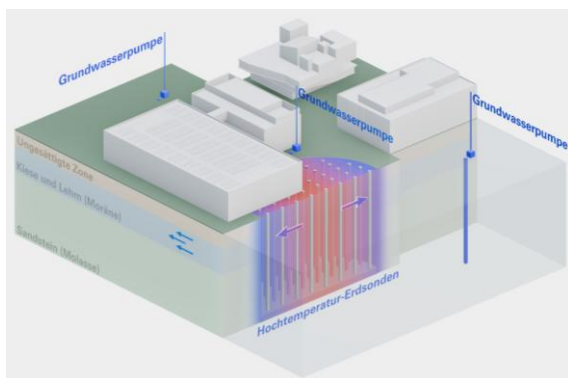


Bild 2.60 Hochtemperatur-Erdsondenfeld unter dem EMPA Campus in Dübendorf. Die Sonden reichen bis in 100m Tiefe. Drei Grundwasserpumpen holen das Grundwasser an drei verschiedenen Standorten an die Oberfläche [92].

Die Be- und Entladung des Speichers mit Wärme erfolgt über vertikale Erdwärmesonden (EWS), die bis zu einer Tiefe von typischerweise 30 bis 100 m unter die Erdoberfläche gebohrt werden. Erdwärmesonden können als Einzel- oder Doppel-U-Rohre oder als konzentrische Rohre, meist aus Kunststoff, ausgeführt werden. Wenn wärmebeständige Materialien, wie beispielsweise PEX, eingesetzt werden, können die Speicher mit hohen Temperaturen von bis zu 95°C beladen werden. Der Raum zwischen den EWS-Rohren und der Bohrlochwand wird hinterfüllt, um die Bohrung wieder hyd-

raulisch abzudichten und um den thermischen Bohrlochwiderstand zu verringern.

Bei einer Speichieranwendung variieren die Abstände zwischen den Bohrlöchern häufig zwischen 2 bis 5 m, je nach Grösse, Tiefe und Temperaturen des Speichers.

Erdsonden-Wärmespeicher haben im Vergleich zu wassergefüllten Speichern keine vertikale Temperaturschichtung, sondern einen konzentrischen Temperaturverlauf vom Speicherzentrum zu dessen Rändern. Grund dafür ist der im Erdreich nahezu ausschliesslich durch Wärmeleitung stattfindenden Wärmetransport. An den Rändern sinken dabei die Temperaturen aufgrund der Wärmeverluste an die Umgebung ab. Der konzentrische Temperaturverlauf wird durch den hydraulischen Anschluss der Vorlaufleitungen im Zentrum des Speichers und der Rücklaufleitungen an den Rändern unterstützt. Eine gewisse Anzahl von Erdwärmesonden wird dabei hydraulisch in Reihe geschaltet, um eine hohe Auskühlung, respektive Erwärmung des Wärmeträgerfluides zu erreichen. Beim Beladen verläuft die Strömungsrichtung von der Speichermitte zu den Rändern hin, bei der Entladung kehrt sich die Strömungsrichtung um.

An der Oberseite des Speichers verringert eine Wärmedämmschicht die Wärmeverluste an die Umgebung. Die Seitenwände und der Boden bleiben aus Kostengründen ungedämmt. Um dennoch eine hohe Speicher-Effizienz zu erreichen, sind bei hohen Temperaturdifferenzen zum Erdreich grosse Speichervolumen und kompakte Speicher-Geometrien mit möglichst kleinen Oberflächen-Volumen-Verhältnissen notwendig.

Mit einem Erdsonden-Wärmespeicher können grosse Speicherkapazitäten erschlossen werden, allerdings hängt die mögliche Be- und Entladeleistung des Speichers direkt mit der installierten Länge der Erdwärmesonden zusammen. Sind hohe Spitzenleistungen erforderlich, wird meistens ein zusätzlicher Pufferspeicher eingesetzt, der die kurzfristige Spitzenleistung eines Wärmerzeugers über wenige Stunden aufnimmt und diese Wärme dann über längere Zeiträume bei niedrigerer Leistung an den Erdsonden-Wärmespeicher abgibt.

Des Weiteren kann der nutzbare Temperaturbereich des Speichers durch die zusätzliche Integration einer Wärmepumpe vergrößert werden. So sind zum Beispiel Entladetemperaturen des Speichers bis deutlich unter die Rücklauftemperaturen des Wärmenetzes möglich. Durch die bessere Auskühlung des Wärmespeichers erhöht sich dessen nutzbare Temperaturdifferenz und die jährlichen Wärmeverluste werden reduziert.

Bisher wurde in der Schweiz ein Hochtemperatur-Erdsonden-Wärmespeicher gebaut. Mehrere Projekte wurden jedoch weltweit realisiert:

- EMPA Dübendorf ZH, CH, 300'000 m³, 2022
- Crailsheim, DE, 37'500 m³, 2008
- Neckarsulm, DE, 63'000 m³, 1999

- Braedstrup, DK, 19'000 m<sup>3</sup>, 2012
- Anneberg, SE, 50'600 m<sup>3</sup>, 2003
- Emmaboda, SE, 323'000 m<sup>3</sup>, 2010
- Okotoks, CA, 34'000 m<sup>3</sup>, 2007

#### Vorteile

- Niedrige Investitionskosten
- Grosse Speichervolumen möglich
- Speichervolumen ist einfach erweiterbar
- (Land-) Oberfläche ist nutzbar
- Anordnung unter Gebäuden ist unter bestimmten Voraussetzung möglich (Gebäudestatik).

#### Nachteile

- Geringe bis mittlere Be-/Entladeleistungen
- Nur für grosse Speichervolumen geeignet
- Geologische Voraussetzungen und Voruntersuchungen notwendig
- Keine oder nur geringe Grundwasserbewegung im Untergrund zulässig
- Keine Wärmedämmung an Boden und Seiten möglich
- Wartung und Reparatur schwierig.

#### 2.6.5.6 Aquifer

Aquifere sind unterirdisch weit verteilte Grundwasserleiter mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit. Wenn über und unter ihnen wasserundurchlässige Schichten liegen und kein oder nur ein geringer natürlicher Grundwasserfluss vorhanden ist, können sie zur Speicherung von Wärmeenergie genutzt werden (siehe Bild 2.61). Dazu werden zwei Brunnen (oder Brunnengruppen) in den Grundwasserleiter hergestellt, die der Entnahme und Einspeisung von Grundwasser dienen. Während der Ladezeiten wird kaltes Grundwasser aus dem kalten Brunnen entnommen, durch die Wärmequelle (z.B. Solar- oder Abwärme) erwärmt und in den warmen Brunnen injiziert. In Entladeperioden ist die Fliessrichtung umgekehrt: warmes Wasser wird aus dem warmen Brunnen entnommen, durch die Wärmesenke abgekühlt und in den kalten Brunnen eingeleitet. Wegen der unterschiedlichen Fliessrichtungen sind beide Brunnen mit Pumpen, Förder- und Injektionsleitungen ausgestattet [93].

Da das Speichervolumen eines Aquifer-Wärmespeichers nicht zur Umgebung hin wärmegeklämt werden kann, ist die Wärmespeicherung bei hohen Temperaturen (oberhalb ca. 50 °C) in der Regel nur bei grossen Speichervolumen mit günstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnissen oder, aufgrund der höheren Umgebungstemperaturen, bei Speicherung in grösseren Tiefen effizient. Für Niedertemperatur- oder Kühlanwendungen sind jedoch auch kleinere Speicher realisierbar.

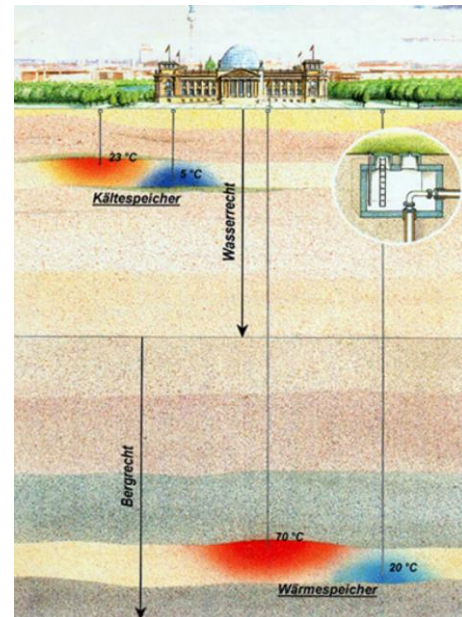


Bild 2.61 Speicheranlage am Berliner Reichstag [92].

Aquifer-Wärmespeicher stellen hohe Anforderungen an die Bodenbeschaffenheit und erfordern umfangreiche Voruntersuchungen. Eine geeignete Hydrogeologie ist eine Grundvoraussetzung. Die Bodenparameter haben einen starken Einfluss auf die Realisierbarkeit, das Design und den Betrieb eines Aquifer-Wärmespeichers (Anzahl und Lage der Brunnen, Produktionsraten, thermische Verluste etc.). Die hydraulische Leitfähigkeit  $k_f$  der Grundwasserleiterschicht ist ein zentraler Parameter. Für einen ausreichenden Wasseraustausch zwischen Grundwasserleiter und Förder- bzw. Injektionsbrunnen sind Werte von  $k_f > 10^{-5}$  m/s erforderlich. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die chemische Beschaffenheit des förderfähigen Grundwassers. Durch Temperatur und Druckänderungen können gelöste Stoffe ausfallen und Brunnenfilter, Leitungen und Armaturen mit der Zeit verstopfen. Vor allem bei der Hochtemperatur-Wärmespeicherung (über 40 - 50 °C) ist eine detaillierte Kenntnis der Mineralogie, Geochemie und Mikrobiologie im Untergrund notwendig, um Schäden am System durch Ausfällungen von Stoffen in Anlagenteilen wie Wärmeübertragern, Rohren, Armaturen und Brunnenfiltern zu vermeiden.

Die im Aquifer-Kreislauf verwendeten Werkstoffe müssen dem hohen Korrosionsrisiko durch das Grundwasser Rechnung tragen. Zusätze zum Schutz vor Korrosion können wegen des offenen Systems in der Regel nicht verwendet werden, da sonst Fremdstoffe in den Untergrund eingetragen würden. Geeignete korrosionsbeständige Materialien sind z.B. Titan Wärmeübertrager und Kunststoffrohre.

Beispiele weiterer ausgeführter Projekte:

- Biel, CH: Swatch-Omega Hauptsitz, 2023 [94]
- Berlin Reichstag, DE, 3'000 MWh/Jahr, 1999
- Neubrandenburg, DE, 12'000 MWh/Jahr, 2004
- Middenmeer, NL, 28'000 MWh/Jahr, 2021

**Vorteile**

- Niedrige spezifische Investitionskosten
- Grosse Wärmekapazitäten einfach erschliessbar
- Oberfläche nahezu uneingeschränkt nutzbar
- Mittlere Be-, Entladeleistung möglich
- Hohe Umgebungstemperaturen bei tiefen Aquifere führen zu niedrigen Wärmeverlusten.

**Nachteile**

- Nur an Standorten mit geeigneter Hydrogeologie möglich
- Aufwändige hydrogeologische Voruntersuchungen und Vorinvestitionen notwendig
- Erschliessungsrisiko vorhanden
- Erst bei grossen Speichern hohe Speichereffizienzen erreichbar
- Kontinuierliche Betriebsüberwachung erforderlich (Wasserchemismus etc.)
- Keine Wärmedämmung möglich.

**2.6.5.7 Hydraulische- und regelungstechnische Aspekte**

Ein Wärmespeicher ist eine passive Komponente, die Wärme nicht selbst erzeugt, sondern diese nur bereitstellen kann, wenn ihr Ladezustand dies zulässt bzw. wenn zuvor genügend Wärme eingespeichert wurde. Massgeblich für eine hohe Speichereffizienz bzw. für einen hohen Nutzen des Speichers im angeschlossene Versorgungssystem, ist sowohl die hydraulische als auch die regelungstechnische Systemintegration. Selbst der beste Speicher hat nur einen geringen Wert für das Versorgungssystem, wenn sein Potenzial nicht ausgenutzt wird. Folgende Aspekte sind in diesem Zusammenhang von Belang [95]:

- Druckniveau und Systemtrennung
- Temperaturen und Anzahl Be- / Entladeebenen
- Betriebsstrategie

Je nach **Druckniveaus** im Speicher und im angeschlossenen Versorgungssystem stehen grundsätzlich drei hydraulische Einbindevarianten zur Verfügung (Bild 2.62). Druckbehaftete Speicher werden in der Regel so konstruiert, dass sie auf dem Druckniveau des angeschlossenen Systems betrieben und somit direkt eingebunden werden können. Ein sehr grosser «druckloser Speicher» kann im untersten Volumen allein durch die Höhe der Wassersäule einen hydrostatischen Druck von mehreren bar erreichen. Ist dieser Druck hoch genug, kann der Speicher auch zur Druckhaltung für das Wärmenetz und zur Aufnahme des Expansionsvolumens genutzt werden. Die Be- und Entladung kann erfolgen, indem wie bei einer hydraulischen Weiche automatisch auftretende Differenzvolumenströme in den Speicher ein- oder ausgeleitet werden. Alternativ

kann die Be- und Entladung aktiv über zusätzliche Pumpen und Ventile erfolgen.

Liegt der hydrostatische Druck des Speichers unterhalb des Ruhedruckes des Wärmenetzes, muss bei drucklosen Speichern in der Regel eine **Systemtrennung** erfolgen, um den Speicher hydraulisch vom höheren Systemdruck im Wärmenetz zu trennen. Dies kann durch einen Wärmeübertrager erfolgen, was insbesondere bei hohen Be- oder Entladeleistungen aufwändig und teuer werden kann. Im Normalfall sorgt bei grossen Speichern ein aufeinander abgestimmtes System aus Pumpen, Druckregel- und Absperrventilen für eine kontinuierliche Trennung der Druckniveaus während des Betriebs und im Stillstand (Schema indirekte Einbindung über Pumpen und Ventile).

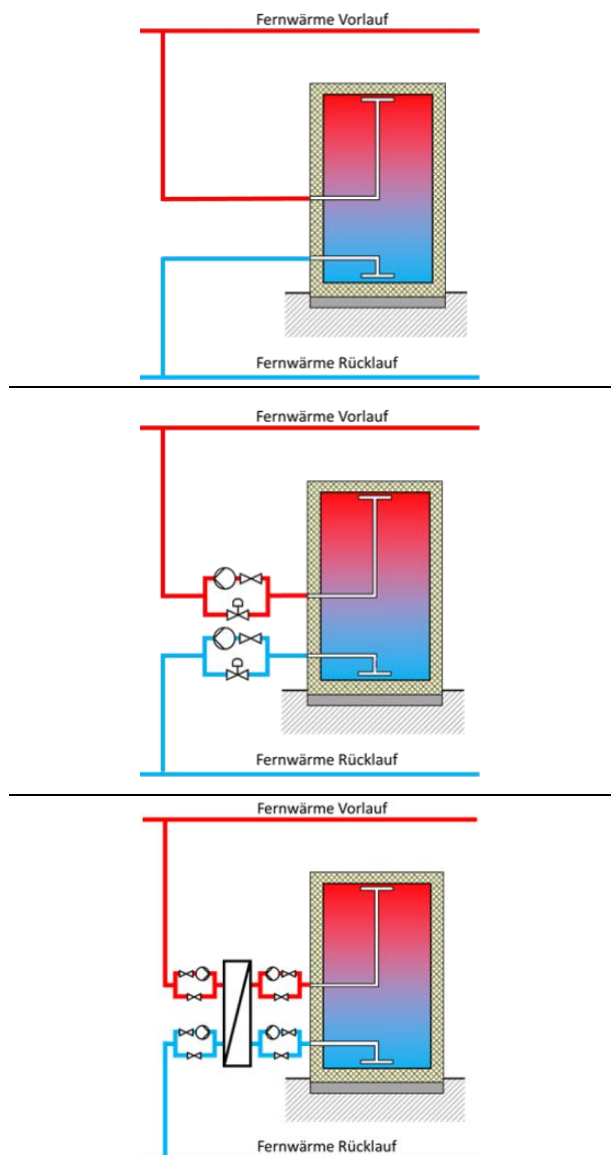


Bild 2.62 Hydraulische Einbindung thermische Energiespeicher [95].  
Oben: direkte Einbindung  
Mitte: direkte Einbringung über Pumpen und Ventile  
Unten: indirekte Einbringung über Wärmeübertrager.

Wenn auf der Quell- und/oder der Entnahmeseite des Speichers variable oder unterschiedliche **Temperaturniveaus** bereitgestellt oder gefordert werden, zum Beispiel durch mehrere Wärmeerzeuger, kann eine Unterteilung des Speichervolumens in unterschiedliche Temperaturbereiche sinnvoll sein. Dies kann durch zusätzliche Be- und Entladeebenen mit entsprechenden Speichereinbauten und Anbindeleitungen erfolgen. Wenn ein Speicher deutlich über die Nutztemperatur beladen wird, können Beimischungen für die Entladung auf bestimmte Zieltemperaturen vorgesehen werden.

Je nach Speichermedium treten unterschiedliche Verläufe der **Entnahmetemperaturen** bei der Speicherentladung auf:

- Bei Wasser als Speichermedium und guter thermischer Schichtung sinken die Temperaturen während der Entladung über lange Zeiten nicht oder nur geringfügig (rote Linie in Bild 2.63). Erst wenn der Speicher nahezu entladen ist, fallen die Temperaturen ab.
- Bei Erdreich oder Kieswasser-Gemischen als Speichermedium fallen die Entnahmetemperaturen durch den zusätzlichen Wärmeübergang vom Feststoffanteil an das Wärmeträgerfluid von Beginn an kontinuierlich ab (grüne Linie in Bild 2.63).

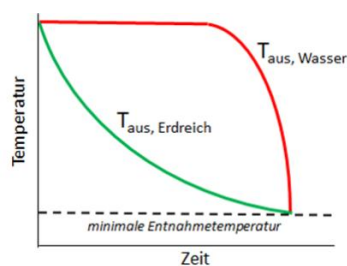


Bild 2.63 Exemplarischer Verlauf der Entnahmetemperaturen bei den Speichermedien Wasser und Erdreich [95].

Eine etablierte **Betriebsstrategie** für Wärmespeicher ist zum Beispiel die vollständige Speicherbeladung während der Nacht zur Deckung morgendlicher Lastspitzen. Ausserdem können die Laufzeiten der Wärmeerzeuger optimiert und somit Taktzyklen verringert werden. Jedoch ist die Entscheidung, ob aktuell vorhandener Wärmebedarf direkt von einem bestimmten Erzeuger oder besser aus dem Speicher gedeckt werden sollte, häufig nicht trivial. Vor allem dann, wenn mehrere Energieerzeuger im System vorhanden sind. Je nach Vorgabe, dürfen fossile Energieträgern eine bestimmte Zielmarke nicht überschreiten.

Ebenfalls sollten effiziente System-Betriebsstrategien beziehungsweise Einsatzplanungen von Energieerzeugern in grösseren thermischen Netzen betriebswirtschaftliche Belange, wie die kostengünstige Wärme- oder gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung in besonders attraktiven Zeiträumen berücksichtigen. In all diesen Szenarien bietet ein thermischer Energiespeicher die notwendige Flexibilität, um die Erzeugung vom Bedarf zeitlich zu entkoppeln. Welche Betriebsstrategie für das Gesamtsystem langfristig die technisch und

wirtschaftlich effizienteste Lösung ist, lässt sich jedoch oft nur durch aufwändige Szenarien-Betrachtungen oder Systemsimulationen beantworten. Dazu mehr im nachfolgenden Kapitel Systemintegration.

### 2.6.5.8 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Baukosten von Wärmespeichern variieren in einem sehr grossen Bereich, abhängig von der Speichergrösse, der Speicherbauart und den örtlichen Gegebenheiten am Speicherstandort. Das Bild 2.64 zeigt die Investitionskosten verschiedener realisierter grosser Untergrund-Wärmespeicher. Zum Vergleich ist auch eine Trendlinie für drucklose oberirdische Stahltanks dargestellt (schwarz gestrichelt). Zu erkennen ist eine starke Abnahme der Investitionskosten mit der Grösse der Speicher (economy of scale Effekt). Darüber hinaus ist auch ein starker Kostenunterschied für unterschiedliche Speicherbauarten zu erkennen. So können beispielsweise Erdsonden-, Aquifer- und Erdbecken-Wärmespeicher deutlich kostengünstiger realisiert werden als oberirdische Stahlspeicher. Allerdings ist bei dem Kostenvergleich einerseits zu berücksichtigen, dass manche Speicherbauarten sehr spezifische Anforderungen an die Untergrundbedingungen am Standort stellen und damit nicht überall realisiert werden können. Andererseits unterscheiden sich die Speicherbauarten auch hinsichtlich ihrer thermischen Leistungsfähigkeit in Bezug auf Wärmekapazität, Wärmeverluste und mögliche Be- und Entladeleistungen und können dadurch auch unterschiedlich grosse Nutzen für ein Energiesystem bringen [96].

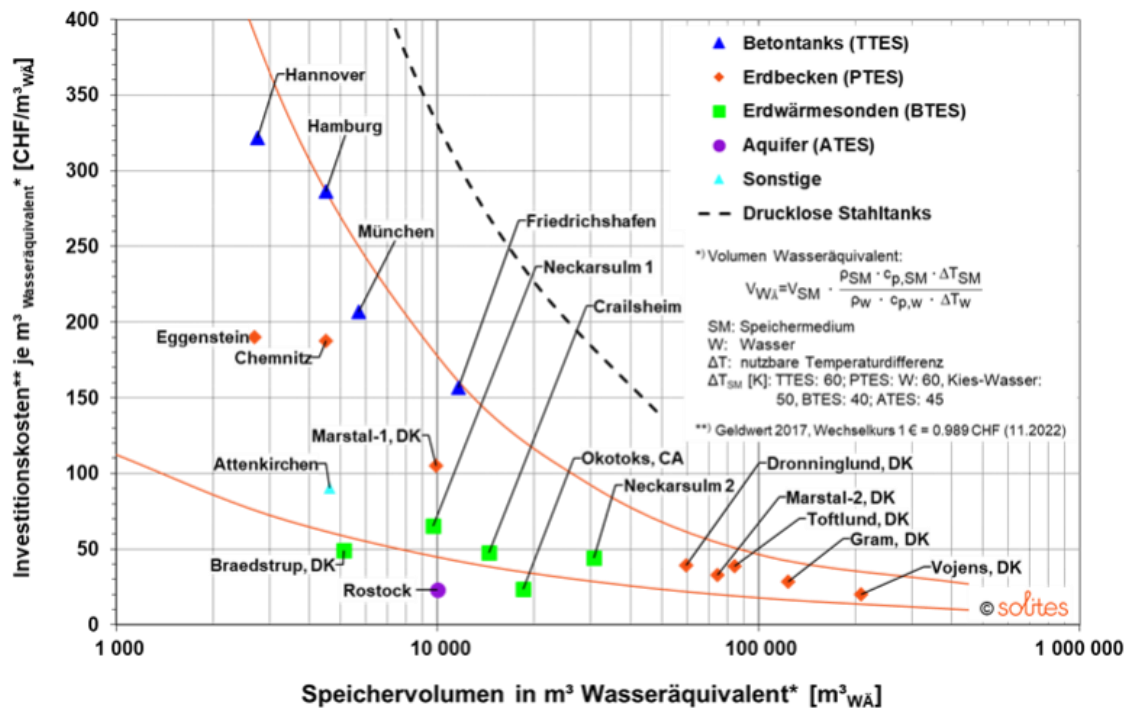


Bild 2.64 Investitionskosten von grossen realisierten Wärmespeichern (Speicherbauwerke ohne Anbindungsleitungen, Anlagentechnik, Planungskosten und MwSt.) [96] und Kostenkurve für oberirdische, drucklose Stahl tanks nach [97]. Volumenangaben in m<sup>3</sup> Wasseräquivalent um Speicher mit unterschiedlichen Speichermedien miteinander vergleichen zu können.

### 2.6.5.9 Systemintegration

Wie oben beschrieben ist ein thermischer Energiespeicher eine passive Komponente, die selbst keine Wärme erzeugt. Der Speichernutzen im System ist daher von den ein- und ausgespeicherten Wärmemengen und deren Temperaturen und Nutzen für das Wärmeversorgungssystem abhängig [96]. Grundsätzliche Anwendungen und Vorteile eines thermischen Energiespeichers in einem thermischen Netz sind folgende:

- Einbindung zusätzlicher Energiemengen, deren Verfügbarkeit zeitgebunden ist und sich nicht nach dem Bedarf richtet (Abwärme, Solarthermie, Geothermie, Power-to-Heat etc.).
- Unabhängigkeit von Kostenrisiken anderer Wärmeerzeuger und Brennstoffen (z.B. Brennstoffkosten) sowie Flexibilisierung des Anlagenbetriebs.
- Reduzieren den Einfluss von Lastspitzen auf den Anlagenbetrieb.
- Reduzierung von Erzeugergrößen und Redundanzen respektive Ersatz von (fossilen) Erzeugern.
- Verbesserung von Erzeugereffizienzen durch konstanten Betrieb (Biomassekessel, WKK etc.).
- Reduzierung und Vermeidung von Ab- und Anfahrvorgängen von Erzeugern (Instandhaltungskosten, Luftreinhaltung, Optimierung der Taktzyklen).
- Vereinfachung / Überbrückung von Wartungszyklen
- Erhöhung der Versorgungssicherheit.

- Erhöhung des Autarkiegrades.
- Verbesserung der ökologischen Bedingungen (CO<sub>2</sub>-Einsparung, Erhöhung erneuerbarer Anteile etc.)
- Imagegewinn durch Reduzierung fossiler Brennstoffe.
- Dezentrale Speicher können Lastspitzen beim Kunden oder an neuralgischen Stellen im Netz aufnehmen und ermöglichen in einem ausgelasteten Netz weitere Anschlusskapazitäten.

In der Wärmeversorgung nehmen die thermischen Energiespeicher daher wichtige Aufgaben ein. Für die Anwendung in thermischen Netzen kommt einerseits die alleinige **Anwendung im Wärmesektor** und andererseits die **sektorenübergreifende Anwendung im Strom- und Wärmesektor** infrage, welche nachfolgend thematisiert werden.

Die **Anwendung thermischer Energiespeicher im Wärmesektor** und insbesondere in thermischen Netzen kann sehr vielseitig sein. Das Augenmerk wird hier auf die Anwendung in einem Heizwerk gelegt, wo zentral an einem Standort Wärme erzeugt und anschliessend am Standort und/oder über ein thermisches Netz die Wärme verteilt wird. Hier besteht die Aufgabe des thermischen Energiespeichers hauptsächlich darin, bedarfsseitige Leistungsschwankungen zu kompensieren, damit die Wärmeerzeugungsanlagen technisch optimal und wirtschaftlich betrieben werden können.

Bei **Holzfeuerungen** hat der Speicher die wichtige Aufgabe die teilweise schnellen und grossen Lastschwankungen der Bedarfseite vom trägen Betriebsverhalten der Holzfeuerung zu entkoppeln. Automatische Holzfeuerungsanlagen erzielen je nach Brennstoffwassergehalt eine Leistungsänderung von ungefähr einem Prozent pro Minute. Dies bedeutet, dass die Holzfeuerung aus dem Regelbetrieb von etwa 30% Leistung rund 70 Minuten benötigt, bis die volle Wärmeleistung von 100% abgegeben werden kann. Bei einem Kaltstart sind es bis zu 100 Minuten.

Mit einem thermischen Energiespeicher kann das Betriebsverhalten des Holzkessels wesentlich verbessert werden, indem Lastspitzen und Lastabsenkungen durch den Wärmespeicher ausgeglichen werden, während der Holzkessel dem mittleren Leistungsbedarf nachfahren kann. Somit kann der Holzkessel kleiner dimensioniert werden, weist längere Laufzeiten auf, läuft effizienter und verursacht geringere Schadstoffemissionen.

Grundsätzlich gilt die Anforderung gemäss LRV (Anhang 3 Ziff. 523 Abs. 2 für automatische Holzfeuerungen [58]). Gemäss QM Holzheizwerke [39] wird eine Speicherkapazität zur Kompensation der Nennwärmeleistung des Holzkessels für eine Stunde empfohlen, wobei die effektive Temperaturspreizung über dem Speicher mitberücksichtigt wird. Bei einem gut funktionierenden Speichermanagement genügt gemäss QM Holzheizwerke bei Zwei- oder Mehrkesselanlagen eine Auslegung auf 2/3 der gesamthaft installierten Nennleistung der Biomassekessel [46]. Andere Untersuchungen zeigen aber auch, dass Wärmespeicher mit einer Kapazität von 2 bis 3 Stunden der installierten Nennleistung der Holzkessel vorteilhafter sind [98].

Für eine optimale Bewirtschaftung eines thermischen Energiespeichers ist, wie in Kapitel 2.6.4.1 beschrieben, dass die **Temperaturschichtung im Speicher** nicht gestört wird. Dies kann mit richtig dimensionierten Speicherdurchmesser, geeigneten Einbauten, grosszügig dimensionierten Ein- und Austrittsquerschnitten sowie einem hydraulischen Abgleich gewährleistet werden.

Wichtig ist auch die korrekte Erfassung des Speicherladezustandes und das **optimale Speicherlademanagement** für die daraus resultierende Leistungsvorgabe an die Produktionsanlage. Gemäss den Empfehlungen von QM Holzheizwerke (vgl. [99]), die nicht nur für Holzenergieanlagen anwendbar sind, wird der Speicherladezustand über mindestens fünf, über die Speicherhöhe verteilte Temperaturfühler erfasst und daraus ein normierter Wert zwischen 0 % und 100 % gebildet. Eine stabile Temperaturschichtung im Speicher ist Voraussetzung, damit dieser Ladezustand die nutzbare Energiemenge korrekt widerspiegelt. Die Feuerungsleistung wird über einen PI-Regler aus dem Ladezustand abgeleitet. Sinkt dieser unter den Sollwert, erhöht sich die Kesselleistung; bei hohem Ladezustand wird sie reduziert. Dadurch arbeitet der Kessel oder die Kessel über längere Zeit im optimalen Leistungsbereich,

was Wirkungsgrad und Emissionsverhalten verbessert. Wird der Sollwert erreicht, soll der Kessel oder die Kessel kontrolliert auf Minimallast zurückgefahren werden, um Takten und Überladung zu vermeiden. Empfohlen wird zudem, die Kesselaustrittstemperatur konstant zu halten, um die Schichtung im Speicher zu erhalten. Das Regelkonzept ermöglicht so einen ruhigen, effizienten und emissionsarmen Betrieb mit optimaler Nutzung des Wärmespeichers.

**Weitere Anwendungsmöglichkeiten** von Energiespeicher im Wärmesektor sind einerseits **Niedertemperaturnetze**, bei denen verschiedene Wärmequellen und Wärmesenken auf relativ tiefem Temperaturniveau genutzt werden, und dabei relativ grosse Energiespeicher den zeitlichen Lastausgleich von Quelle und Senke übernehmen (zum Beispiel Erdwärmesonden- oder Erdkollektorfeld-Speichern unter Einsatz von zentralen oder dezentralen Wärmepumpen, Abwärme von Rechenzentren [14]). Weiter kommen grosse Saisonspeicher in der **Solarthermie** zur Anwendung [100]. Auch in diesem Fall ist die Hauptaufgabe des (Langzeit) Energiespeichers, die Asynchronität von Quelle und Senke zu kompensieren. Je nach Anwendung sind dies Energiespeicher mit einer Speicherdauer von Tagen, einigen Wochen oder bis zu einem Jahr.

Neben dem konventionellen (reaktiven) Speicherlademanagement, zum Beispiel auf einen konstante Speicherladestand von 50% bis 60%, kann auch das zukünftige Wetter sowie das «bekannte» Lastverhalten der Kunden Einfluss auf das **(aktive) Speicherlademanagement** nehmen. Dies kommt bisher vor allem da zur Anwendung, wo die klimatischen Bedingungen einen erheblichen Einfluss auf den Wärmebedarf haben wie etwa bei Gewächshäusern. Interessant ist es grundsätzlich für die optimale Bewirtschaftung und Produktionsplanung mehrerer Produktionsanlagen von thermischen Netzen hinsichtlich Flexibilisierung und Wirtschaftlichkeit ([101], [102]). Mit der Berücksichtigung der Klimaprognose kann der klimatische Einfluss auf maximal 2 bis 3 Tage im Voraus bestimmt und in das Speicherlademanagement einbezogen werden. Wenn zusätzlich das Lastverhalten der Kunden auf Basis von Erfahrungswerten vorausgesagt werden kann, können umso genauere Produktionspläne für zum Beispiel die nächsten 12 bis 48-Stunden gemacht werden, was insbesondere sektorübergreifend weitere Möglichkeiten bietet wie zum Beispiel der stromgeführte Betrieb einer WKK-Anlage (dazu weiter unten).

Bei der **sektorübergreifenden Anwendung in WKK-Anlagen** wird zwischen einem wärmegeführten oder einem stromgeführten Betrieb unterschieden. In der Schweiz werden WKK-Anlagen in der Regel wärmegeführt betrieben, da die elektrischen Wirkungsgrade gering sind und die Abgabe der Abwärme an die Umgebung durch die Anforderungen der Energieförderungsverordnung (EnFV) [54], wie in Bild 2.15 beschrieben, eingeschränkt werden.

Bei **wärmegeführtem Betrieb** folgt die WKK-Anlage der Wärmelast, während Strom als Nebenprodukt er-

zeugt wird. Dies ist allerdings mit dem Nachteil verbunden, dass Strom teilweise auch zu Zeiten erzeugt werden kann, wenn er im Netz nicht benötigt wird. Wärmegeführte WKK-Anlagen können damit den Speicherbedarf im Stromsektor erhöhen. Dies kann vermieden werden, indem die Produktion von Wärme und Strom in WKK-Anlagen durch Einsatz von Wärmespeichern und anderen Massnahmen teilweise entkoppelt wird (**stromgeführten Betrieb**). Mit einer solchen Flexibilisierung des WKK-Betriebs bietet sich ein Potenzial zur Optimierung des Anlagenbetriebs in Bezug auf Kosten und Primärenergieverbrauch. Zur Flexibilisierung kommen nebst der Wärmespeicherung weitere Komponenten wie Spitzenlastkessel und Wärmepumpen, einem Anlagenbetrieb mit Umgehung der Dampfturbine [103] oder dem Einsatz von dezentralen Stromspeichern. Eine Umgehung der Stromproduktion ist allerdings energetisch unerwünscht, während Stromspeicher deutlich teurer sind als Wärmespeicher. Wenn für die Stromerzeugung kein fixer Einspeisetarif vergütet wird, wird deshalb der Einsatz von Wärmespeichern in WKK-Anlagen zunehmend interessant. WKK-Anlagen können damit mindestens teilweise zur bedarfsgerechten Produktion von teurer Regelenergie (Power-on-Demand) eingesetzt werden, während das thermische Netz teilweise ab Wärmespeicher versorgt wird. Gleichzeitig bieten Wärmespeicher die Möglichkeit Überschussstrom aus dem Netz bei Bedarf aufzunehmen (Power-to-Heat).

### 3 Schnittstelle Wärmebereitstellung – Wärmeverteilung

Als Schnittstelle zwischen der Wärmebereitstellung und der Wärmeverteilung werden die Pumpeneinheit mit der zugehörigen Regeleinrichtung und die Expansions- und Druckhalteanlage betrachtet. Für gewisse Anforderungen kann es notwendig sein, dass eine Netztrennung und/oder auch eine Druckerhöhungsstation in der Peripherie eingesetzt wird. Üblicherweise sind die nachfolgend beschriebenen Komponenten aber in der Wärmeezentrale installiert.

#### 3.1 Netztemperaturen

Die Vor- und Rücklauftemperatur des Netzes ergeben sich aufgrund der Anforderungen der Kunden an die Vorlauftemperatur und der Forderung nach möglichst grosser Temperaturspreizung oder der Forderung nach einer möglichst tiefen Rücklauftemperatur.

Wie in Kapitel 1.3.1 bereits eingeführt, können thermische Netze gemäss Tabelle 3.1 nach folgenden Betriebstemperaturen respektive Vorlauftemperaturen eingeteilt werden.

Tabelle 3.1 Grobe Einteilung thermischer Netze nach deren Vorlauftemperatur.

| Thermisches Netz                             | Vorlauf-temperatur                        |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Hochtemperaturnetz                           | $\geq 60^{\circ}\text{C}$                 |
| Niedertemperaturnetz mit Direktheizung       | $30^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ |
| Niedertemperaturnetz ohne Direktheizung      | $0^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$  |
| Niedertemperaturnetz mit mögl. Direktkühlung | $0^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$  |

Für thermische Netze und Anwendungen bei niedrigen Vorlauftemperaturen werden zum Teil auch folgende Begriffe verwendet, die allerdings nicht einheitlich verwendet werden:

- „Anergienetz“ oder „kalte Fernwärme“ (meist unter  $25^{\circ}\text{C}$ )
- „Fernkälte“ (zur direkten Kühlung geeignet und somit in der Regel unter  $20^{\circ}\text{C}$ )
- „Low-Ex Fernwärme“, womit ein niedriger Exergiegehalt und niedrige Temperaturen gemeint sind und zum Beispiel der Verband AGFW Netze von  $20^{\circ}\text{C}$  bis  $60^{\circ}\text{C}$  bezeichnet [21].

Wenn zur Wärmeverteilung Wasser zum Einsatz kommt, muss zur Vermeidung von Eisbildung im ganzen Netz jederzeit eine Temperatur über  $0^{\circ}\text{C}$  gewährleistet werden. Der Temperaturbereich von thermischen Netze kann jedoch auch durch Zugabe von Frostschutzmittel (zum Beispiel Ethanol oder Glykol) in den Minusbereich erweitert werden, wobei Temperaturen von bis zu  $-5^{\circ}$  üblich sind.

#### 3.1.1 Vorlauftemperatur

Die Anforderungen der Kunden sind sehr unterschiedlich (Tabelle 3.2). Bei bestehenden klassischen thermischen Netzen richtet sich die Vorlauftemperatur in der Regel nach dem Kunden mit der höchsten Temperaturanforderung. Je nach Situation können die Kunden in verschiedene Temperaturniveaus gruppiert werden (z.B. Hochtemperatur bei Radiatoren und Niedertemperatur bei Flächenheizungen). In diesem Fall kann eine Kaskadierung der Vorlauftemperatur vorteilhaft sein, indem der Rücklauf eines Kunden mit hoher Temperatur als Vorlauf für nachgeschaltete Kunden mit tieferen Vorlauftemperaturen dient. Bei einzelnen Kunden mit erhöhter Temperaturanforderung kann auch eine vor Ort Temperaturerhöhung geprüft werden. Diese und weitere Optimierungsansätze werden in Kapitel 8 behandelt.

Tabelle 3.2 Erforderliche primäre Vorlauftemperaturen für verschiedene Kundensegmente.

| Kundensegment                                   | Vorlauf-temperatur         |
|-------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Prozesswärme</b>                             |                            |
| Krankenhaus mit Sterildampferzeugung 3 bar      | $\geq 160^{\circ}\text{C}$ |
| Trocknungsprozess aus Lebensmitteltechnik       | $\geq 130^{\circ}\text{C}$ |
| Industriebetrieb mit sek. Warmwassernetz 80/60  | $\geq 85^{\circ}\text{C}$  |
| Bäder und Wellnessanlage (Hygieneschaltung)     | $\geq 70^{\circ}\text{C}$  |
| Gewächshäuser mit Lufterwärmung                 | $\geq 60^{\circ}\text{C}$  |
| Gewächshäuser mit Bodenheizung                  | $\geq 40^{\circ}\text{C}$  |
| <b>Raumwärme und Warmwasser</b>                 |                            |
| Gebäude mit Radiatoren (mit oder ohne WW)       | $\geq 65^{\circ}\text{C}$  |
| Gebäude mit Niedertemperaturheizungen (ohne WW) | $\geq 30^{\circ}\text{C}$  |

Bei **geografisch ausgedehnten Netzen** hat die Temperaturspreizung einen starken Einfluss auf die Investitions- und die Betriebskosten. Bei Halbierung der Temperaturspreizung wird der erforderliche Volumenstrom bei gleicher Leistung verdoppelt, sodass auch der Energieaufwand für die Pumpleistung entsprechend zunimmt. Vorab muss aber eine Auslegung auf einen um ungefähr Faktor 1.3 grösseren Rohrdurchmesser erfolgen, was die Investitionskosten erhöht. Als Folge davon nehmen auch die Wärmeverluste des Netzes zu, was die Wärmeverteilungskosten zusätzlich erhöht.

Aus diesen Rahmenbedingungen resultiert für die Wirtschaftlichkeit von Netzen die Forderung, dass die erforderliche Temperaturspreizung möglichst gross ist. Mit zunehmender Länge respektive Ausdehnung des Netzes nimmt in der Regel die Vorlauftemperatur zu, da am Einspeisepunkt höhere Temperaturen gefahren werden. Dies führt jedoch zu höheren Wärmeverlusten.

Die Randbedingungen der Wärmequelle haben folgende Einflüsse auf die Vorlauftemperatur:

- Die Vorlauftemperatur ist durch die Temperatur der verfügbaren Abwärme gegeben.

- Begrenzung der Vorlauftemperatur bei einer Dampfnahme aus einem Prozess bei definiertem Dampfdruck. Eine hohe Entnahmetemperatur kann somit nur mit einer Verminderung der Stromerzeugung gewährleistet werden.
- Eine Wärmeauskopplung an der Quelle besteht bereits auf einem definierten Temperaturniveau (z.B. Geothermie, Wärmepumpe, WKK-Anlage).

Die Wahl der Vorlauftemperatur hat technisch einen Einfluss auf die Wahl des Rohrsystems, der Druckstufe, die Dimensionierung der Rohrquerschnitte, die Förderleistung der Pumpe, die Wärmeverluste und unter Umständen auf die Verlegeart. Eine hohe Vorlauftemperatur ermöglicht unter Umständen eine niedrigere Druckstufe oder andernfalls kleinere Leitungsquerschnitte und geringere Förderleistungen der Pumpen. Gleichzeitig steigen die Wärmeverluste und je nach Art des Wärmeerzeugers sinkt dessen Effizienz. Dies gilt insbesondere für Wärme-Kraft-Kopplung- und Wärmepumpen-Anlagen. Aus diesem Grund ist eine wirtschaftliche Optimierung von Vorlauftemperatur und Rohrquerschnitt vorzunehmen.

### 3.1.2 Rücklauftemperatur

Die Rücklauftemperatur ergibt sich aus den Randbedingungen der angeschlossenen Gebäude wie, Alter und Zustand der zu beheizenden Bausubstanz, Art der Warmwasseraufbereitung, Art der hydraulischen Einbindung bei den Kunden. Weiter bestehen Anforderungen an die Rücklauftemperaturen von Seite der Wärmequelle. In bestimmten Fällen setzt die Wärmenutzung tiefe Rücklauftemperaturen voraus. Dies gilt beispielsweise für Abgaskondensationsanlagen und ist auch für die Effizienz von Wärmepumpen vorteilhaft.

Aus der Tabelle 3.3 können Praxiswerte und Zielwerte für Rücklauftemperaturen entnommen werden.

Die maximalen Rücklauftemperaturen sollten im Wärmeliefervertrag bzw. in den Technischen Anschlussvorschriften TAV definiert werden (siehe Kapitel 7.6.3). Dabei wird eine differenzierte Forderung der maximalen Rücklauftemperatur für den Heizfall und zur Brauchwarmwassererwärmung empfohlen.

Um möglichst tiefe Rücklauftemperaturen zu generieren, könnte ein von der Rücklauftemperatur anhängiger Energiepreis den Anreiz dazu schaffen (siehe Kapitel 7.6.4). Für bestehende und auch neue thermische Netze sollte die Rücklauftemperatur respektive die Temperaturspreizung ausgewertet und überwacht werden (siehe Kapitel 0). Anhand dieser Auswertung sind Optimierungspotenziale und Fehlfunktionen in Übergabestationen schnell erkennbar. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die resultierenden Rücklauftemperaturen in der Praxis oft unnötig hoch sind, und für den Betreiber betriebswirtschaftliche Folgen hat. Die Gründe für unnötig hohe Rücklauftemperaturen sind sehr unterschiedlich aber häufig einfach erkennbar. Insbesondere primärseitige Mängel müssen schnell erkannt und können vom Betreiber in Eigenregie behoben werden.

Tabelle 3.3 Richtwerte und Praxiswerte für Rücklauftemperaturen.

| Wärmeverbund                       |            | Rücklauftemperatur |
|------------------------------------|------------|--------------------|
| KVA > 10 MW                        | Praxiswert | 55-65°C            |
| Holzfeuerung mit Abgaskondensation | Praxiswert | > 45°C             |
|                                    | Zielwert   | ≤ 45°C             |
| Neubau-Quartier                    | Praxiswert | > 38°C             |
|                                    | Zielwert   | ≤ 35°C             |

### 3.1.3 Temperaturspreizung

Die Festlegung der Vorlauf- und der Rücklauftemperaturen in den Technischen Anschlussvorschriften sind von elementarer Bedeutung für die Planung eines thermischen Netzes. Die Höhe der transportierten Wärmeleistung ergibt sich bei einem begrenzten Volumenstrom aus der Differenz der jeweils vorliegenden Vor- und Rücklauftemperatur.

Die Wassermenge respektive der maximale Volumenstrom sind nach der Realisierung durch die gewählte Leitungsdimension begrenzt. Die transportierbare Wärmemenge variiert mit der Temperaturspreizung (siehe Bild 3.1). Insbesondere beim Einsatz von Wärmepumpen werden aus Effizienzgründen möglichst tiefe Vorlauftemperaturen angestrebt. Ziel ist deshalb eine möglichst tiefe Rücklauftemperatur aus den angeschlossenen Kundenanlagen zu erhalten, was in einer möglichst grossen Temperaturspreizung resultiert. Der Kompensation einer unzureichenden Temperaturspreizung durch eine Erhöhung des Massenstroms sind hydraulische Grenzen gesetzt und hat in jedem Fall eine negative Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit.

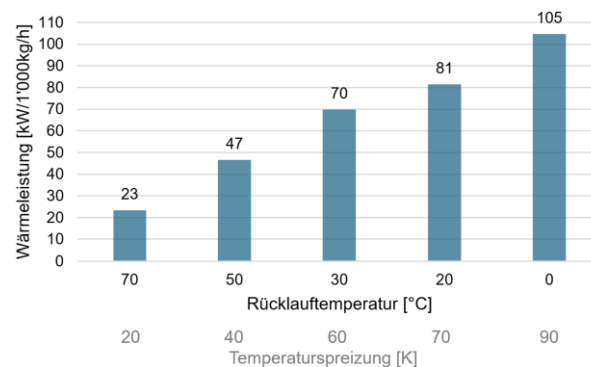


Bild 3.1 Beispielhafte Darstellung der nutzbaren Wärmeleistung in kW bei einem Massenstrom von 1'000 kg/h und einer Vorlauftemperatur von 90°C bezogen auf unterschiedliche Rücklauftemperaturen.

### 3.1.4 Temperaturabsenkung

Insbesondere städtische Fernwärmenetze werden heute noch mit Heisswasser und Vorlauftemperaturen von über 140°C betreiben. Dies hat neben hohen Wärmeverlusten auch hohe Investitionskosten bei Anpassungen oder Erweiterungen aufgrund erhöhter Sicherheitsanforderungen und aufwändiger Bauweise (zum Beispiel Betonkanal) zur Folge. Diese aufwändigere

Bauweise ist ab Vorlauftemperaturen unter 140°C (Einsatz von KMR möglich) grundsätzlich nicht erforderlich. Die erhöhten Sicherheitsanforderungen reduzieren sich dann bei einer Auslege-Vorlauftemperatur < 110°C deutlich.

Wichtig ist, dass im gleichen Masse wie die Vorlauftemperatur auch die resultierende Rücklauftemperaturen reduziert werden können. Der Wärmeleistungsbedarf der angeschlossenen Kundenanlagen wird sich durch die Reduktion der Vorlauftemperaturen ohne zusätzliche Massnahmen nicht reduzieren. Wenn dies nicht im gleichen Masse möglich ist, wenn nun die Temperaturspreizung im thermischen Netz kleiner wird, ist die mögliche Transportkapazität durch hydraulische Randbedingungen wie spezifische Druckverluste in Pa/m oder den Nenndruck der Komponenten begrenzt. Es kann nicht mehr gleichviel Wärmeleistung übertragen werden.

**Hinweis:** Vielfach führen Temperaturabsenkungen in bestehenden thermischen Netzen zu höheren Massenströmen und grösseren dynamischen Druckverlusten.

Raumheizungs- und Brauchwarmwasseraufbereitungsanlagen auf der Kundenseite, welche nach anerkannten Regeln der Technik installiert und betrieben werden, dürften heute meist mit Vorlauftemperaturen ab 65°C bis maximal 70°C ohne Komforteinbusse funktionieren. In Einzelfällen ist eine Vorlauftemperaturerhöhung vor

Ort zu prüfen. Jedoch weisen bestehende Übergabestationen, bei einer geplanten Temperaturabsenkung, aufgrund ihrer ursprünglichen Auslegung vielfach eine zu geringe Wärmeübertragungsfläche auf und sind zu prüfen und gegebenenfalls auszutauschen. Dasselbe gilt auch für die Auslegung weiterer Komponenten wie zum Beispiel das primäre Regelventil und der Wärmezähler, bei denen die Auslegung ebenfalls zu prüfen und gegebenenfalls auszutauschen sind.

Als Beispiel sei hier die Vorlauftemperaturabsenkung im Fernwärmenetz Zürich West zu nennen (vgl. [104]), welches von 160°C auf 105°C abgesenkt wurde. Dabei mussten rund 80 Übergabestationen umgebaut werden. Ein weiteres Beispiel betrifft die Vorlauftemperaturabsenkung im Fernwärmenetz der IWB in Basel im Gebiet Kleinhüningen (vgl. [105]), welches Schrittweise von 170°C auf 115°C abgesenkt wurde. Es mussten dabei teilweise Kundenanlagen betreut respektive umgebaut werden.

## 3.2 Netzfahrweise

Die Vorlauftemperatur ist in den Technischen Anschlussvorschriften (TAV) festzuhalten. Für den Verlauf der Netzlauftemperatur sind grundsätzlich drei Fahrweisen gebräuchlich (siehe Bild 3.2).

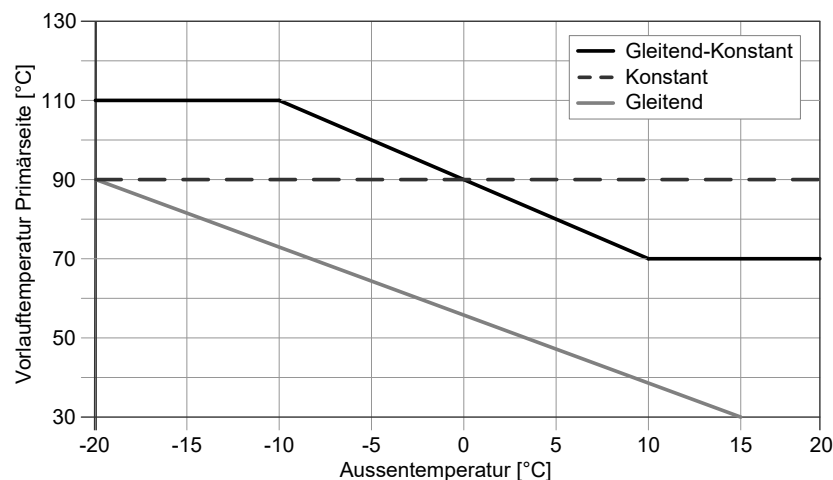


Bild 3.2 Vorlauftemperatur beim Kunden in Funktion der Aussentemperatur für die drei unterschiedlichen Fahrweisen: gleitend-konstant, konstant und gleitend.

### 3.2.1 Gleitende Fahrweise

Die Vorlauftemperatur wird in Abhängigkeit der Aussentemperatur geregelt. Bei sinkender Aussentemperatur wird die Vorlauftemperatur gleitend bis zum Maximalwert angehoben. Steigt die Aussentemperatur, so wird die Netzlauftemperatur gleitend gesenkt, bis die Heizgrenze erreicht und die Wärmeversorgung eingestellt wird. Die gleitende Fahrweise ist somit nur zur Versorgung von Raumwärme oder anderen witterungsabhängig Verbrauchern geeignet. Für witterungsunabhängige und ganzjährige Verbraucher wie Prozesse oder Brauchwarmwasser ist die gleitende Fahrweise ungeeignet.

### 3.2.2 Gleitend-Konstante Fahrweise

Die Vorlauftemperatur wird innerhalb festgelegter Grenzwerte in Abhängigkeit von der Witterung geregelt. Bei fallender Aussentemperatur wird die Netzlauftemperatur gleitend bis zum Maximalwert angehoben. Bei steigender Aussentemperatur wird sie gleitend bis zum Minimalwert abgesenkt. Der Minimalwert wird durch die mindestens vorzuhaltende Vorlauftemperatur bestimmt, zum Beispiel für Prozesse oder Brauchwarmwasser. Die gleitend-konstante Fahrweise ist die gebräuchlichste Fahrweise und sie erlaubt die gleichzeitige Versorgung für Raumwärme, Brauchwarmwasser und Prozesse.

Als Führungsgrösse für die Netzvorlauftemperatur wird eine über eine 12- bis 25-Stunden gemittelte Aussentemperatur verwendet. Auf keinen Fall sollte die aktuell gemessene Aussentemperatur verwendet werden.

### 3.2.3 Konstante Fahrweise

Die Vorlauftemperatur wird unabhängig von der Aussentemperatur konstant gefahren. Prinzipiell können alle gebräuchlichen Kunden oder Gebäude angeschlossen werden, wenn die angebotene (konstante) Vorlauftemperatur für den Verwendungszweck ausreicht. Eine Vorlauftemperaturregelung entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Kunden ist in der Hausstation vorzusehen. Aufgrund der konstanten Fahrweise ist es möglich, die vorzuhaltende Wärmeleistung auch bei höheren Aussentemperaturen anzubieten, was insbesondere bei Prozessen oder Brauchwassererwärmung von Bedeutung ist. Diese Fahrweise führt allerdings in der Übergangszeit und im Sommerbetrieb zu erhöhten Wärmeverteilungsverlusten und ist wenn möglich auf eine gleitend-konstante Fahrweise umzubauen.

## 3.3 Pumpen

Für den Wasserumlauf in thermischen Netzen werden Umwälzpumpen verwendet, die von einem Elektromotor angetrieben werden. Diese werden entweder bei konstanter Drehzahl betrieben oder sie sind – was heute vorgeschrieben ist – stufenlos regelbar. Das Bild 3.3 zeigt einen typologischen Überblick der Bauarten und Einsatzgebiete der verschiedenen Pumpentypen in Abhängigkeit der Förderhöhe und des Volumenstroms. Nebst der Unterscheidung zwischen axialer und radialer Bauform wird dabei auch zwischen Trockenläufer- und Nassläuferpumpen unterschieden.

### 3.3.1 Bauarten

Für grössere thermische Netze kommen Trockenläuferpumpen zum Einsatz. Diese sind über Welle und Kupplung mit einem Norm-Motor verbunden, wobei zwischen den Bauarten Sockelpumpe (Motor und Pumpe auf einem Sockel montiert) und Inline-Pumpe (Motor an eine Rohreinbaupumpe montiert) unterschieden wird. Die Tabelle 3.4 zeigt die typischen Förderhöhen und Volumenströme der Pumpentypen, wobei die Werte für eine Einzelpumpe gelten. Je nach Konfiguration in Serie- oder Parallelschaltung sind höhere Werte erreichbar, wie aus Bild 3.3 hervorgeht. In der Gebäudetechnik und auch in kleinen thermischen Netzen kommen auch Nassläuferpumpen zum Einsatz, bei denen die Rohreinbaupumpe mit dem sogenannten Spaltrohrmotor eine Einheit bilden. Das geförderte Medium schmiert dabei die Lager und kühlt gleichzeitig den Motor.

Tabelle 3.4 Typische Förderhöhen und Volumenströme der verschiedenen Pumpentypen nach [106].

| Pumpentyp               | Förderhöhe<br>in m | Volumenstrom<br>in m <sup>3</sup> /h |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| <b>Trockenläufer</b>    |                    |                                      |
| Inline-Pumpe einstufig  | < 140              | < 4000                               |
| Inline-Pumpe mehrstufig | < 480              | < 340                                |
| Block-Pumpe einstufig   | < 190              | < 1200                               |
| Normpumpe               | < 340              | < 1400                               |
| <b>Nassläufer</b>       |                    |                                      |
|                         | < 20               | < 80                                 |

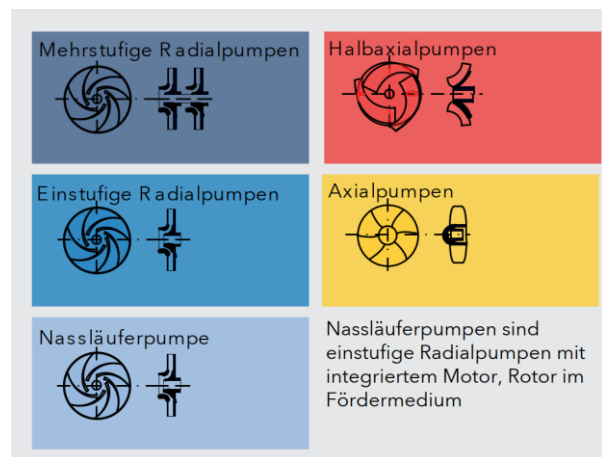
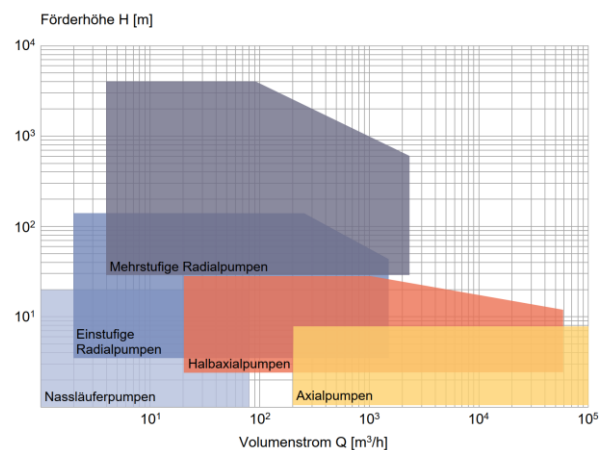


Bild 3.3 Typologie von Pumpen unterteilt nach Förderhöhe und Volumenstrom. Eigene Grafik in anlehnung an [106].

### 3.3.2 Energieeffizienz

Seit dem 1. Juli 2021 wurden in der Schweiz die Anforderungen an die Energieeffizienz von Elektromotoren durch die Synchronisation der EnEV mit der Verordnung (EU) 2019/1781 schrittweise erhöht [106]. Seit dem 1. Juli 2021 ist:

- für Motoren mit einer Nennleistung ab 0.12 kW bis weniger als 0.75 kW mindestens Effizienzklasse IE2 vorgeschrieben.
- für Motoren mit einer Nennleistung ab 0.75 kW bis 1'000 kW mindestens die Effizienzklasse IE3 vorgeschrieben. In diesem Leistungsbereich ist die bisher erlaubte Kombination von einem IE2-Motor mit einem Frequenzumrichter nicht mehr zulässig.

Seit dem 1. Juli 2023 müssen zudem Motoren mit einer Nennleistung von mindestens 75 kW bis höchstens 200 kW die Effizienzklasse IE4 (oder besser) haben.

Seit dem 1. Juli 2021 müssen auch Frequenzumrichter, die für den Betrieb mit Motoren von 0.12 kW bis 1'000 kW ausgelegt sind, mindestens die Effizienzklasse IE2 für Frequenzumrichter erfüllen.

## 3.4 Pumpenauslegung

### 3.4.1 Pumpenkennlinie

Die Pumpenkennlinie zeigt die Förderhöhe in Funktion des Volumenstromes. Es kann zwischen flachen und steilen Pumpenkennlinien unterschieden werden (Bild 3.4). Je steiler die Pumpenkennlinie, desto grösser sind die Druckschwankungen und die Störung des hydraulischen Netzes, wenn sich der Volumenstrom ändert. Für die Regelung der Druckdifferenz ist jedoch eine steile Kennlinie von Vorteil.

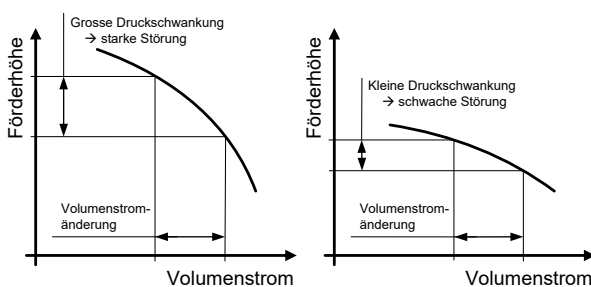


Bild 3.4 Pumpenkennlinie: steil (links) und flach (rechts).

### 3.4.2 Anlagenkennlinie

Die Druckverluste des Netzes steigen mit dem Volumenstrom. Diese Abhängigkeit wird in der Anlagenkennlinie dargestellt. Da sowohl die Pumpenkennlinie als auch die Anlagenkennlinie die Abhängigkeit zwischen Druck (Förderhöhe) und Volumenstrom beschreiben, lassen sich beide in das gleiche Koordinatensystem eintragen (Bild 3.5). Beide Kennlinien haben einen gemeinsamen Schnittpunkt. Dieser ist der Betriebspunkt der Pumpe. Im Betriebspunkt ist die Förderhöhe der Pumpe genauso gross wie der Druckverlust der Anlage.

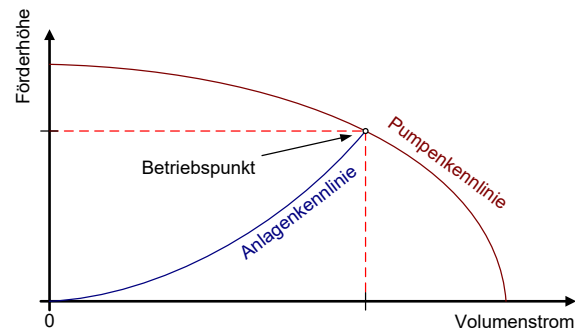


Bild 3.5 Pumpen- und Anlagenkennlinie im selben Koordinatensystem.

### 3.4.3 Proportionalitätsgesetze

Bei der Änderung der Drehzahl einer Umwälzpumpe verhalten sich die Förderhöhe, der Volumenstrom und die hydraulische Leistung entsprechend der folgenden drei Proportionalitätsgesetze.

Der Volumenstrom verhält sich proportional zur Drehzahl der Pumpe:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Die Förderhöhe (Druckdifferenz) verändert sich mit dem Quadrat der Drehzahl:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

Die hydraulische Pumpenleistung ändert sich mit der 3. Potenz der Drehzahl:

$$\frac{P_{hydr 1}}{P_{hydr 2}} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3$$

Bei halber Drehzahl sinkt also der Volumenstrom auf die Hälfte, die Förderhöhe, also der Druckabfall, sinkt auf ein Viertel und der Leistungsbedarf der Pumpe auf ein Achtel (siehe Bild 3.6).

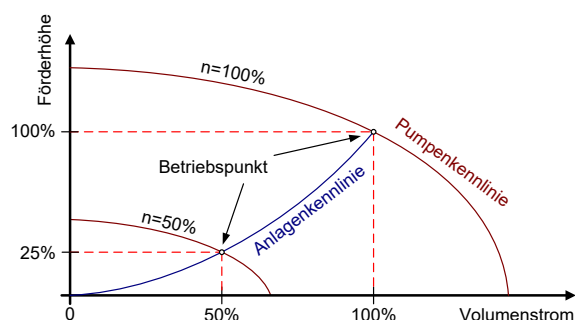


Bild 3.6 Pumpen- und Anlagenkennlinie für zwei verschiedene Drehzahlen.

### 3.4.4 Leistungsbedarf Pumpen

Der notwendige Volumenstrom der Fernleitungspumpe ergibt sich aus dem Durchfluss des gesamten Wärmenetzes, also dem notwendigen Durchfluss in der ersten Teilstrecke unmittelbar nach der Fernleitungspumpe. Der für die Auslegung der Pumpe relevante Volumen-

strom ergibt sich aus dem aufzubringenden Wärmebedarf der Kunden und der zu kompensierenden Wärmeverluste im Netz am kältesten Tag im Jahr bei einer definierten Temperaturspreizung im Netz wie folgt:

$$\dot{V}_P = \frac{\dot{Q}_N}{\rho_W c_{pW} \Delta T_N}$$

Die notwendige Förderhöhe der Fernleitungspumpe ergibt sich aus der Summe von:

- Druckverlust zum ungünstigsten Kunden oder sogenannten Schlechtpunkt SP (ungünstigste Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitung).
- Notwendige Druckdifferenz über dem Hausanschluss des ungünstigsten Kunden.
- Weitere, bisher nicht berücksichtigte Druckverluste vor der Fernleitungspumpe, wie Regelventil der Vorregelung, Speicher, Anschlussleitungen, Schmutzfänger, Wärmezähler etc., welche sich meistens in der Energiezentrale befinden.

$$H_P = \frac{\Delta p_{SP} + \Delta p_{HA} + \Delta p_{WE}}{\rho_W g} = \frac{\Delta p_P}{\rho_W g}$$

Damit ist der Betriebspunkt bei Auslegebedingungen bekannt und es können Fernleitungspumpen mit geeigneten Pumpenkennlinien gesucht werden.

Da der Wirkungsgrad von Pumpen (hydraulischer und elektrischer Wirkungsgrad) eine starke Abhängigkeit vom Volumenstrom aufweist, ist für die Auslegung darauf zu achten, dass die Pumpe einerseits den Volumenstrom und die Förderhöhe im Auslegepunkt erreicht und andererseits im häufigsten Betriebspunkt, bei thermischen Netzen in der Regel bei Teillast, einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Die Angaben zum hydraulischen Wirkungsgrad werden von den Herstellern durch Messungen auf dem Prüfstand bestimmt und wird in der Pumpenkennlinie ausgewiesen. Der höchste Wirkungsgrad liegt bei Pumpen für thermische Netze in der Regel zwischen 65% bis 85%. Für eine Abschätzung kann ein Wirkungsgrad (hydraulisch und elektrisch) von 75% angewendet werden.

Die Förderleistung der Pumpe kann aus dem Volumenstrom und der Förderhöhe folgendermassen berechnet werden:

$$P_P = \frac{\Delta p_P \dot{V}_P}{\eta_{hydr} \eta_{hydr}} = \frac{H_P \rho_W g \dot{V}_P}{\eta_{hydr} \eta_{hydr}} = \frac{H_P \rho_W g \dot{V}_P}{\eta_P}$$

### 3.4.5 Energiebedarf Pumpen

Wichtig ist der Einsatz hoch effizienter Pumpen, welche im Auslegepunkt und vor allem im hauptsächlichen Arbeitspunkt in Teillast einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Jedenfalls lohnt es sich Pumpen miteinander zu vergleichen (siehe Bild 3.7), denn kleinere Pumpen haben tendenziell tiefere Wirkungsgrade als grössere. So erzielen Kleinpumpen auch im besten Betriebspunkt kaum über 50%. Eine wesentliche Verbesserung, auch bei Kleinpumpen, ergibt neuerdings der

Einsatz von Gleichstrom-Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotor.

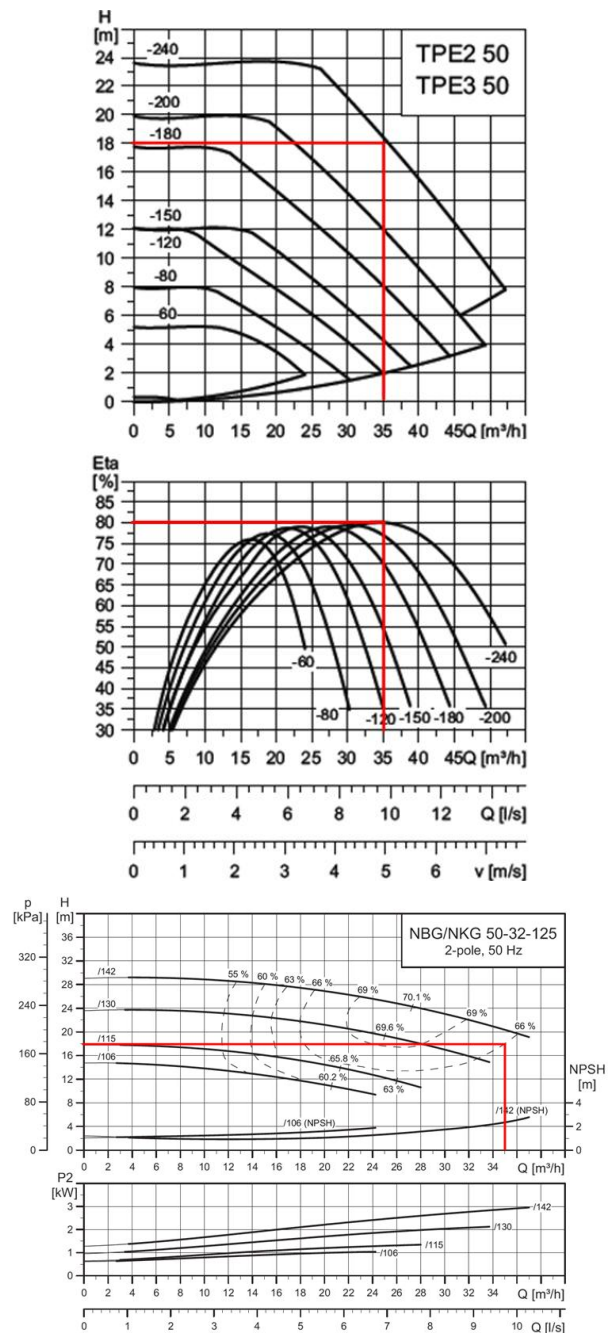


Bild 3.7

Beispiel für zwei Pumpen mit einer Förderhöhe von 18 m und einem Volumenstrom von 35  $m^3/h$  [Quelle Grundfos]. Je nach Bauart und nach Lage des Arbeitspunktes ergeben sich unterschiedliche Wirkungsgrade:

80 % (oben): Inline-Pumpe mit dem Laufrad-Durchmesser 240 mm und hocheffizientem Permanentmagnetmotor.

66 % (unten): Normpumpe mit Laufrad-Durchmesser 125 mm mit Norm-Motor IE3 (Asynchronmotor).

Der Jahresenergiebedarf der Pumpen wird bestimmt über die aufsummierten Mittelwerte der resultierenden Durchflussmengen und Förderdrücken aus der Jahres-

dauerlinie des Netzes. Dabei nehmen die Betriebsart der Pumpen und der pumpenspezifische Wirkungsgrad Einfluss auf den Strombedarf. Als überschlägige Näherung des Pumpenstrombedarfs genügt folgende Beziehung, in der die nominale Pumpenleistung mit den Vollbetriebsstunden der Kunden multipliziert wird:

$$E_P = P_P \cdot \tau_{WA}$$

Aus Erfahrung beträgt, bei einer optimalen Auslegung des thermischen Netzes, der jährliche Energiebedarf der Pumpen zwischen 0.5% bis 1.0% der verteilten Wärme.

### 3.4.6 Besonderheiten Auslegung

Fernleitungspumpen sind das Herzstück von thermischen Netzen. Ohne deren sichere Funktionsweise ist eine Wärmelieferung nicht möglich. In diesem Abschnitt wird auf Besonderheiten bei der Auslegung und Gestaltung von Pumpen bei thermischen Netzen eingegangen, um auch bei sich ändernden Betriebszuständen die Versorgung sicherstellen zu können.

Bei thermischen Netzen wird dies am Anfang bei der Entwicklung des Netzes deutlich, wenn mit einer noch kleinen Anzahl von Kunden der Betrieb aufgenommen wird. Oft ist hierbei bereits eine Pumpeneinheit für den späteren Ausbau geplante Netzdimensionierung realisiert. Dies bedeutet, dass der Betrieb mit geringen

Volumenströmen und deutlich geringeren Differenzdrücken im Netz aufgenommen wird.

#### Problematik Überstrom

Wie im vorangehenden Abschnitt aufgeführt, sollten Pumpen bei den typischen Betriebsfällen zwar im Bereich eines hohen Wirkungsgrades betrieben werden. Es sollte jedoch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass bei einem schwach ausgelasteten beziehungsweise einem noch nicht im geplantem Endausbau befindlichen Netz, der erforderliche Pumpendruck gering ausfällt. Hierbei kann infolge geringen hydraulischen Netzwiderstandes und bei spezifisch hohem Volumenstrom der Pumpenstrom ansteigen und die Grenze des Überstromschutzes des Pumpenmotors übersteigen. Um den Pumpbetrieb robuster zu gestalten empfiehlt sich den Betriebspunkt (Anlagenkennlinie) der Pumpe in einem signifikanten Abstand zum maximalen Volumenstrom  $Q_{Max}$  zu wählen. Dadurch kann eine Grenzüberschreitung der Stromaufnahme des Motors vermieden werden. Ein geringfügig geminderter Pumpenwirkungsgrad muss hierfür in Kauf genommen werden. Die Überstromgrenze muss auch im Teillastfall berücksichtigt werden, da dem Motor mit reduzierter Drehzahl eine reduzierte Stromaufnahme möglich ist (Bild 3.8).

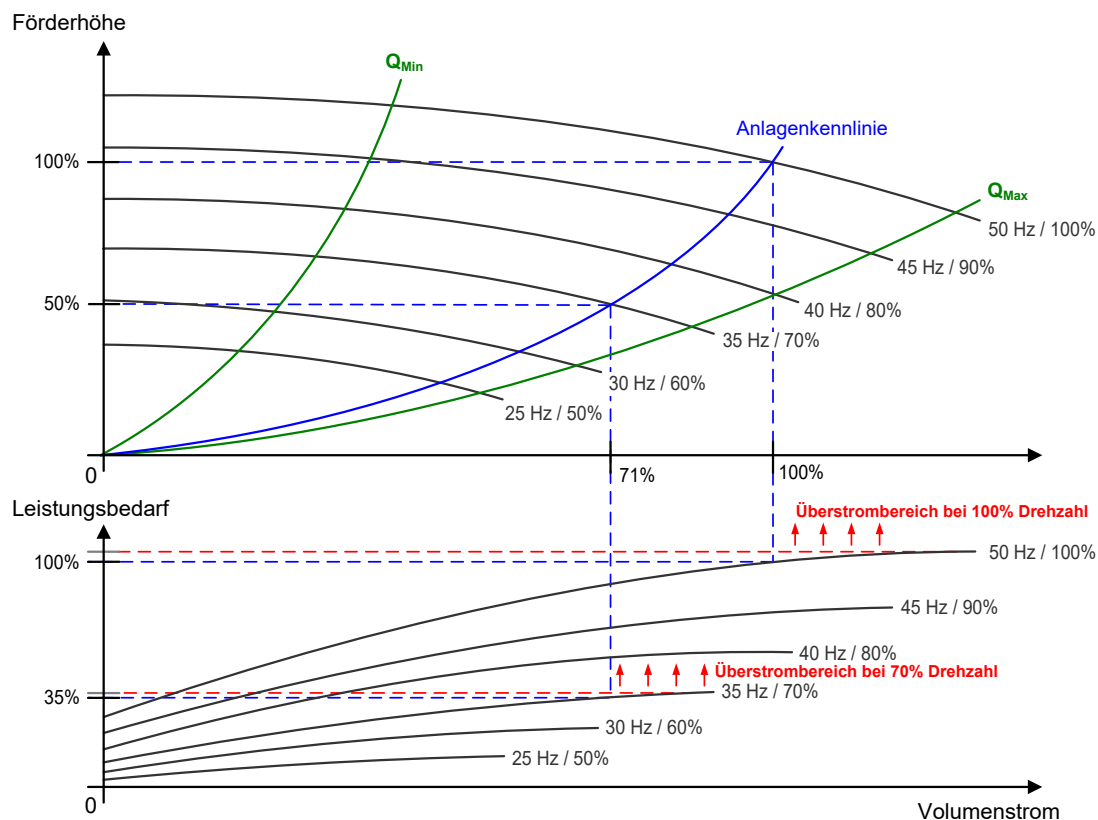


Bild 3.8 Beispielhaftes Pumpenkennlinienfeld für eine drehzahlgeregelte Pumpe. Zu sehen ist die Förderhöhe (oben) und der Leistungsbedarf (unten) in Abhängigkeit des Volumenstromes sowie die Darstellung vom maximal ( $Q_{Max}$ ) und minimal ( $Q_{Min}$ ) zulässigen Volumenstrom der Pumpe (oben). Weiter ist beispielhaft eine Anlagenkennlinie (Blau) und der Bereich Überstrom eingetragen.

### Zulaufgeschwindigkeit

Bei Vorhandensein einer genügenden Drucküberlagerung bei Fernwärmepumpen kann Kavitation vermieden werden. Jedoch kann bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten beim Pumpenzulauf, aber auch beim Pumpenausstritt Schäden durch Kavitation und Erosion auftreten. Es empfiehlt sich daher zur Gestaltung eines robusten Pumpenbetriebes, die Zulaufquerschnitte und auch die Austrittsquerschnitte so zu wählen, dass sich im normalen Betriebsfall keine besonders hohen Zulaufgeschwindigkeiten ( $> 3 \text{ m/sec.}$  bei DN100) und Austrittsgeschwindigkeiten einstellen. Durch die Wahl des Zulauf- und Austrittsquerschnittes, und damit auch die konstruktive Gestaltung der Pumpen, sofern im Planungsablauf wählbar, werden die Pumpen für allfällige hohe Volumenströme verträglicher.

### Minimalvolumenstrom

Pumpenhersteller geben für die Betriebsweise der Pumpen leistungsabhängige Minimalvolumenströme  $Q_{\text{Min}}$  vor (Bild 3.8). Diese liegen bei typischen Pumpen für thermische Netze bei 25% des Maximalvolumenstromes. Der Minimalvolumenstrom dient einerseits dem Schutz der Pumpe vor Überhitzung, andererseits dient er dem Schutz der Gleitringdichtungen, die auf Schmierung und Kühlung durch das Eigenmedium angewiesen sind. Unterschreitungen des Minimalvolumenstromes sollten unter Berücksichtigung der Medientemperatur vermieden und abgesichert werden, z.B. durch einen Systembypass für den Fall geringen Netzvolumenstromes.

## 3.5 Pumpenregelung

Grundsätzlich wird zwischen unregelten und geregelten Umwälzpumpen unterschieden. Ungeregelte Pumpen weisen zwar bei Teillastbetrieb oft einen höheren Wirkungsgrad auf als geregelte, sie eignen sich aber nur, wenn der Durchfluss um weniger als einen Faktor 2 variiert wie etwa als Heizungsumwälzpumpe mit Leistungen von maximal 400 W [61].

In thermischen Netzen kommen dagegen ausschliesslich drehzahlgeregelte Pumpen zur Anwendung. Bei der Auslegung ist darauf zu achten, dass die Pumpen im Praxisbetrieb einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Je nach Verbrauchercharakteristik sollte der Auslegungsbetriebspunkt dazu im hinteren Drittel der Pumpenkennlinie liegen, um einen grossen Regelbereich zu ermöglichen und, wie aus Bild 3.9 erkennbar, gleichzeitig bei der im Praxisbetrieb wichtigen Teillast einen hohen Wirkungsgrad sicher zu stellen. Daneben ist grundsätzlich auf die effizienteste Energieklasse der Motoren zu achten.

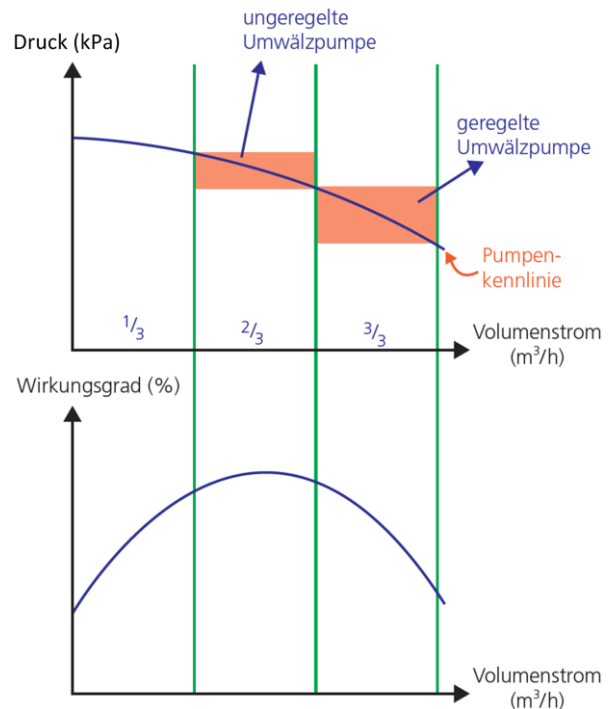


Bild 3.9 Empfohlene Bereiche zur Auslegung von unregulierten und geregelten Pumpen nach [61]. Die Unterteilung erfolgt in einem vorderen, mittleren und hinteren Bereich (Grüne Linien).

### Ungeregelte Umwälzpumpen (Bild 3.10 oben)

Bei unregulierten Umwälzpumpen befindet sich der Betriebspunkt immer auf der Pumpenkennlinie. Das heisst, der Volumenstrom und die Förderhöhe verändern sich nicht. Ungeregelte Umwälzpumpen werden eingesetzt, wenn die hydraulischen Parameter konstant bleiben, also zum Beispiel bei Warmwasserladung oder einer Hauptpumpe bei differenzdruckloser Verteilung.

### Geregelte Umwälzpumpen (Bild 3.10 Mitte und unten)

Geregelte Umwälzpumpen passen die Förderhöhe bei ändernden Lastzuständen im hydraulischen Kreis laufend an. Die Pumpendrehzahl wird dabei stufenlos mittels eines Frequenzumrichters angepasst und stellt sich für jeden Teillastbetriebspunkt wieder neu ein und passt so die elektrische Leistungsaufnahme an. Dafür ist eine volumenstromabhängige Differenzdruckregelung notwendig, mit welcher der effektive Bedarf umso genauer abgebildet werden kann, je näher die Differenzdruckmessung bei den massgebenden Kunden und damit oft bei den weitest entfernten Kunden ist. Alternativ können die Hube aller Stellglieder über Stellungsrückmeldungen aller Kunden ausgewertet und für die Volumenstromregelung verwendet werden.

Bei einer Differenzdruckregelung über der Pumpe wird grundsätzlich zwischen folgenden verschiedenen Betriebsarten unterschieden:

- Regelung mit konstantem Betriebsdruck oder auch Konstantdruckregelung (Bild 3.10 Mitte): Dabei wird der Differenzdruck über der Pumpe bei sich änderndem Volumenstrom konstant gehalten. Der Be-

triebspunkt folgt im Teillastbereich der konstant gehaltenen Pumpenregelkennlinie horizontal nach links. Diese Betriebsart kommt in der Regel bei kleineren Heizungsanlagen zum Einsatz.

- Regelung mit proportionalem Betriebsdruck oder auch Proportionaldruckregelung (Bild 3.10 unten): Bei dieser Regelungsart sinkt der Differenzdruck über der Pumpe mit abnehmendem Volumenstrom und steigt mit zunehmendem Volumenstrom an. Der Betriebspunkt folgt im Teillastbereich der proportionalen Pumpenregelkennlinie abfallend nach links. In der Regel sind Pumpen mit Proportionaldruckregelung effizienter als Pumpen mit Konstantdruckregelung. Bei dieser Regelungsart und gleichzeitigem Einsatz von differenzdruckunabhängigen Regelungsventilen, ist zu beachten, dass der erforderliche Mindestdruck nicht unterschritten wird.

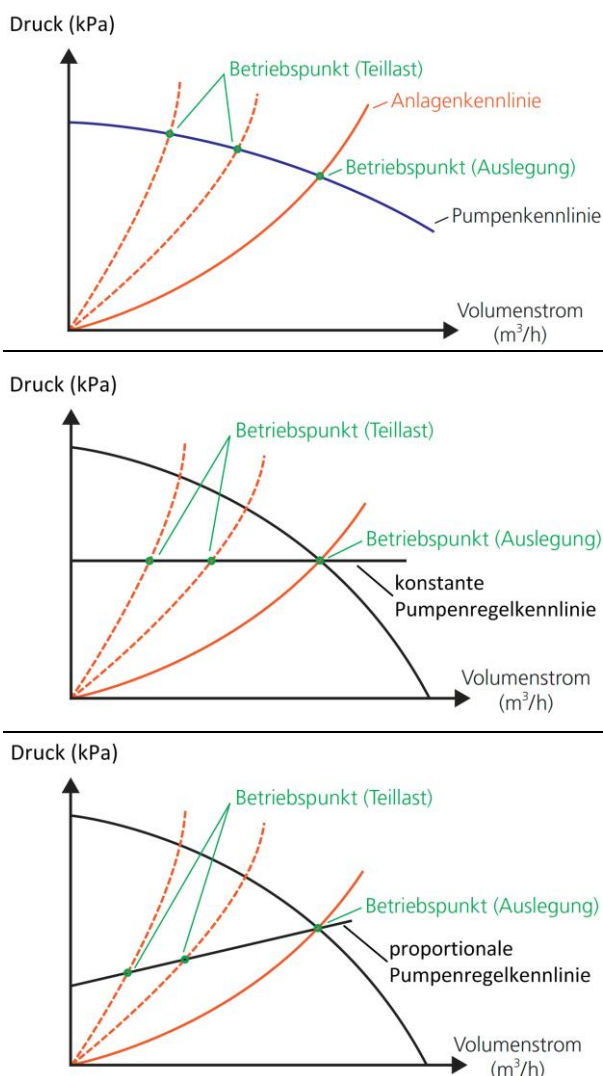


Bild 3.10 Pumpendiagramm mit Darstellung des Betriebs mit unterschiedlicher Regelung nach [61].  
Oben: ungeregelte Pumpe  
Mitte: Konstantdruckregelung  
Unten: Proportionaldruckregelung

## 3.6 Pumpenschaltung

In thermischen Netzen werden grundsätzlich mehrere Netzpumpen in einer Pumpeneinheit eingesetzt, sofern folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Parallelschaltung zweier Pumpen, wenn jeweils nur eine Pumpe in Betrieb ist. Die zweite Pumpe wird als Reserve-Pumpe (Redundanz) eingesetzt.
- Parallelschaltung mehrerer Pumpen, wenn mehrere Pumpen zur Erreichung des geforderten Volumenstromes günstiger sind (Wirkungsgrad, Kosten).
- Serienschaltung mehrerer Pumpen, wenn mehrere Pumpen zur Erreichung der geforderten Förderhöhe günstiger sind (Wirkungsgrad, Kosten).

Die Betriebssicherheit (Redundanz) kann mit einer oder mehrerer parallel angeordneten Reservepumpen gewährleistet werden, (siehe Kapitel 3.6.3).

### 3.6.1 Parallelschaltung

Die Parallelschaltung von Pumpen ist in thermischen Netzen mit hohem Volumenstrombedarf und verhältnismässig geringer Förderhöhe (flache Netzkennlinie) vorteilhaft. Die parallel angeordneten Pumpen (inklusive einer Reservepumpe) sollten dabei den gleichen Pumpentyp aufweisen. Die Pumpen können lastabhängig mit einer Drehzahlregelung anhand einer Druckdifferenzmessung oder Stellgliedrückmeldung im Netz wie folgt betrieben werden:

- Kleine Last: Drehzahlgesteuerter Betrieb einer einzelnen Pumpe (Regelbereich A in Bild 3.11)
- Grössere Last: Ansteuerung beider in Betrieb stehender Pumpen mit synchroner Drehzahl (Regelbereich B in Bild 3.11).

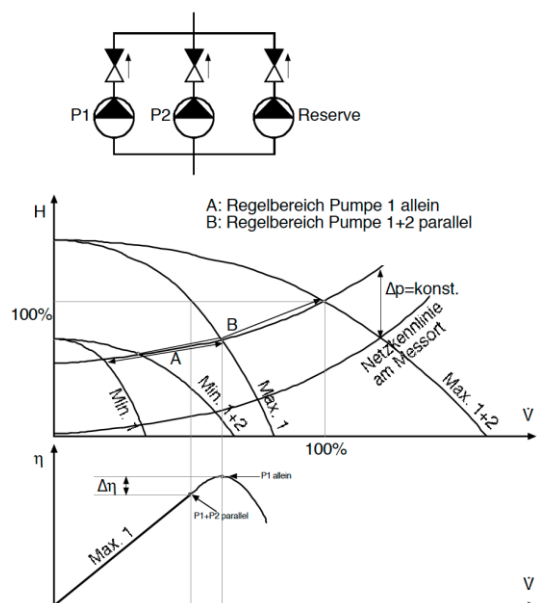


Bild 3.11 Parallelschaltung von zwei Pumpen und einer Reservepumpe.  $\Delta p$  = konstant entspricht dem Druckverlust der Übergabestation beim massgebenden Kunden (i.d.R. entferntester Kunde).

Ein gemischter Betrieb (eine Pumpe drehzahlgesteuert, die zweite Pumpe auf Maximaldrehzahl) ist bei Parallelschaltung nicht zulässig.

### 3.6.2 Serienschaltung

Die Serienschaltung (Reihenschaltung) von Pumpen ist in thermischen Netzen mit grosser Förderhöhe und verhältnismässig geringem Volumenstrom (steile Netzkennlinie) vorteilhaft.

Beispielsweise ist auch eine Druckerhöhungspumpe in der Peripherie des Netzes mit der Hauptpumpe in Serie geschaltet.

Bei einer Serienschaltung der Pumpen als Einheit nach Bild 3.12 wird parallel zu jeder Pumpe ein Bypass mit automatischer Absperrklappe angeordnet. Eine Reservepumpe wird dabei so angeordnet, dass sie die Funktion jeder einzelnen Pumpe übernehmen kann und die in Serie geschalteten Pumpen gegenseitig umschaltbar sind. Alle Pumpen sollten den gleichen Pumpentyp aufweisen.

Die Pumpen können lastabhängig mit einer Drehzahlregelung anhand einer Druckdifferenzmessung oder Stellgliedrückmeldung im Netz wie folgt betrieben werden:

- Kleine Last: Eine drehzahlgesteuerte Pumpe allein (Regelbereich A in Bild 3.12)
- Grössere Last: Gemeinsame Ansteuerung beider in Betrieb stehender Pumpen mit synchroner Drehzahl (Regelbereich B in Bild 3.12)
- Grössere Last (als Alternative): Drehzahlsteuerung einer Pumpe, die zweite Pumpe wird mit Maximaldrehzahl betrieben.

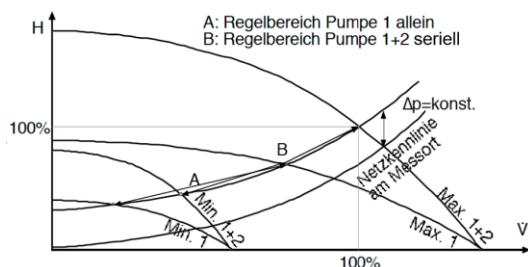
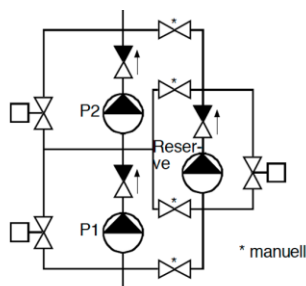


Bild 3.12 Serienschaltung von zwei Pumpen und einer Reservepumpe.  $\Delta p$  = konstant entspricht dem Druckverlust der Übergabestation beim massgebenden Kunden (i.d.R. entferntester Kunde).

### 3.6.3 Redundanz und Ausbau

Da die Pumpen für den Betrieb eines thermischen Netzes von zentraler Bedeutung sind, wird eine **Redundanz** der Netzpumpen empfohlen. Bei Ausfall einer Pumpe kann das Netz vollumfänglich weiter betrieben werden. Als Redundanzstellungen sind gebräuchlich:

- 2 x 100% der Nominalleistung
- 3 x 50% der Nominalleistung
- 4 x 33% der Nominalleistung.

Die Anordnung 3 x 50% oder 2 x 100% usw. ist Gegenstand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Gerade bei grossen Netzen bietet sich 3 x 50% bzw. 4 x 33% an, da bei grossen Pumpen die Investitionskosten überproportional ansteigen und da Bedienung und Wartung für kleinere Pumpeneinheiten einfacher sind. Hinzu kommt, dass bei in Entwicklung befindlichen Netzen in den ersten Betriebsjahren oft nur ein Bruchteil der Pumpleistung des Vollausbaus benötigt wird. Somit kann für die ersten Jahre oft eine Pumpengruppe mit 2 x 33% Pumpleistung installiert werden. Damit können die Anfangsinvestitionen reduziert, die Pumpen effizienter betrieben und später weitere Pumpen bei Bedarf installiert werden.

Für kleine Netze kann aus Kostengründen auch eine Redundanzstellung 2 x 80% verwendet werden, so dass bei Ausfall einer Pumpe (jedoch) nur 80% der Pumpleistung zur Verfügung steht.

Weiter zu beachten ist auch die Etappierung und der **Ausbau des Netzes** auf der Zeitachse. Bei einer nicht weiter bekannten Anlage wurde eine Anordnung nach 20% plus 2 x 40% gebaut und dann noch einen Platz für den Ausbau des Netzes gelassen. Da der Ausbau oft viel länger dauert, teilweise länger als die Lebensdauer einer Pumpe und nach Erfahrung genug Sicherheiten eingerechnet sind, ist eine Erweiterung der Pumpenanlage vielfach später notwendig. Wichtig ist deshalb die Ausbaugeschwindigkeit des Netzes zu berücksichtigen und dass jeder "Sicherheitszuschlag" (bei Druckverlust, Heizlast, Temperaturspreizung etc.) am Ende Strom und Investitionskosten hervorruft. Also lieber erstmal mit weniger Pumpen anfangen und gute Voraussetzungen für einen flexiblen Ausbau schaffen.

### 3.6.4 Schwachlast- / Sommerpumpe

Üblicherweise beträgt die Minimaldrehzahl von Umwälzpumpen zirka 25% der maximalen Drehzahl. Daraus definiert sich ein minimaler Betriebspunkt in Abhängigkeit der Anlagenkennlinie. An diesem Betriebspunkt weisen Umwälzpumpen oft einen schlechten Wirkungsgrad auf. Bei thermischen Netzen mit einer grossen Differenz zwischen maximalem und minimalem erforderlichen Volumenstrom, kann es deshalb sinnvoll sein, neben den vorgängig erwähnten Pumpengruppen, welche auf den Maximalbedarf ausgelegt sind, eine separate, kleinere Umwälzpumpe für den reinen Schwachlast- respektive Sommerbetrieb vorzusehen. Diese Pumpe ist auf den anlagenspezifischen Schwach-

lastbetrieb auszulegen. Siehe dazu auch die Ausführungen in Kapitel 3.7.4.

In jedem Fall ist zu beachten, dass das Pumpenkennfeld der Schwachlastpumpe und der Hauptpumpe(n) sich überlappen.

### 3.6.5 Pumpenregelung bei mehreren Einspeisepunkten

Verfügt ein zusammenhängendes thermisches Netz über mehr als eine Energiezentrale an unterschiedlichen Standorten muss dies bei der Regelung der verschiedenen Pumpengruppen beachtet werden. Gibt es wie in Bild 3.13 eine Grund- und eine Spitzenlastzentrale ist beispielhaft folgendes Pumpenregelkonzept anwendbar:

#### Grundlastbetrieb:

Nur Pumpengruppe in Grundlastzentrale in Betrieb. Regelung der entsprechenden Pumpengruppe anhand einer oder mehrerer Differenzdruckmessungen im Netz oder anhand der Stellung der Regelorgane.

#### Redundanzbetrieb:

Nur Pumpengruppe in Spitzenlastzentrale in Betrieb. Regelung der entsprechenden Pumpengruppe anhand einer oder mehrerer Differenzdruckmessungen im Netz oder anhand der Stellung der Regelorgane.

#### Spitzenlastbetrieb:

Pumpengruppen in beiden Zentralen in Betrieb. Regelung der Pumpengruppe in der Spitzenlastzentrale (bedarfsabhängig) anhand einer oder mehrerer Differenzdruckmessungen im Netz oder anhand der Stellung der Regelorgane. Regelung der Pumpengruppe in der Grundlastzentrale (produktionsabhängig) zum Beispiel mit einer Nulldurchflussregelung am Speicher.

Entscheidend ist, dass die beiden Gruppen im parallelbetrieb nicht auf dieselbe Regelgröße regeln.

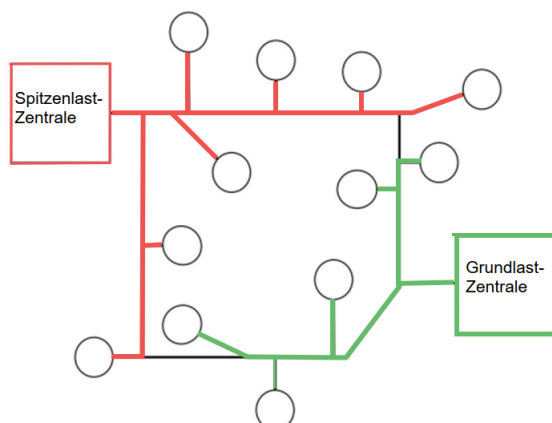


Bild 3.13 Thermisches Netz mit zwei Energiezentralen an unterschiedlichen Standorten.

## 3.7 Netzregelung

In einem thermischen Netz benötigen die indirekt angeschlossenen Kunden einen Differenzdruck über die Wärmeübergabestation. Dieser minimale Differenzdruck beträgt in der Regel zwischen 0.4 und 1 bar. Das Netz wird so geregelt, dass an jeder Wärmeübergabestation der minimal erforderliche Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf vorhanden ist.

An einer Stelle im Netz befindet sich der geringste Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf. Diese Stelle wird Netzschlechtpunkt oder kurz Schlechtpunkt genannt. Dieser kann in Funktion des momentanen Wärmebedarfs im Netz wandern. Im Bereich des Netzschlechtpunktes treten am ehesten Versorgungsengpässe auf, weshalb an der der minimal erforderliche Differenzdruck gehalten werden muss.

Der Differenzdruck wird von den Netzpumpen aufgebracht. Für die Regelung der Netzpumpen bieten sich verschiedene Konzepte an:

- Drehzahlregelung der Pumpen mit einer Differenzdruckmessung über die Pumpen und Regelung anhand einer konstanten oder proportionalen Pumpenregelkennlinie.
- An einer oder mehreren Referenzmessstellen kann im Netz eine Differenzdruckmessung installiert werden, die auf die Drehzahlregelung der Pumpen in der Zentrale wirken. Referenzmessstellen sind von der Zentrale entfernt liegende Stellen im Netz (Netzschlechtpunkt/e oder kurz Schlechtpunkte).
- Als Alternative oder als Führungsgröße für einen Führungsregler kann bei ausgewählten oder je nach Situation auch bei allen Übergabestationen die Ventilstellung des Primärventils erfasst werden. Mit einem Leitsystem werden die Ventilstellungen erfasst und ausgewertet. Anhand der Auswertung der Ventilstellung erfolgt dann die Regelung der Netzpumpen auf den erforderlichen Differenzdruck. Wichtig ist, dass der erforderliche minimale Wirkdruck (Ventil), in jedem Betriebszustand, gewährleistet ist.

Bei sternförmig verzweigten Verteilnetzen bietet sich eine pro Netzzweig separate Druckregelung an. Für jeden Netzzweig wird eine individuelle Druckregelung realisiert. Dadurch wird vermieden, dass einzelne Netzzweige mit zu grossen Differenzdrücken und erhöhtem Strombedarf der Pumpen betrieben werden. Es muss jedoch für jeden Zweig eine eigene Pumpengruppe installiert werden.

Bei Netzanordnungen mit mehreren Einspeisepunkten muss regelungstechnisch ein Einspeisepunkt für die Druckregelung als Master deklariert werden. Der zweite und jeder weitere Einspeisepunkt fördert nach einem Kennfeld bzw. nach Vorgabe eine bestimmte Wärmeleistung in das Netz. Der Algorithmus der Einspeisung von mehreren Punkten in das Netz muss zudem berücksichtigen, dass zwischen den Einspeisepunkten keine Unterversorgungen durch Strömungsstillstand

auftreten. Wie in Kapitel 3.6.5 beschrieben kann der Master für die Pumpenregelung in Abhängigkeit des Betriebsszenarios wechseln.

### 3.7.1 Regelkonzept

Der Netzbetrieb erfolgt, wie in Kapitel 3.2 gezeigt, in der Regel witterungsgeführt und zeitprogrammgesteuert. Die Realisierung der Vorregelung kann dabei folgendermassen erfolgen:

- übergeordnetes MSR-System
- SPS der Feuerung
- separaten Einzelregler

Werden mehrere Pumpen eingesetzt, gilt es beim regelungstechnisch anspruchsvollen Zu- und Wegschalten der einzelnen Pumpen folgendes zu beachten:

- Minimierung der Druckschwankungen im Netz im Umschaltzeitpunkt durch möglichst verzögerungsfreie Anpassung der geforderten Drehzahl. Die nachfolgenden Punkte stehen dabei teilweise im Widerspruch zu dieser Forderung.
- Verhinderung von Pumpenüberlastungen im Umschaltzeitpunkt: Wenn Pumpe 1 eine gewisse Zeit auf Maximaldrehzahl betrieben wird, diese zuerst auf die minimal Drehzahl für den Einsatz mit Pumpe 2 reduzieren und erst dann Pumpe 2 auf minimal Drehzahl zuschalten und anschliessend gemeinsam auf die geforderte Drehzahl hochfahren.
- Unter allen Umständen muss ein Betrieb im hinteren Drittel der Pumpenkennlinie verhindert werden, weil dies zur Beschädigung der Pumpe infolge elektrischer Überlastung führen kann.
- Verhinderung von zu häufigem Zu- und Wegschalten der Pumpen durch geeignete Umschaltkriterien und entsprechende Zeitverzögerungen.

Dieses Zu- und Wegschalten bewirkt, dass sich die Betriebspunkte der einzelnen Pumpen und damit auch deren Wirkungsgrade ändern. Damit stellt sich die Frage, wie die Pumpen am effizientesten betrieben werden können. Eine eindeutige Antwort gibt es nicht, allgemein gilt jedoch:

- Das Wirkungsgrad-Optimum liegt in der Regel im mittleren Drittel der Kennlinie für die höchste Drehzahlstufe. Wenn der Arbeitspunkt in diesen Bereich gelegt wird, bedeutet dies für drehzahlgesteuerte Pumpen:
  - Solange sich die Regelbereiche A «Pumpe 1 allein» und B «Pumpe 1 + 2» überschneiden, ist «Pumpe 1 allein» besser (Bild 3.11 und Bild 3.12).
  - Bei Serienschaltung ist von Fall zu Fall abzuklären, ob es sich lohnt, die Differenzdruckregelung für eine Pumpe allein auszulegen und die zweite Pumpe mit Maximaldrehzahl zu betreiben.

- Das Wirkungsgrad-Optimum ist für den Betriebsfall mit der höchsten Betriebsstundenzahl zu wählen. Wenn bei der Parallelschaltung «Pumpe P1 allein» auf das Wirkungsgrad-Optimum bei der Maximaldrehzahl ausgelegt wird, ergibt der gemeinsame Betrieb «P1 + P2 parallel» auf Maximaldrehzahl eine Wirkungsgradeinbusse.
- Um den Verschleiss baugleicher Pumpen ausgeglichen zu verteilen, sollten die Betriebszeiten durch das Umschalten der Prioritäten gleichmässig verteilt werden.

### 3.7.2 Messort der Differenzdruckregelung

Der Messort oder die Messorte der Differenzdruckregelung sind so zu wählen, dass die Druckdifferenzschwankung im Netz nur so gross ist, dass in jedem Betriebspunkt ein einwandfreier Betrieb ohne Über- und Unterversorgung gewährleistet ist. Je nach Wahl des Messortes können Störungen unterschiedlich kompensiert werden:

- Bei der Druckdifferenzmessung im thermischen Netz wird die Druckdifferenz parallel zur Netzkennlinie am Messort konstant gehalten (Bild 3.14). Damit ergibt sich bezüglich der Pumpe eine nach hinten geneigte Pumpenregelkennlinie. Sobald der Durchfluss im Netz sinkt, wird die Förderhöhe der Pumpe in ähnlichem Mass reduziert, wie der Druckabfall im Netz abnimmt und somit der Betriebspunkt der Pumpe der Anlagenkennlinie folgt. Vergleichbar ist das Verhalten mit einer proportionalen Pumpenregelkennlinie wie in Bild 3.10 unten.
- Bei der Konstantdruck- oder Proportionaldruckregelung erfolgt die Druckdifferenzmessung zwangsläufig über die Pumpe. Dies ergibt eine horizontale respektive eine nach hinten abfallende Pumpenregelkennlinie. Es werden also nur Störungen kompensiert, die durch die Steilheit der Pumpenkennlinie verursacht werden.
- Bei der Druckdifferenzmessung im Vorlauf und Rücklauf bei der Pumpe in der Energiezentrale werden auch Störungen kompensiert, die durch das hydraulische Netz vor dem Messort (Druckabfall über Armaturen, Wärmezähler etc.) verursacht werden.

#### Fazit:

Die Drehzahlregelung der Pumpen über einen konstanten Differenzdruck beim Netzschlechtpunkt oder über die Auswertung der Ventilstellung der Primärventile bei den Kunden ist die effizientere aber aufwändigere Lösung als direkt über den Pumpen mit einer Konstantdruck- oder Proportionaldruckregelung.

Bei einer Veränderung der Kundenstruktur (Verdichtung oder Stilllegung) oder auch im Teillastfall kann der Netzschlechtpunkt ‚wandern‘. Insbesondere bei einer Veränderung der Kundenstruktur muss geprüft werden, ob die Pumpenregelkennlinie der neuen Situation angepasst werden muss.

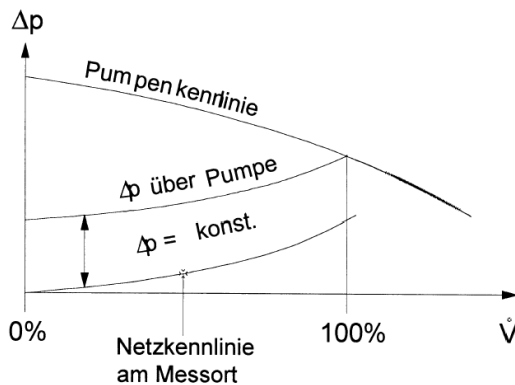


Bild 3.14 Beispiel einer Druckdifferenzmessung in einem Wärmenetz.  $\Delta p = \text{konstant}$  entspricht dem Druckverlust der Übergabestation beim massgebenden Kunden (i.d.R. entferntester Kunde).

### 3.7.3 Thermische Netze mit stark variablem Durchfluss und hoher Vorlauftemperatur

Der Durchfluss in grossen thermischen Netzen mit mehreren Pumpen ist oft sehr stark variabel, während die Vorlauftemperatur nur mit vergleichsweise kleinen Änderungen in Abhängigkeit der Aussentemperatur verändert werden kann (siehe Bild 3.15). In diesem Fall ist es vorteilhaft, wenn die beiden Dreiwegeventile zu- und wegschaltbar sind. Beim Zu- und Wegschalten eines Dreiwegeventils ergibt sich ein Durchfluss-Sprung, der durch eine Sequenz-Regelung entschärft werden kann. Die beiden parallel geschalteten Dreiwegeventile werden über den Sequenz-Regler mit zwei Ausgängen zwischen 0% und 100% angesteuert. Die Sequenz und die Zu- und Wegschaltung der beiden Dreiwegeventile erfolgt nach den nachstehenden Punkten:

- Regelung des kleineren Dreiwegeventils über Reglerausgang 1.
- Zuschaltung des grösseren Dreiwegeventils und Wegschalten des kleineren Dreiwegventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung)  $>$  Durchfluss bei maximal vorgegebenem Druckabfall über kleineres Dreiwegeventil.
- Regelung des grösseren Dreiwegeventils über Reglerausgang 2.
- Zuschaltung des kleineren Dreiwegeventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung)  $>$  Durchfluss bei maximal vorgegebenem Druckabfall über grösseres Dreiwegeventil.
- Regelung beider Dreiwegeventile gemeinsam über Reglerausgang 2.
- Wegschaltung des kleineren Dreiwegeventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung)  $<$  Durchfluss bei minimal

vorgegebenen Druckabfall über beide Dreiwegeventile.

- Regelung des grösseren Dreiwegeventils über Reglerausgang 2.
- Wegschaltung des grösseren Dreiwegeventils und Zuschalten des kleineren Dreiwegventils, wenn Durchfluss Fernleitung (Signal Durchfluss-Messung Wärmezähler Fernleitung)  $<$  Durchfluss bei minimal vorgegebenem Druckabfall über grösserem Dreiwegeventil.
- Regelung des kleineren Dreiwegeventils wieder über Reglerausgang 1.

Das Zu- und Wegschalten der Dreiwegventile kann alternativ über das Erfassen der Druckdifferenz über die Dreiwegventile erfolgen, wobei die gleiche Logik wie beschrieben zur Anwendung kommt.

In beiden Fällen sind in den Bypässen wie in Bild 3.15 dargestellt zur Vermeidung von Fehlzirkulationen automatisierte Absperrorgane erforderlich.

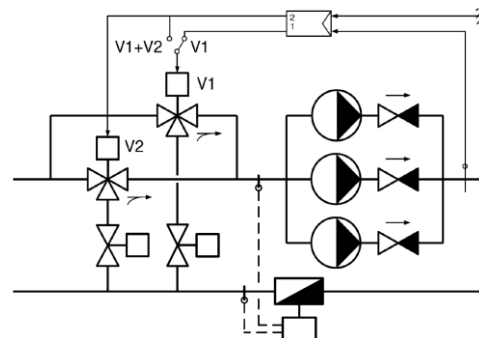


Bild 3.15 Parallel geschaltete Netzpumpen mit zwei Regelventilen zur Verbesserung der minimal regelbaren Wärmeleistung.

### 3.7.4 Getrennte Fernleitungsgruppen für Winter- und Sommerbetrieb

Für einen energetisch optimalen Sommerbetrieb mit wesentlich kleinerem Volumenstrom (weniger als 20% des Gesamtvolumenstroms) ist der getrennte Betrieb einer parallel dazu angeordneten drehzahlgesteuerten Sommerpumpe vorteilhaft (siehe Bild 3.16):

- Der regelungstechnische Aufwand kann einfacher gestaltet werden (keine Sequenz, sondern manuelle Umschaltung zwischen Sommer- und Winterbetrieb).
- Die Fernleitungspumpe für den Winterbetrieb sollte beim Auslegepunkt den Wärmeverbund zu 100% mit Wärme versorgen können (keine Parallelschaltung von zwei Fernleitungspumpen, evtl. Ersatzpumpe installieren).
- Das Dreiwegeventil und die Fernleitungspumpe für den Sommerbetrieb können entsprechend der Anforderung im Sommer dimensioniert werden.
- Bei der Vorregulierung einer Fernleitung mit Sommerbetrieb wird der Einbau von zwei Ventilen emp-

fohlen, wenn der maximale Sommer-Wärmeleistungsbedarf  $\leq 10\%$  des maximalen Winter-Wärmeleistungsbedarfs ist.

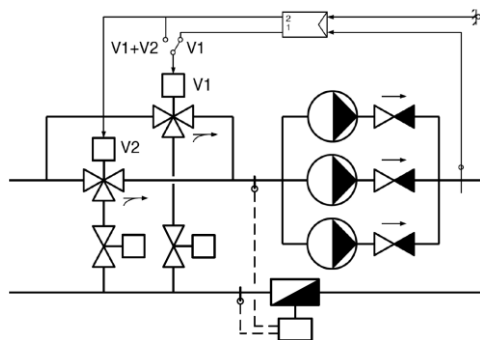


Bild 3.16 Parallel geschaltete Sommer- und Winterpumpe mit zwei Regelventilen zur Verbesserung der minimal regelbaren Wärmeleistung.

### 3.8 Nenndruck

Rohrleitungen sowie Komponenten wie Flansche, Ventile, Schieber und andere Armaturen sind nach SN EN 1333 [107] in bestimmten Nenndruckstufen festgelegt, die mit PN für „Pressure Nominal“ bezeichnet werden. Die Nenndruckstufe bestimmt die minimale Wandstärke und Abmessungen der Rohre, Flansche, Armaturen, etc.

Für die Auslegung aller unter Druck stehenden Komponenten ist jedoch der maximal zulässige Betriebs- und Prüfdruck massgebend, der gemäss Druckgeräteverordnung [87] mit PS oder auch MOP (Maximum Operating Pressure) bezeichnet wird. Der maximal zulässige Betriebsdruck wird vom Hersteller des Bauteils festgelegt. Rohrleitungen fallen jedoch nicht unter die Druckgeräteverordnung.

Die Druckgeräteverordnung [87] entspricht sinngemäss der Europäischen Druckgeräte-Richtlinie 97/23/EG (DGRL) auf deren Basis Leitlinien [108] erarbeitet wurden. Zum Begriff Standarddruckgeräte macht die Leitlinie unter Punkt 1.17 folgende Aussage: Ein Standarddruckgerät ist nicht speziell für eine bestimmte Fernleitung zur Durchleitung von Fluiden ausgelegt und gebaut, sondern ist zur Verwendung in einer Reihe von Anwendungen einschliesslich anderer Fernleitung zur Durchleitung von Fluiden oder zum Beispiel für Rohrleitungen in der Industrie vorgesehen. Typische Beispiele für Standarddruckgeräte bei Fernleitungen, Druckregelstationen oder Kompressorstationen sind:

- Messvorrichtungen
- Ventile
- Druckregler
- Sicherheitsventile
- Filter
- Wärmeübertrager
- Behälter

Thermische Netze mit Stahl-Medienleitungen (KMR und MMR) werden, sofern keine anderen Anforderungen vorliegen, auf PN 16 festgelegt obwohl die Rohrleitungen in der Regel bis PN 25 einsetzbar sind. Komponenten (Armaturen, Ventile, etc.) bis DN 150 sind in Ausführung PN 16 entweder baugleich oder nicht wesentlich aufwändiger oder teurer als solche mit niedrigerer Druckstufe. Bei grösseren Nenndurchmessern oder grösseren Nenndruckstufen (zum Beispiel PN 25) erhöhen sich die Komponentenpreise jedoch merklich. Hausanlagen und Übergabestationen in höheren Druckstufen als PN 16 sind deshalb teurer und auch im Betrieb aufwändiger. Für die Hauptkomponenten der Heizzentrale (insbesondere Kessel und Speicher) sind aus Kostengründen möglichst tiefe Nenndrücke anzustreben.

Wichtige Kriterien für die Wahl des Nenndruckes sind die geodätischen Gegebenheiten, die maximalen Vorlaufdrücke und die erforderliche Drucküberlagerung des Netzes.

Thermische Netze mit Kunststoff-Medienleitungen (PMR) weisen üblicherweise eine geringe Druckstufe von PN 6 auf und sind auch nur in relativ kleinen Nenndurchmessern bis rund DN 150 erhältlich. Seit kurzem sind auch PMR-Rohre mit Aramidfaserverstärkung auf dem Markt, welche eine höhere Druckstufe bis PN 10 respektive PN 16 aufweisen.

Im Einzelfall kann auf einen höheren Druck als der Nenndruck (PN) ausgelegt werden, falls die äusseren Randbedingungen bekannt sind und ein Berechnungsnachweis zeigt, dass die maximal zulässigen Drücke (PS) eingehalten werden. Ansonsten gelten die Nenndruckangaben (PN) der Rohre und Armaturen als maximal zulässiger Betriebsdruck.

### 3.9 Druckverlauf im thermischen Netz

Das Druckschaubild stellt in der Regel die Druckverhältnisse im Netz in Funktion der Distanz zwischen dem Eisepunkt ab Netzpumpe (Energiezentrale) und dem Schlechtpunkt (weitest entfernter Kunde) dar. Im Beispiel in Bild 3.17 ist die Pumpe im Vorlauf eingebunden. Die Druckhaltung befindet sich im Rücklauf und sorgt für einen konstanten Druck in der Zentrale vor den Pumpen (Vordruckhaltung). Mit sich ändernder Abnahmeleistung schwanken der Mitteldruck im Netz und damit der Druckverlauf bei allen Wärmeübergabestationen. Das gestapelte Druckschaubild ist in unterschiedliche Bereiche unterteilt:

- **Prüfdruck:** Der Druck bei der das gesamte thermische Netz oder Abschnittsweise auf Dichtheit geprüft wird. Der Prüfdruck entspricht in der Regel dem 1.5-fachen des maximal zulässigen Betriebsdruckes [109] und wird über eine Dauer von 24 Stunden beaufschlagt.
- **Grenzdruck im Störfall (MIP):** Maximaler durch Sicherheitseinrichtungen begrenzter Druck, der in

einem System kurzfristig auftreten kann (Maximum Incidental Pressure).

- **Maximal zulässiger Betriebsdruck (MOP):** An keiner Stelle im Netz darf der Druck den maximal zulässigen Betriebsdruck der Leitung und der installierten Anlagenteile im normalen Betrieb überschreiten. Der maximal zulässige Betriebsdruck richtet sich nach der Nenndruckstufe und ist abhängig von der Netzlänge, der Betriebstemperatur und nach den geodätischen Verhältnissen im Netz. Dieser sollte aus wirtschaftlichen Gründen möglichst tief gewählt werden. Typische Nenndruckstufen bei thermischen Netzen sind PN16 oder PN25. Rohre und insbesondere Anlagenkomponenten ab PN 25 verteuern das Netz erheblich und sollten nur eingesetzt werden, wenn die Bedingungen es zwingend erfordern (siehe auch Kapitel 3.8 Nenndruck). Fehlfunktionen bei der Netzdruckregelung können zu überhöhten Drücken führen. Bei Pumpen welche bei maximaler Förderhöhe und statischem Druck über den maximal zulässigen Betriebsdruck gehen können, wird empfohlen einen Sicherheitspressostaten einzusetzen, welcher direkt die Netzpumpe(n) verriegelt.
- **Druckverlauf Vorlauf:** Stellt den Druckverlauf des Vorlaufs von der Energiezentrale bis zum Hausanschluss, welcher als Schlechtpunkt definiert wurde, dar (entspricht dem Druckabfall infolge Druckverlust in den Leitungen und Einbauten).
- **Differenzdruck Hausstation:** Der Druckunterschied zwischen Vor- und Rücklauf am Ende beim Kunden ist durch den minimal notwendigen Differenzdruck über der Hausstation definiert. Der minimale Differenzdruck bei einer Hausstation kann 0.7 bis 1.0 bar betragen (siehe Kapitel 5.4.6.3).
- **Druckverlauf Rücklauf:** Stellt den Druckverlauf des Rücklaufs vom Hausanschluss bis zur Energiezentrale dar (entspricht dem Druckabfall infolge Druckverlust in den Leitungen und Einbauten).
- **Druckverlust Netz:** Der Druckverlust des Netzes entspricht dem dynamischen Druck und ändert sich je nach Last. Er setzt sich zusammen aus den Leitungsverlusten und dem minimalen Differenzdruck des massgebenden Kunden und ist durch die Pumpe aufzubringen. Der maximale dynamische Druck ist im Auslegepunkt zu erwarten.
- **Statischer Druck:** Der statische Druck ergibt sich aus der Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt (Höhendifferenz) im thermischen Netz (Druck der Wassersäule).
- **Minimaler Betriebsdruck:** Setzt sich zusammen aus dem statischen Druck und einem Sicherheitszuschlag zur Vermeidung von Unterdruckbildung, Verdampfung und Kavitation an der höchsten Stelle im Netz. Das heisst, an der höchsten Stelle des Netzes muss der Druck des Fernwärmewassers um mindestens 0,5 bar höher sein als der Dampfdruck bei der Netz-Auslegetemperatur (siehe Bild 3.17). Wegen gewissen Regeltoleranzen der Druckhaltung und für instationäre Übergangs- und Einschwingvorgänge bei unerwarteten Ereignissen wird eine zusätzliche Sicherheit von bis zu 1 bar empfohlen. Der minimale Betriebsdruck entspricht je nach Situation dem Ruhedruck der Druckhaltung.
- **Gesamtdruck Netz:** Der maximale Netzdruck, also die Überlagerung des statischen und dynamischen Anteils ergibt sich bei maximaler Last im Auslegepunkt und bei maximaler Netztemperatur respektive Auslegetemperatur. Der maximale Netzdruck darf in diesem Fall den maximalen Betriebsdruck nicht überschreiten.

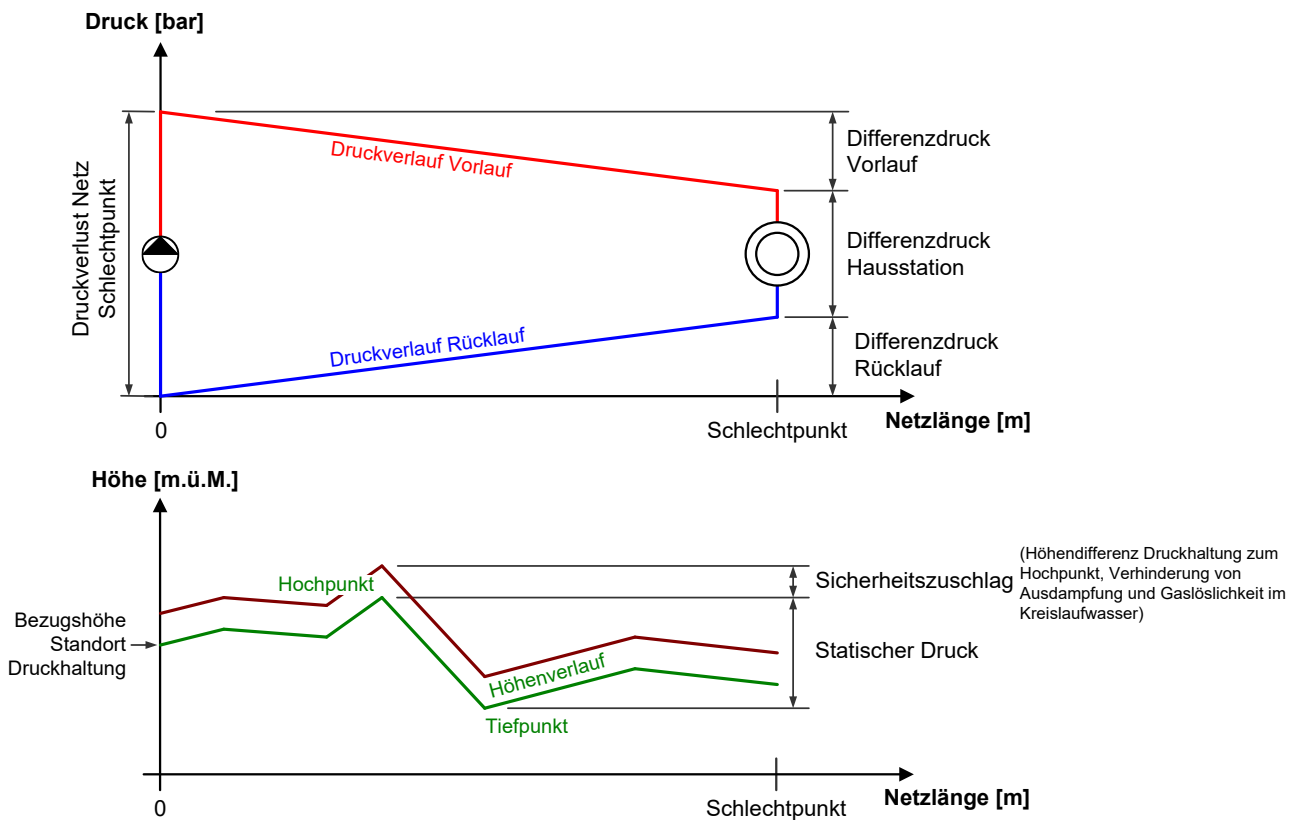


Bild 3.17 Qualitative Darstellung der Netzkennlinie (oben) als Druck in bar und des statischen Druckes (unten) als Höhenkurve in m.ü.M. in Funktion der Netzlänge zum Schlechtpunkt.

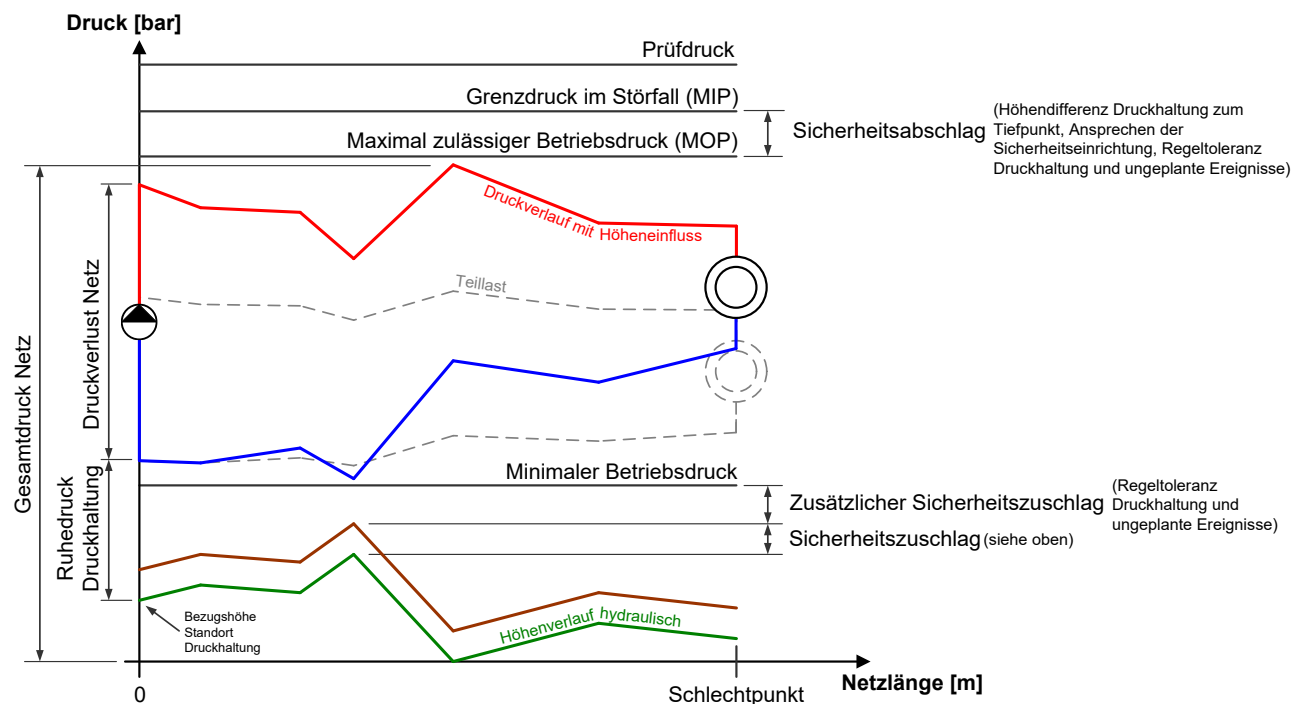


Bild 3.18 Gestapeltes Druckschaubild für ein thermisches Netz mit der Überlagerung der Höhenkurve und der Netzkennlinie in Funktion der Netzlänge zum Schlechtpunkt.

### 3.10 Druckerhöhung und Netztrennung

Bei grösseren und ausgedehnten thermischen Netzen (Nennrücke PN 25 oder gar PN 40) empfiehlt sich eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, ob der Druckverlust im Netz von den zentralen Pumpen an den Einspeisepunkten aufgebracht werden soll, oder ob dezentrale Druckerhöhungsstationen oder Systemtrennungen vorteilhaft sind. Mit dem Einsatz von Druckerhöhungsstationen und Systemtrennungen können je nach Situation Betriebs- und Investitionskosten eingespart werden.

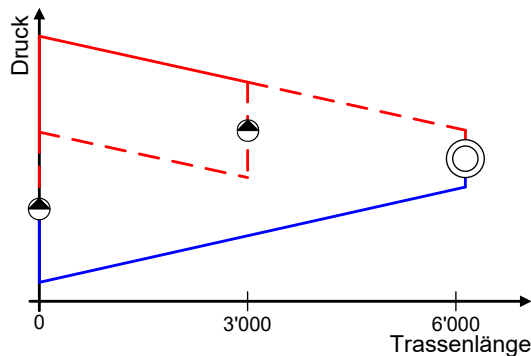


Bild 3.19 Beispiel Druckverlauf mit und ohne Druckerhöhungspumpe.

Das Beispiel im Bild 3.19 zeigt, dass mit einer Druckerhöhungspumpe ein tieferer Netzdruck als ohne Druckerhöhungspumpe vorliegt.

Eine Netztrennung beschreibt eine hydraulische Trennung zweier sonst verbundener hydraulischer Kreise. Mögliche Gründe für eine Netztrennung sind:

- Absicherung gegenüber zu hohen Drücken (Hausanschluss, geodätischer Höhenunterschied, Leitungslänge etc.)
- Trennung bei unterschiedlichen Medien (zum Beispiel Dampf-Wasser, Thermoöl-Wasser, Wasser-Ethanol-Wasser etc.)
- Andere Netzparameter (Druck, Temperatur, Wasserqualität)
- Sekundäre Netze.

Nachteilig zu betrachten ist der dabei entstehende Exergieverlust bei der Wärmeübertragung. Dieser sollte im Auslegefall möglichst klein gehalten werden, indem auf eine möglichst geringe Grädigkeit im Wärmeübertrager geachtet wird.

## 3.11 Druckhaltung

Wärmeträgermedien erfahren mit der Temperaturänderung eine vom Volumenausdehnungskoeffizienten abhängige Volumenänderung. Wasser, das mehrheitlich als Wärmeträgermedium eingesetzt wird, weist bei 4°C die höchste Dichte und somit das kleinste Volumen auf, sodass mit zunehmender Temperatur eine Volumenzunahme eintritt. Im Temperaturbereich zwischen 4°C und 30°C ist diese jedoch nur gering, während sie bei höheren Temperaturen stärker in Erscheinung tritt. In einem geschlossenen hydraulischen System muss deshalb die Volumenänderung kompensiert werden, um den Druck konstant zu halten. Die dazu eingesetzten Expansions- und Druckhalteanlagen haben daher eine zentrale Bedeutung in Heiz- und Kühlkreisläufen und erfüllen drei grundlegende Aufgaben:

- Den Druck an jeder Stelle des Anlagensystems in zulässigen Grenzen zu halten, d.h. keine Überschreitung des maximal zulässigen Betriebsüberdruckes, aber auch Sicherstellung eines Mindestdruckes zur Vermeidung von Kavitation (Unterdruck, Verdampfung, Gaslöslichkeit etc.).
- Kompensation von Volumenschwankungen des Wärmeträgermediums infolge von Temperaturschwankungen.
- Vorhalten von systembedingten Verlusten in Form einer Vorlage.

Eine sorgfältige Berechnung, Inbetriebnahme und Wartung ist Grundvoraussetzung für das richtige Funktionieren der Druckhaltung. Weitere Hinweise und Empfehlungen zur Umsetzung können dem AGFW Arbeitsblatt FW 442 Druckhaltung in Heizwasser-Fernwärmenetzen [110] entnommen werden. Nachfolgend wird auf die einzelnen Druckhaltesysteme, die Einbindung der Druckhaltung sowie auf das Nennvolumen und den Nachspeisemassenstrom der Expansionsanlage eingegangen.

### 3.11.1 Druckhaltesysteme

Es existieren unterschiedliche Druckhaltesysteme. Jedes benötigt einen Ausgleichsbehälter und ein System zum Aufrechterhalten des Ruhedruckes, zum Beispiel einen Kompressor bei Gasen oder eine Pumpe bei Flüssigkeiten. Eine Druckhaltung mit offenem oder geschlossenem Gefäß wird als statische Druckhaltung bezeichnet, eine Druckhaltung mit Druckdiktierpumpe wird als dynamische Druckhaltung bezeichnet.

Die Druckhaltesysteme sind in der Regel so abzusichern, dass bei Ausfall einer Einheit entsprechende Reservekapazitäten zur Verfügung stehen.

#### Druckhaltung mit offenem Gefäß

Bei der Druckhaltung mit einem offenen Hochgefäß wird als Ausgleichsbehälter ein offener Behälter an einem erhöhten Standort im Netz aufgestellt. Die Druckhaltetreibmittel in diesem System sind:

- Der Luftdruck, der auf die Wasseroberfläche des offenen Gefäßes drückt,
- und die Gewichtskraft des Wassers im Ausgleichsbehälter.

Der Vorteil dieses Prinzips ist die kostengünstige Bauweise, da so gut wie keine Armaturen, Regeleinrichtungen und Pumpen benötigt werden. Problematisch am offenen Hochgefäß sind das Auftreten von Korrosion im thermischen Netz durch den permanenten Sauerstoffeintritt über die Entlüftungsleitung sowie die Gefahr der Abkühlung durch die Aussenluft. Zudem ist es oft schwierig einen ausreichend hohen Standort für die Aufstellung des Hochgefäßes zu finden, um den entsprechenden Druck sicher zu stellen. Die Druckhaltung mit offenem Gefäß wird heute weitgehend vermieden und in der Regel nicht mehr angewendet.

#### Druckhaltung mit geschlossenem Gefäß

Gase lassen sich komprimieren und als Druckhaltetreibmittel in einem geschlossenen Gefäß einsetzen. Diese Eigenschaft wird bei der Druckhaltung von thermischen Netzen oft genutzt. Treten im Netz Wasserverluste auf, drückt das komprimierte Gaspolster in dem Ausgleichsbehälter auf die Wasseroberfläche. Durch den Druck gegen die Wasseroberfläche wird bei Wassermangel im thermischen Netz die benötigte Wassermenge aus dem Ausgleichsbehälter in das Netz nachgespeist. Wegen der Korrosionsgefahr durch Luft wird in der Regel ein inertes Gas wie zum Beispiel Stickstoff als Druckhaltetreibmittel verwendet. Eine weitere Massnahme ist die beiden Medien über eine Membran zu trennen (Membran-Ausdehnungsgefäß MAG).

#### Druckhaltung mit Druckdiktierpumpe

Die Druckdiktierpumpe ist zwischen Behälter und thermischen Netz eingebaut. Bei Wassermangel und damit verbundenem Druckabfall im thermischen Netz pumpt die Druckdiktierpumpe die fehlende Menge an Wasser aus dem Behälter in das Netz. Ein Zurückströmen wird durch eine Rückschlagklappe verhindert. Bei steigendem Druck im thermischen Netz öffnet sich ein Überströmventil, damit das Medium aus dem Netz in den Behälter zurückfließen kann.

### 3.11.2 Einbindung der Druckhaltung

Die hydraulische Einbindung der Druckhaltung in das Anlagensystem hat grundlegenden Einfluss auf den Verlauf des Arbeitsdruckes. Der Arbeitsdruck setzt sich zusammen aus dem Ruhedruckniveau der Druckhaltung und dem Differenzdruck, der bei Betrieb der Umwälzpumpe erzeugt wird. Dabei werden grundsätzlich drei Arten der Druckhaltung unterschieden:

- Vordruckhaltung
- Nachdruckhaltung
- Mitteldruckhaltung

Wobei in der Praxis allerdings auch noch weitere Varianten oder Kombinationen davon angewendet werden.

#### Vordruckhaltung

Die Druckhaltung wird vor der Pumpe, also saugseitig, eingebunden. Aus diesem Grund wird auch der Begriff Saugdruckhaltung verwendet. Diese Art wird fast ausschliesslich angewendet, da sie am einfachsten zu beherrschen ist.

Vorteile:

- geringes Ruhedruckniveau
- Arbeitsdruck > Ruhedruck, somit keine Gefahr von Unterdruckbildung.

Nachteil:

- bei hohem Umwälzpumpendruck (Grossanlagen) hoher Arbeitsdruck, Netzbelastung  $p_{zul}$  beachten.

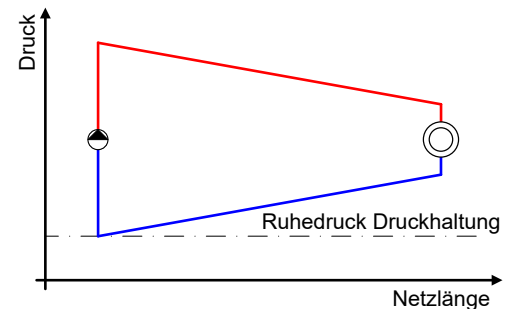


Bild 3.20 Vordruckhaltung.

#### Nachdruckhaltung

Die Druckhaltung wird nach der Pumpe, also druckseitig, eingebunden und wird auch Enddruckhaltung genannt. Bei der Ruhedruckbestimmung muss ein anlagenspezifischer Differenzdruckanteil der Umwälzpumpe (50% bis 100%) eingerechnet werden. Die Anwendung beschränkt sich auf wenige Einsatzfälle wie zum Beispiel Solaranlagen.

Vorteil:

- geringes Ruhedruckniveau, falls nicht der gesamte Pumpendruck aufgelastet werden muss.

Nachteil:

- es muss besonders auf die Einhaltung des erforderlichen Zulaufdruckes gemäss Herstellerangaben für die Pumpe geachtet werden, ansonsten droht Kavitationsgefahr.

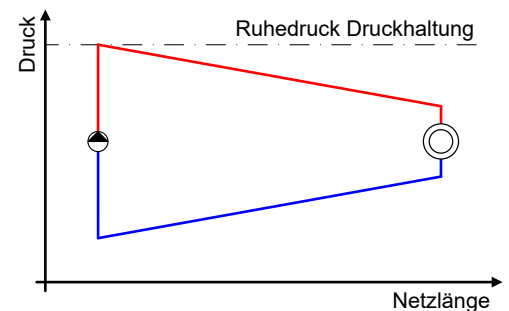


Bild 3.21 Nachdruckhaltung.

#### Mitteldruckhaltung

Der Messpunkt für das Ruhedruckniveau wird durch eine Analogiemessstrecke in die Anlage „verlegt“. Ruhe- und Arbeitsdruckniveau können damit optimal aufeinander abgestimmt und variabel gestaltet werden (symmetrische, asymmetrische Mitteldruckhaltung). Aufgrund des relativ hohen apparatetechnischen Aufwandes beschränkt sich der Einsatz auf Anlagen mit komplizierten Druckverhältnisse.

Vorteil:

- optimale, variable Abstimmung von Arbeits- und Ruhedruck.

Nachteil:

- hoher apparatetechnischer Aufwand.

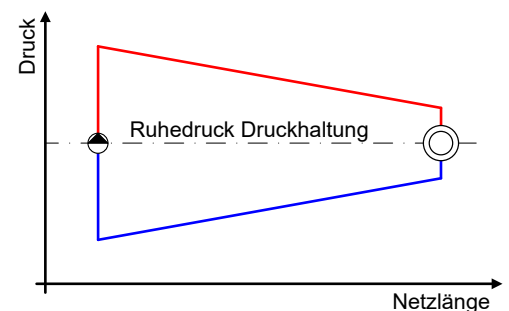


Bild 3.22 Mitteldruckhaltung.

### 3.11.3 Expansionsvolumen und Nachspeisemenge

Bei der Auslegung der Expansions- und Druckhalteinrichtung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Leistung der Heizeinrichtungen und der Kunden
- Vor- und Rücklauftemperatur, Maximaltemperatur, und Fülltemperatur
- Druckverhältnisse im System
- Medium (Wasser, Wasser-Ethanol, Wasser-Glykol, andere).

Die relevanten Parameter zur Auslegung der Expansionsanlage und Druckhaltung eines thermischen Netzes sind das Nennvolumen und die Nachspeiseleistung der Expansionsanlage.

Das **Nennvolumen der Expansionsanlage** beziehungsweise des Ausdehnungsgefäßes setzt sich aus dem theoretischen Expansionsvolumen und der zusätzlichen Wasservorlage zur Deckung von Leckagen zusammen. Weil der Druck im Ausdehnungsgefäß in der Regel durch ein Gaspolster erzeugt wird und der Wasserstand und Druck im Gasraum im Zusammenhang stehen ( $p \times V = \text{konstant}$ ), ist es nicht möglich das gesamte Volumen des Ausdehnungsgefäßes zur Wasseraufnahme zu nutzen. Das Nennvolumen wird daher um einen Faktor erweitert.

$$V_N = (\Delta V + V_{VV}) \frac{p_e + 1}{p_e - p_0}$$

Das theoretische Expansionsvolumen eines thermischen Netz ist das Nachspeisevolumen bei Energieabfuhr oder das Überströmvolumen bei Energiezufuhr durch die Temperaturänderung des Wärmeträgermediums. Das **Nachspeisevolumen** berechnet sich folgendermassen:

$$\Delta V = V_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho(T_x)} - 1 \right)$$

Wichtig ist die korrekte Erfassung des Wasserinhaltes  $V_0$ , welches die für die Berechnung des Nachspeisevolumens notwendig ist (siehe Berechnungsbeispiel auf den nächsten Seite). Dies beinhaltet das gesamte Wasservolumen im geschlossenen System, an welchem die Expansionsanlage angeschlossen ist (Wärmeübertrager, Energiespeicher, Heizkessel, Rohrleitungen, Zwischengefäß Expansion etc.).

Die **Wasservorlage** kompensiert allfällige Wasserverluste im System und sollte ungefähr 0.5% des Wasserinhaltes  $V_0$  betragen.

$$V_{VV} = 0.005 V_0$$

Der **Nachspeisemassenstrom** der Expansionsanlage ist abhängig von der zugeführten oder abgeführten Wärmeleistung, dem Volumenänderungskoeffizienten und der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums. Der Nachspeisemassenstrom ist für die Auslegung des Überströmventils und/oder der Druck-

dicktierpumpe notwendig und berechnet sich folgendermassen:

$$\dot{M} = \gamma(T_x) \frac{\dot{Q}}{c_p}$$

Der für die Berechnung des Nachspeisemassenstroms benötigte **Volumenänderungskoeffizient** ist abhängig vom Temperatur- und Dichteunterschied des Wärmeträgermediums und berechnet sich folgendermassen:

$$\gamma(T_x) = - \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \frac{1}{\Delta T} = - \frac{\rho(T_x) - \rho_0}{\rho_0 (T_x - T_0)}$$

$V_N$  = Nennvolumen [ $\text{m}^3$ ]

$\Delta V$  = Nachspeisevolumen [ $\text{m}^3$ ]

$V_{VV}$  = Volumen Wasservorlage [ $\text{m}^3$ ]

$V_0$  = Wasserinhalt [ $\text{m}^3$ ]; Gesamtes Wasservolumen im geschlossenen System

$p_0$  = minimaler Betriebsdruck [bar]; Zur Vermeidung von Unterdruckbildung, Verdampfung und Kavitation.

$p_e$  = Gesamtdruck Netz [bar]; Für die Auslegung ist der Druck bei der höchsten Temperatur entscheidend.

$\rho(T_x)$  = Dichte des Mediums bei der End-Temperatur [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_0$  = Dichte des Mediums bei der Start-Temperatur [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
= Nachspeisemassenstrom Expansion ( $\text{kg}/\text{s}$ )

$\gamma(T_x)$  = Volumenänderungskoeffizient [ $1/\text{K}$ ]

$T_x$  = End-Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]; in der Regel die höhere Temperatur (z.B. Maximale Vorlauftemperatur)

$T_0$  = Start-Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]; in der Regel die tiefere Temperatur (z.B. Fülltemperatur)

Die Drücke werden als Überdrücke angegeben.

Je nach Anwendung und Grösse der Anlage empfiehlt sich eine Expansions- und Druckhalteinrichtung mit fester Gasfüllung (kleine Anlagen), mit Kompressoren (präzise Druckhaltung möglich) oder mit Pumpen (Transfero-Pumpen für grosse Anlagen).

Als ausreichende Regelgüte in einem Netz gilt eine Druckschwankung von  $\pm 0,2$  bar. Innerhalb dieser Bandbreite muss mit den Kompressoren oder Transfero-Pumpen eine Nachspeisung in das Netz erzielt werden.

In folgendem **Berechnungsbeispiel** wird das Expansionsvolumen und daraus das Nennvolumen sowie der theoretische Nachspeisemassenstrom der Expansionsanlage (Vordruckhaltung) exemplarisch für ein Fernwärmenetz mit 1 MW Erzeugerleistung durchgerechnet.

**Berechnungsbeispiel Expansionsvolumen und Nachspeisemenge**  
**Ausgangslage – Auslegeparameter für Berechnungsbeispiel**

|                                                  |                                 |                                  |
|--------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|                                                  | Temperaturen:                   | Dichte (gemäss Tabelle 9.1)      |
| Fülltemperatur:                                  | $T_F = 10^\circ\text{C}$        | $\rho_F = 1000 \text{ kg/m}^3$   |
| Maximale Vorlauftemperatur:                      | $T_{VL} = 75^\circ\text{C}$     | $\rho_{VL} = 975 \text{ kg/m}^3$ |
| Maximale Rücklauftemperatur:                     | $T_{RL} = 45^\circ\text{C}$     | $\rho_{RL} = 990 \text{ kg/m}^3$ |
| Sicherheitsbegrenzung:                           | $T_S = 90^\circ\text{C}$        | $\rho_S = 965 \text{ kg/m}^3$    |
| Spezifische Wärmekapazität (konstant angenommen) | $c_p = 4.205 \text{ kJ/(kg K)}$ |                                  |
| Gesamtdruck Netz bei maximaler Vorlauftemperatur | $p_e = 12 \text{ bar}$          |                                  |
| Minimaler Betriebsdruck (Vorhaltdruck)           | $p_0 = 3 \text{ bar}$           |                                  |

**Berechnung Nennvolumen Ausdehnungsgefäss**
**Wasserinhalt  $V_0$** 

Für die Berechnung ist die korrekte Erfassung des Wasserinhaltes  $V_0$  notwendig. Dies beinhaltet das gesamte Wasservolumen im geschlossenen System, an welchem die Expansionsanlage angeschlossen ist. Beispielhaft ist hier eine Auflistung dargestellt.

|                                             |         |                   |   |                   |
|---------------------------------------------|---------|-------------------|---|-------------------|
| Heizkessel 1 MW                             | 1 Stk.  | 3'500 L           | = | 3'500 L           |
| Rohrleitungen Wärmeerzeugung DN 80          | 100 m   | 5.35 L/m          | = | 535 L             |
| Wärmespeicher                               | 1 Stk.  | 27 m <sup>3</sup> | = | 27'000 L          |
| Wärmeübertrager Wärmeerzeugung              | 0 Stk.  | 0 L               | = | 0 L               |
| Zwischengefäss Expansion                    | 0 Stk.  | 0 L               | = | 0 L               |
| Rohrleitungen VL DN 100                     | 150 m   | 9.01 L/m*         | = | 1'352 L           |
| Rohrleitungen RL DN 100                     | 150 m   | 9.01 L/m*         | = | 1'352 L           |
| Rohrleitungen VL DN 65                      | 350 m   | 3.88 L/m*         | = | 1'358 L           |
| Rohrleitungen RL DN 65                      | 350 m   | 3.88 L/m*         | = | 1'358 L           |
| Rohrleitungen VL DN 25                      | 265 m   | 0.64 L/m*         | = | 170 L             |
| Rohrleitungen RL DN 25                      | 265 m   | 0.64 L/m*         | = | 170 L             |
| Wärmeübertrager Kunde                       | 10 Stk. | 250 L             | = | 2'500 L           |
| <b>Wasservolumen <math>V_0</math> Total</b> |         |                   |   | <b>= 39'295 L</b> |

\*Spezifisches Volumen der Rohrleitung in L/m gemäss Kapitel 10.3

**Expansionsvolumen  $\Delta V$  (Füll- bis Maximale Vorlauftemperatur)**

Die Berechnung des Expansionsvolumens erfolgt in der Regel für die Maximale Vorlauftemperatur und ergibt ein Volumen von 1'008 Liter.

$$\Delta V = V_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho(T_x)} - 1 \right) = 39'295 \text{ L} \left( \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 1 \right) \approx 1'008 \text{ L}$$

**Wasservorlage  $V_{wv}$** 

Die Berechnung der Wasservorlage ergibt ein Volumen von ungefähr 200 Liter.

$$V_{wv} = 0.005 V_0 = 0.005 \cdot 39'295 \text{ L} \approx 200 \text{ L}$$

**Nennvolumen Ausdehnungsgefäss  $V_N$** 

Die Berechnung des Nennvolumens des Ausdehnungsgefässes ergibt ein Volumen von ungefähr 2000 Liter.

$$V_N = (\Delta V + V_{wv}) \frac{p_e + 1}{p_e - p_0} = (1008 \text{ L} + 200 \text{ L}) \frac{12 + 1}{12 - 3} = 1744.9 \text{ L} \approx 2000 \text{ L}$$

**Berechnung Nachspeisemassenstrom**

Das Berechnungsbeispiel berechnet den Nachspeisemassenstrom bei Ausfall der Erzeugerleistung von 1 MW bei Maximaler Vorlauftemperatur von 75°C auf eine Vorlauftemperatur von 65°C.

**Volumenänderungskoeffizient**

Die Berechnung des Volumenänderungskoeffizienten ergibt einen Wert von  $6.12 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$ .

$$\gamma(T_x) = - \frac{\rho(T_x) - \rho_0}{\rho_0 (T_x - T_0)} = - \frac{975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 981 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{981 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (75 - 65) \text{ K}} = 0.000612 \frac{1}{\text{K}}$$

**Nachspeisemassenstrom**

Die Berechnung des Nachspeisemassenstroms ergibt einen Wert von ungefähr 0.52 m<sup>3</sup>/h.

$$\dot{M} = \gamma(T_x) \frac{\dot{Q}}{c_p} = 0.000612 \frac{1}{\text{K}} \frac{1000 \text{ kW}}{4.205 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} \approx 0.145 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 0.52 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

## 4 Wärmeverteilung

Dieses Kapitel behandelt die Entwicklung der Wärmeverteilung in thermischen Netzen und erläutert deren zentrale Komponenten, den Aufbau sowie verschiedene Verlegemethoden und typische Verlegesituationen. Zudem werden der Tiefbau, die Rohrstatik sowie Berechnungen zu Wärmeverlusten und Druck thematisiert – all diese Aspekte sind entscheidend für die Planung, den Bau und den Betrieb eines thermischen Netzes.

### 4.1 Entwicklung

Aufgrund der historischen Entwicklung der Technologien zur Wärmeverteilung in thermischen Netzen wird heute zwischen vier etablierten Generationen zur Wärmeverteilung unterschieden ([3], [111]). Diese sind in Bild 4.1 und Bild 4.2 beschrieben und wie folgt charakterisiert:

- Die erste Generation basiert auf der Verteilung von Dampf in Rohren, welche in Betonkanälen verlegt sind.
- Die zweite Generation basiert auf der Verteilung von Heisswasser ( $> 110^{\circ}\text{C}$ ) in Rohren, welche mehrheitlich in Betonkanälen verlegt sind. Verfahren mit erdverlegten und unverbundenen Rohren sowie verfüllbare Wärmedämmmaterialien haben sich bis heute nicht durchgesetzt.
- Die dritte und vierte Generation basiert auf direkt in der Erde verlegten, vorisolierten, festverbundenen Rohren zur Verteilung von Wasser in einem breiten Temperaturbereich ( $20^{\circ}\text{C}$  bis  $160^{\circ}\text{C}$  im Dauerbetrieb).

Von besonderem Interesse ist die Entwicklung erdverlegter Rohrsysteme, da dies die am meisten eingesetzte Leitungs-Technologie ist. Das Hauptziel der Weiterentwicklung der Wärmeverteilung ist grundsätzlich eine Reduktion von:

- Investitionskosten
- Raumbedarf
- Installationszeit
- Betriebs- und Wartungskosten.

Einige dieser Parameter sind voneinander abhängig und es ist wichtig diese Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu kennen und Situatv richtig einzuschätzen. So führt zum Beispiel ein reduzierter Raumbedarf zu kürzeren Installationszeiten und zu tieferen Investitionskosten. Ein zusätzlicher Effekt kann eine erhöhte Akzeptanz von thermischen Netzen sein, wenn die kürzere Installationszeit auch die Beeinträchtigung von öffentlichem Raum verkürzt. Dahingegen benötigen Niedertemperaturnetze mit tieferen Vorlauftemperaturen und geringeren Temperaturspreizungen grössere Leitungsdimensionen um dieselbe Leistung zu übertragen wie Hochtemperaturnetze.

Ausgehend von Dampf über Heisswasser zu Warmwasser zeigt die historische Entwicklung der Wärmeverteilung in thermischen Netzen einen Trend zu ab-

nehmenden Vorlauftemperaturen und somit abnehmendem Exergie Inhalt der Wärme (Bild 4.2).

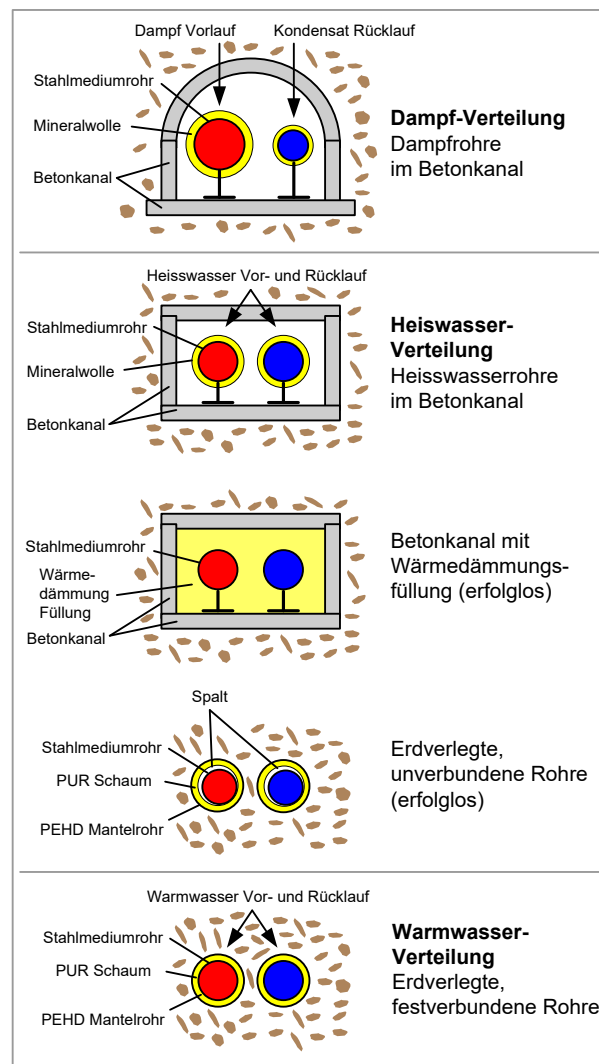


Bild 4.1 Historische Entwicklung der Wärmeverteilung. Die Warmwasser-Verteilung gilt für starre und flexible Rohre wie auch für Doppelrohre (nach [3]).

Die grundsätzliche Einteilung und Entwicklung thermischer Netze in Generationen als Klassifizierungsmerkmal wurde in verschiedenen Veröffentlichungen ([112], [113], [114], [115]) breit diskutiert und ist grundlegend etabliert. Im Allgemeinen erleichterte eine neuere Generation von thermischen Netzen die Integration erneuerbarer Energien, reduziert die Netzverluste und verringert so auch den Kohlenstoff-Fussabdruck. Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass eine neuere Generation nicht zwingend besser ist als eine frühere und noch in Betrieb stehende Leitungen älterer Generationen ihren Zweck immer noch erfüllen.

Das IEA DHC Executive Committee (IEA DHC ExCo) liefert dazu eine breit abgestützte Definition der verschiedenen Generationen von thermischen Netzen [111], wenn es darum geht, einen klaren, eindeutigen und einfach zu verwendenden Leitfaden für die Anwendung der "Generationen"-Terminologie in der Kommunikation zu haben, der mit den Ansichten der internatio-

nalen Fachleute übereinstimmt. Der Schwerpunkt der Definition dieser Generationen liegt dabei auf den Merkmalen des Verteilnetzes (siehe Bild 4.2). Der vielfach verwendete Begriff der fünften Generation wird oft als eine eigene Generation betrachtet. Das Executive Committee von IEA-DHC (IEA DHC ExCo) empfiehlt den Begriff der fünften Generation jedoch nicht zu verwenden. Stattdessen sind Verteilnetze, die hauptsächlich als Quelle für Heizung und Kühlung durch dezent-

rale Technologien wie Wärmepumpen genutzt werden, im englischen als Thermal Source Networks (TSN) bezeichnet, als Unterklasse der vierten Generation zu betrachten [111].

Im vorliegenden Planungshandbuch deckt der Begriff Thermische Netze grundsätzlich alle aktuellen und zukünftigen Generation der leitungsgebundenen Wärmeverteilung ab.

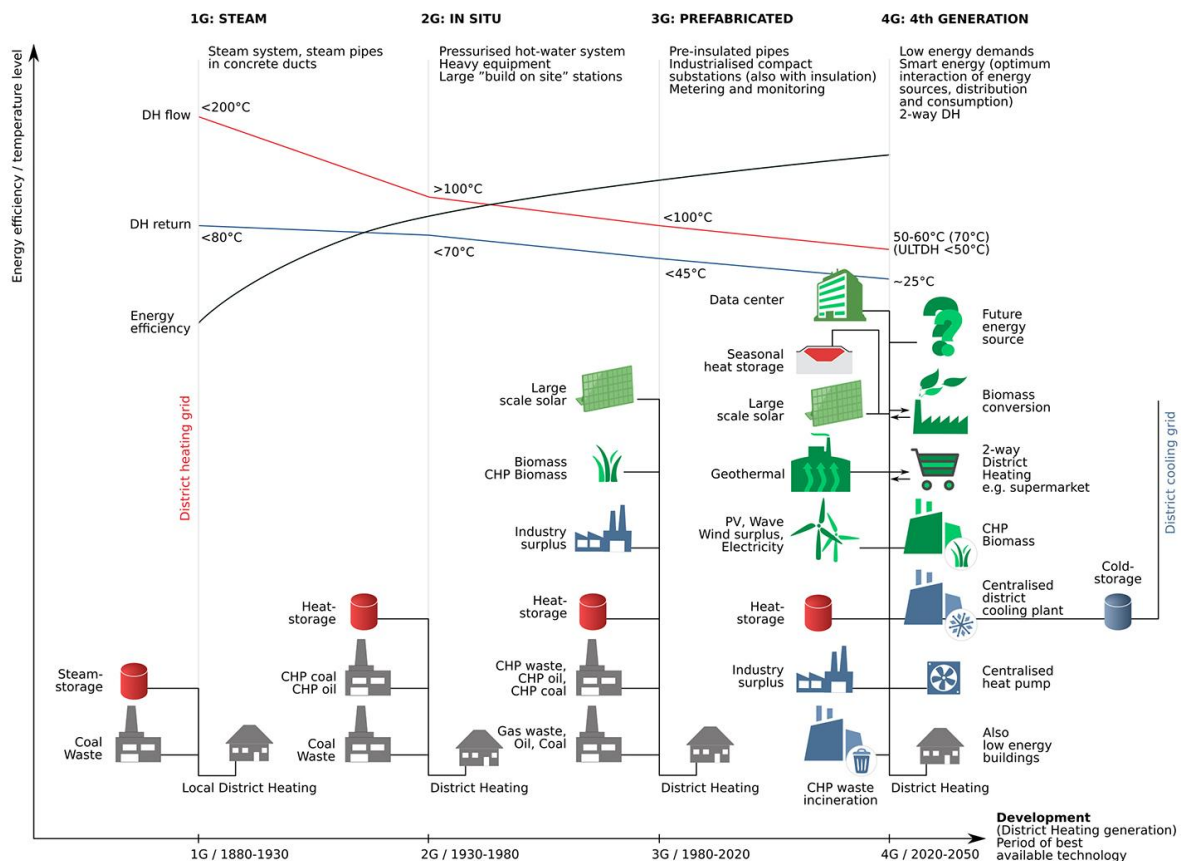


Bild 4.2 Entwicklungspfad der thermischen Netze in vier Generationen mit zunehmendem Angebot an Energiequellen und steigender Komplexität bei sinkendem Temperaturniveau des Vorlaufs und zunehmender Energieeffizienz [116].

### 4.1.1 Dampf-Verteilung

Dampf war vor über hundert Jahren eine logische Wahl als Wärmeträgermedium, da Dampf oft schon von bestehenden Dampfkraftwerken einfach zur Verfügung stand. Die Wärmenutzung des Dampfes war damit die erste Anwendung der Wärme-Kraft-Kopplung.

Heutzutage dominiert jedoch Wasser als Wärmeträgermedium in thermischen Netzen, obwohl auch immer noch Dampfnetze im Einsatz sind. Diese werden aber nach und nach durch Wassernetze ersetzt. Daneben besteht weiterhin ein Nischenmarkt für Dampfnetze für Anwendungen, bei denen ein hoher Energieinhalt und hohe Temperaturen gefordert werden. Dies gilt zum Beispiel für bestimmte industrielle Prozesse oder zur Sterilisation in Spitälern.

Dampfnetze werden als offene oder geschlossene Systeme konzipiert. Bei einem offenen System wird das Kondensat abgeleitet und muss durch frisches Wasser

ersetzt werden. In einem geschlossenen System wird das Kondensat zum Dampferzeuger zurückgeführt. Das offene System hat den Vorteil, dass keine Rücklaufleitung für das Kondensat benötigt wird. Demgegenüber ist der Energieverlust in Form von Wärme mit etwa 15 % und der Aufwand das Kondensat zu ersetzen sehr hoch.

Neben den Vorteilen des hohen Energieinhaltes von Dampf und der höheren Vorlauftemperatur als Wassernetze, haben Dampfnetze folgende Nachteile:

- Der kondensierende Dampf im offenen System absorbiert Sauerstoff und Kohlendioxid, womit das Kondenswasser sehr korrosiv ist.
- In einem geschlossenen System braucht es bei jedem Kunden (Kondensator) eine Kondensatrückfördereinrichtung.
- Der Druckverlust auf der Dampfseite ist in der Regel deutlich grösser als auf der Wasserseite.
- Für die Kondensatabscheidung sind kostenintensive Vorrichtungen notwendig.

### 4.1.2 Heisswasser-Verteilung

Die Gestaltung der zweiten Generation von thermischen Netzen ist der ersten Generation ähnlich bis auf den Unterschied, dass im Vorlauf Wasser statt Dampf als Wärmeträgermedium genutzt wird. Die Verlegung der Rohre erfolgt ebenfalls in Kanälen. Zu Beginn der Wärmeversorgung mit Dampf wurden die Kanäle noch gemauert und oft begehbar ausgeführt. Später wurden die Kanäle viel kompakter in Beton ausgeführt wie in Bild 4.1 dargestellt ist. Begehbare Energiekanäle (z. B. Tunnel) werden auch heute noch eingesetzt, zum Beispiel in grossen Städten, wo neben der Fernwärme auch Fernkälte, Wasser und andere leitungsgebundene Energieträger geführt werden.

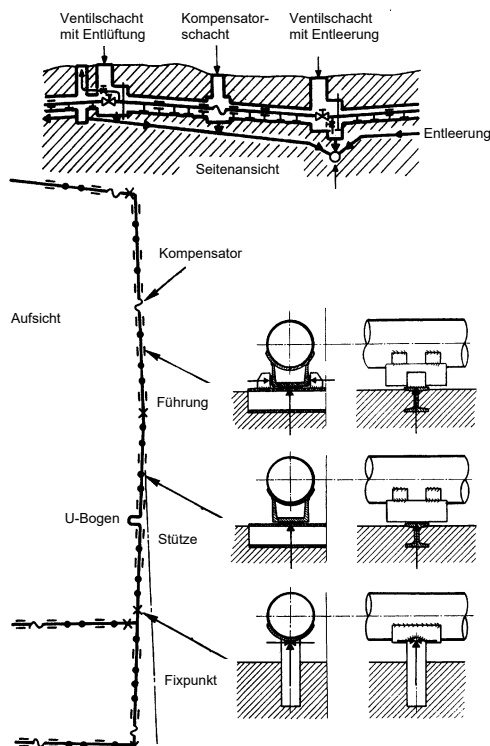


Bild 4.3 Zweite Generation der Wärmeverteilung: Heisswasser-Verteilung im Betonkanal [3].

Vorgefertigte Betonkanäle beschleunigen die Verlegung, wobei Ventil- und Kompensationsschächte vielfach noch vor Ort betoniert werden müssen. Die Wärmedämmung wird in Form von Mineralwolle direkt vor Ort angebracht. Voraussetzung für eine funktionierende Wärmedämmung ist, dass die Mineralwolle trocken bleibt, was im Falle von Kondensation in den Kanälen und Undichtheiten nicht immer gewährleistet werden kann, da die Wärmedämmung nicht vor Feuchtigkeit geschützt wird.

Damit die starren Rohrleitungen unter der thermischen Expansion und Kontraktion keinen Schaden nehmen, werden die Rohre in sogenannten Festpunkten fixiert. Zwischen diesen Festpunkten müssen die Rohrleitungen gestützt und geführt werden. Eine weitere Möglichkeit der thermischen Kompensation bieten metallische

Balgenkompensatoren oder die Verlegung mit U-Rohr wie in Bild 4.3 dargestellt.

Die Erfahrungen zeigen, dass sorgfältig geplante und betriebene Thermische Netze der zweiten Generation immer noch betrieben werden und einwandfrei funktionieren.

### 4.1.3 Warmwasser-Verteilung

Die teure und zeitintensive Bauweise von Rohrleitungen in Betonkanälen war der Hauptgrund für die Weiterentwicklung der Rohrleitungen und der Verlegemethode von der Betonkanal-Verlegung zur Erdverlegung.

Zwischen der zweiten und der dritten Generation gab es zwei Zwischenschritte, die zur dritten Generation führten (Bild 4.1, dritte und vierte Grafik von oben). Der erste Entwicklungsschritt war eine Modifikation bei der Kanalverlegung, bei der verschiedene Füllmaterialien als Wärmedämmung getestet wurden. Der zweite Entwicklungsschritt betrifft die Entwicklung von direkt im Erdboden verlegten Kunststoffmantelrohren ohne feste Verbindung zwischen Wärmeträgerrohr und Wärmedämmung. Diese zwei Entwicklungsschritte haben sich nicht durchgesetzt, weil die Kosten zu hoch waren und/oder die Methode Mängel aufwies wie etwa Korrosion der Wärmeträgerrohre infolge von Feuchtigkeit.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurden die Kunststoffmantelrohre weiterentwickelt, bei denen das Wärmeträgerrohr mit der Wärmedämmung und mit dem Mantelrohr fest verbunden sind (Bild 4.5). Damit konnte das Korrosionsproblem und die Rohrstatik weitgehend gelöst werden. Kunststoffmantelrohre werden fertig vofabrikziert und können somit direkt verlegt werden.

Als Material für die Wärmeträgerrohre kommen je nach Einsatzzweck Stahl, Nichteisenmetalle und Kunststoffe zum Einsatz. Die Wärmedämmung besteht heute aus einem Polyurethan-Hartschaum (PUR), der mit einem langzeitbeständigen und umweltfreundlichen Treibgas geschäumt wird und sehr gute Dämmeigenschaften aufweist. Das Mantelrohr muss gegen praktisch alle im Erdreich vorkommenden chemischen Verbindungen resistent und dabei gleichzeitig schlagfest und bruchsticher sein. Dazu werden nahtlos extrudierte Rohre aus hochverdichtetem Polyethylen (PEHD) eingesetzt.

Die Ausführung Rohre erfolgt starr (als Stangen) oder flexibel (als Rollen und Stangen). Sowohl starre als auch flexible Rohre werden in einfacher und doppelter Ausführung (Doppelrohr) hergestellt. Flexible Rohre sowie Doppelrohre sind im Gegensatz zu den starren Rohren nur in einem eingeschränkten Durchmesserbereich erhältlich (siehe Kapitel 4.2.1).

Eine Besonderheit der dritten Generation der Wärmeverteilung ist, dass neben der vereinfachten Verlegemethode direkt im Erdreich auch weniger Komponenten zur Kompensation der thermischen Ausdehnung eingesetzt werden müssen. Während metallische Balgenkompensatoren praktisch nicht mehr eingesetzt werden, wird die Elastizität der Rohre zur thermischen Kompensation genutzt und durch zusätzliche Bögen (Richtungsänderungen) im Trasse unterstützt.

Ein weiteres Merkmal der dritten Generation ist die Möglichkeit der Warnung bei Leakage. Die Methode ermöglicht nicht nur die Indikation einer Leakage sondern auch eine auf wenige Meter genaue Ortung.

#### 4.1.4 Niedertemperatur-Verteilung

Für die Verteilung von Wärme auf tiefem Temperaturniveau, sogenannten Niedertemperaturnetze, werden Begriffe wie Anergienetz, kalte Fernwärme, Fernkälte, thermische Arealvernetzung oder auch Low-Ex Fernwärme verwendet. Die Einteilung thermischer Netze nach deren Vorlauftemperatur ist in Kapitel 1.3.1 ausführlich beschrieben.

## 4.2 Komponenten

### 4.2.1 Rohrsysteme

Die Wahl des Rohrsystems und der geeigneten Verletechnik hängt neben der Netztemperatur und dem Netzdruck von Anforderungen ab, die weitgehend von den Standortbedingungen bestimmt werden. Diese sind:

- Werkleitungen
- Umgebung
- Bauten
- Strassen
- Gleise
- Unterquerungen
- Grundwasser
- Bodenbeschaffenheit
- Baumbestand

Starre Kunststoffverbundmantelrohre (KMR) sind aufgrund der Standardisierung (siehe Bild 4.4), der Robustheit und des geringen Materialpreises das meistverlegte Rohrsystem. Daneben kommen hauptsächlich im Bereich der Unterverteilung und Hausanschlussleitungen auch flexible Rohrsysteme wie Kunststoffmediumrohre (PMR) und Metallmediumrohre (MMR) zum Einsatz. Weitere Rohrsysteme sind Stahlmantelrohre und GFK-Rohre. Bei Niedertemperaturnetzen oder sogenannten Anergienetzen, mit Vorlauftemperaturen unter 30°C, werden auch thermisch nicht isolierte Rohre verwendet. Dabei kommen häufig Kunststoffrohre aus Polyethylen (PE-Rohre) oder duktile Gussrohre zum Einsatz.

Gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) müssen erdverlegte Leitungen in der Schweiz maximale  $U_R$ -Werte (spezifische Wärmeverluste) einhalten. Aktuell gültig ist die MuKE 2014 [38], ab 2030 soll die aktualisierte MuKE 2025 [117] gültig sein. Die  $U_R$ -Werte bleiben unverändert, mit einer Präzisierung was Einzel- und Doppelrohre anbelangt. Im Auftrag vom EnFK wurde 2020 ein Faktenblatt Wärmedämmung für erdverlegte Fernwärmerohre [118] erstellt, indem Produkte der auf dem Markt am häufigsten eingesetzten Hersteller betreffend Einhaltung der MuKE 2014 überprüft wurden. Im Grundsatz erfüllen starre Rohrsysteme (KMR) mit Dämmstärke DS 2 und DS 3 und bei den flexiblen Rohren (MMR und PMR) die verstärkte Variante die Anforderungen der MuKE. Dies ist im Einzelfall natürlich abzuklären und die Einhaltung der Grenzwerte liegt schlussendlich in der Verantwortung des Betreibers der Anlage..

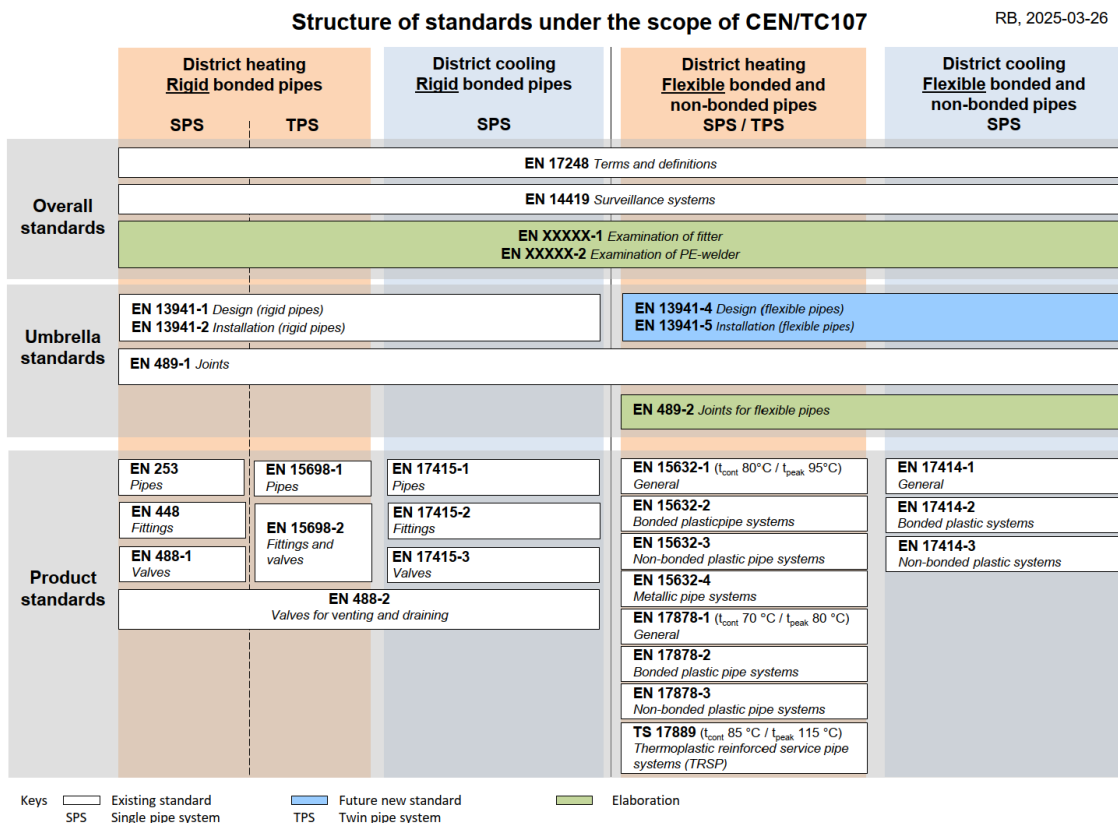


Bild 4.4 Struktur der Standardisierung von vorisolierten Rohrsystemen im Rahmen des CEN/TC107 [119]

#### 4.2.1.1 Kunststoffverbundmantelrohr (KMR)

Das starre Kunststoffverbundmantelrohr (KMR) ist das am häufigsten eingesetzte Rohrsystem. Aufgrund guter Druck- und Temperaturbeständigkeit können diese in vielen Situationen eingesetzt werden. Die KMR-Rohre bestehen aus einem starren Stahlmediumrohr, das mit einer Dämmschicht aus Polyurethan-Hartschaum (PUR) verbunden ist. Das Mantelrohr ist aus hochverdichtetem Polyethylen (HDPE) (Bild 4.5). Die einzelnen Materialien sind kraftschlüssig miteinander verbunden. Es handelt sich somit um ein nicht selbstkompensierendes Rohrsystem, weshalb die Wärmedehnung auf das Gesamtrohrsystem übertragen wird.



Bild 4.5 Starres Kunststoffverbundmantelrohr (KMR) Quelle: Brugg Rohrsystem AG

Die maximale Dauerbelastung für eine Lebensdauer von 30 Jahren wird gemäss SN EN 253 [120] bis zu einer Temperatur von 120°C sicher gewährleistet. Laut Herstellerangaben werden Dauerbetriebstemperaturen bis 140°C bei einem Druck bis 25 bar garantiert. In diesem Fall müssen die Hersteller die thermische Lebensdauer von 30 Jahren nach Anhang C von SN EN 253 prüfen.

Um die damit auftretenden Spannungen und Dehnungen aufzunehmen sind eine Rohrnetzstatik und geeignete Kompensationsmassnahmen unabdingbar. Je nach Anforderungsprofil werden KMR mit und ohne Vorwärmung, mit Einmal- und Dauerkompensatoren oder kalt verlegt. Ziel der Verlegungsmethoden ist, die Wärmedehnung der Stahlleitungen aufzunehmen, so dass die zulässigen Spannungen im Stahlrohr nicht überschritten werden. Die Verlegeart muss in Zusammenhang mit Auslegung und Trassierung sowie der Berechnung der Rohrnetzstatik erfolgen. Das AGFW-Arbeitsblatt FW 401 [121] bietet eine vereinfachte Planung der Rohrnetzstatik an, indem es eine korrekte Auslegung mittels Diagrammen ermöglicht und der detaillierte rechnerische Nachweis auf wenige Spezialfälle reduziert wird. Zugleich wird die Kaltverlegung der Rohrleitungen bis DN 400 statisch zugelassen.

Bei einer komplizierten Trassenführung und erschwerten Bedingungen (Werkleitungen, etc.) sind zum Teil viele Formstücke erforderlich, was die Verlegung relativ teuer macht. Da die Materialkosten jedoch niedrig sind und eine hohe Betriebssicherheit erzielt wird, haben sich KMR insbesondere bei grösseren Durchmessern ab DN 100 weitgehend als Standardlösung durchgesetzt.

Der Rohrleitungsbau erfolgt bevorzugt durch verschweissen der einzelnen Rohre miteinander. Dies erfordert neben zertifizierten Schweißer auch einen nicht zu unterschätzenden Aufwand zur Prüfung der Schweissnähte (Röntgen, Ultraschall etc.). Als Alternative zum Schweißen können KMR-Rohre bei Nennweiten bis etwa DN 125 auch mit metallisch dichtenden Pressverbindungen verbunden werden (z. B. System Haelok oder FIPE). Vom AGFW gibt es dazu zwei Arbeitsblätter zu metallisch dichtenden Pressverbindungen für Fernwärme- und Fernkältenetze mit Mediumrohren aus Stahl (FW 449 Teil 1 [122] und Teil 2 [123]), welche aktuell ausgesetzt sind, da in Deutschland an verbauten Pressverbindungen im erdverlegten Bereich bei hochbeanspruchten Fernwärmeleitungen im niedrigen Nennweitenbereich und Medientemperaturen über 100°C, vereinzelt Undichtigkeiten festgestellt wurden. In offener Verlegung, Kellerleitungen oder ähnlich, sind Pressverbindungen tendenziell weniger kritisch zu betrachten.

#### 4.2.1.2 Metallmediumrohr (MMR)

Die Flexibilität der Metallmediumrohre (MMR) basiert auf gewellten Kupfer- oder Stahlrohren oder bei kleinen Rohrdurchmessern auch aus weichgeglühten geraden Stahl- oder Kupferrohren (Bild 4.6). Die Wärmedämmung und der Mantel sind wie bei KMR oder PMR ausgeführt.

MMR-Rohre können ähnlich wie KMR-Rohre im Dauerbetrieb bis zu einer Temperatur von 160°C und einem Druck von 25 bar eingesetzt werden.



Bild 4.6 Flexibles Metallmediumrohr (MMR) Quelle: Casaflex von Brugg Rohrsystem AG

Die Wellrohrsysteme sind vollständig selbstkompensierend und werden bis DN 150 als Rollen angeboten. Die Glattrohrsysteme sind nur eingeschränkt selbstkompensierend und werden nur für kleine Durchmesser als Rollenware produziert, da sich das Rohr bei grösseren Durchmessern zu stark verformen würde. Beide Systeme erfordern keine Massnahmen zur Kompensation und ermöglichen eine flexible Trassenführung. MMR-Rohre werden daher bevorzugt für Hausanschlussleitungen eingesetzt, da dort die Flexibilität besonders vorteilhaft ist und keine Formstücke oder Abzweiger benötigt werden.

An den Tiefbau werden dieselben Anforderungen gestellt wie bei der Verlegung von PMR-Rohren. Wegen

des erhöhten Kraftaufwands zum Biegen und wegen des höheren Gewichts ist die Verlegung jedoch aufwändiger.

Das Wellenprofil des mediumführenden Innenrohres verursacht einen erhöhten Druckverlust, weshalb bei gewellten Rohren zum Teil eine Nennweite grösser ausgelegt werden muss als mit glatten Rohren. Ein weiterer Nachteil ist der nachträgliche Anschluss, welcher nur durch den Einsatz zusätzlicher T-Stücke möglich ist und diese können nur eingebaut werden, wenn das Netz ausser Betrieb ist. Von Vorteil sind jedoch die einfache Verlegung und das geringe Tiefbauvolumen. Da flexible MMR-Rohre höhere Kosten als flexible PMR-Rohre verursachen, werden sie in der Regel nur dann eingesetzt, wenn die höhere Druck- und Temperaturbeständigkeit wirklich erforderlich ist.

#### 4.2.1.3 Kunststoffmediumrohr (PMR)

Das flexible Kunststoffmediumrohr (PMR)) besteht aus einem Mediumrohr aus vernetztem Polyethylen (PEX) oder Polybuten (PB). Die Wärmedämmung und der Mantel sind ähnlich wie bei KMR ausgeführt (Bild 4.7). Die Mediumrohre aus PEX und PB weisen zusätzlich eine Diffusionssperre gegen Sauerstoff auf.

Die Einsatztemperatur ist bei maximal 95°C begrenzt und die Druckgrenze beträgt 6 bar (Heizung) sowie 10 bar (Sanitär, Trinkwasser). Für eine Lebensdauer von 30 Jahren beträgt die Dauerbetriebstemperatur 80°C und der maximale Druck 6 bar. Bei einer Begrenzung auf 70°C und 6 bar verlängert sich die theoretische Standzeit auf 50 Jahre, während ein Dauerbetrieb bei der Temperaturobergrenze von 95°C die Lebenserwartung wesentlich verkürzt.

Inzwischen sind auch Rohre mit einem Fasergeflecht aus Aramidfasern auf dem Markt erhältlich. Diese Systeme weisen erhöhte Einsatztemperaturen und Nenn drücke auf. Diese können bei einer Dauerbetriebstemperatur bis 95°C (maximal 115°C) und bis zu PN 10 respektive PN 16 betrieben werden (siehe Tabelle 4.1).

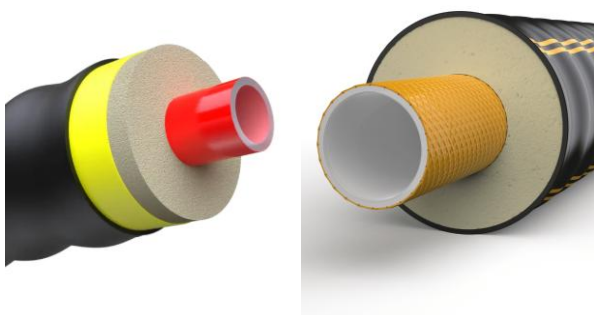


Bild 4.7 Flexibles Kunststoffmediumrohr (PMR)  
Links: Mediumrohr aus vernetztem Polyethylen (PEX) Quelle: Isopex von isoplus GmbH  
Rechts: Mediumrohr aus vernetztem Polyethylen (PEX) inkl. Verstärkung mit Aramidfasergeflecht Quelle: FibreFlex Pro von RK Infra GesmbH

Die Verbindung einzelner Rohrabschnitte erfolgt mittels Presskupplungen, die mit Spezialwerkzeugen montiert

werden. Für Rohre aus Polybuten (PB) besteht auch die Möglichkeit, die Rohre zu verschweissen. Hausanschlüsse werden mit T-Stücken realisiert. Spätere Anschlüsse können jedoch nur durch Einfrieren oder Abquetschen der Leitung ausgeführt werden, während ein Anbohren wie bei KMR nicht möglich ist. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, T-Stücke für mögliche spätere Anschlüsse bereits von Beginn weg einzubauen.

Der Einsatz von PMR ist wegen der begrenzten Betriebsparameter von Temperatur und Druck auf kleine bis mittelgrosse thermische Netze beschränkt. Ein Vorteil gegenüber KMR ist die einfache Trassenführung, die den lokalen Gegebenheiten wie Topografie, Spartenquerung oder Fremdleitungen angepasst werden kann und die Selbstkompensation. Im Vergleich zu den nachfolgend beschriebenen Metallmediumrohren (MMR) sind PMR-Rohre kostengünstiger sowie einfacher zu biegen und sie ermöglichen auch engere Verlegeradien. Zudem sind die Anforderungen an das Bau- und Montagepersonal niedriger.

Wegen dieser Vorteile werden PMR den MMR meistens vorgezogen, sofern die niedrigere Druck- und Temperaturbeständigkeit dies zulassen. Nachteilig sind die relativ teuren Formstücke, die aufwändige Technik des nachträglichen Anschliessens, dass keine Leckagewarnsysteme angeboten werden und die höheren, mit dem Durchmesser überproportional ansteigenden Materialkosten aus.

#### 4.2.1.4 Kunststoffrohr aus Polyethylen (PE-Rohr)

Kunststoffrohre aus Polyethylen (PE-Rohre) werden aus PE100-RC (RC = „resistant to crack“) hergestellt und sind eine Weiterentwicklung des klassischen Polyethylen-Werkstoffs PE100. Sie zeichnen sich durch eine besonders hohe Beständigkeit gegen langsames Risswachstum und Punktelastungen aus. Im Gegensatz zu herkömmlichen PE-Rohren ist bei PE100-RC in der Regel keine spezielle Schutzbettung aus Sand erforderlich, jedoch zu empfehlen. Das macht sie ideal für Anwendungen in Niedertemperatur- oder Anergienetzen, wo meist keine zusätzliche Wärmedämmung nötig ist (siehe Bild 4.8).

PE-Rohre sind korrosionsfrei, alterungsbeständig und weisen eine lange Lebensdauer von über 100 Jahren auf. Sie sind für Dauerbetriebstemperaturen bis etwa 40°C geeignet. Aufgrund der glatten Innenfläche sind Druckverluste gering, was besonders bei längeren Strecken vorteilhaft ist.

Ein grosser Vorteil ist die einfache und sichere Verbindungstechnik. PE-Rohre werden hauptsächlich durch Stumpfschweissen (Butt-Fusion) oder Elektroschweissen (Electrofusion) miteinander verbunden. Beide Verfahren garantieren dichte, dauerhafte Verbindungen ohne metallische Übergänge. Für Reparaturen oder bei beengten Platzverhältnissen sind auch mechanische Verbindungen (z. B. Flanschadapter oder Klemmverbindungen) möglich – insbesondere bei temporären Installationen oder Übergängen zu anderen Werkstoffen.



**Bild 4.8** Sanierung und Modernisierung Quartiersgelände, Schul- und Sportzentrum Schifferstadt DE  
KMR-Doppelrohr und PE-Rohr (GEROtec ANERGIE Typ 1 - PE100-RC) in konventioneller und grabenloser Verlegung  
Quelle: Gerodur MPM Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG

Da die Rohre ohne Wärmedämmung verlegt werden, lassen sie sich flexibel an die örtlichen Gegebenheiten anpassen. Dies reduziert Baukosten, insbesondere bei geringen Verlegetiefen oder in kompakten Leitungstrassen. Bei grabenlosen Verlegeverfahren – wie Spülbohrung oder Relining – bieten PE-Rohre aufgrund ihrer Robustheit und Biegsamkeit grosse Vorteile. Ohne Wärmedämmung ist der Wärmeverlust zwar höher als bei vorgedämmten Systemen, aber in Anergienetzen (mit sehr niedrigen Temperaturniveaus) oder bei kurzen Strecken kann dies in der Regel vernachlässigt werden.

Je nach Ausführung sind Rohrsysteme auch mit eingebautem Leckagewarnsystem und/oder einer Diffusions-sperrschicht verfügbar.

#### 4.2.1.5 Duktile Gussrohre

Duktile Gussrohre bestehen aus einem robusten und gleichzeitig elastischen Gusseisen. Der Werkstoff entsteht durch das Einschmelzen von Recycling-Schrott, dem Magnesium beigemischt wird. So entsteht ein feinkugeliges Graphitgefüge, das dem Rohr hohe Festigkeit und Elastizität verleiht – ideal für wechselnde Belastungen im Untergrund.

Die Rohre werden im Schleudergussverfahren hergestellt, wärmebehandelt und mit unterschiedlichen Schutzschichten innen und aussen versehen. Die Schutzschichten sorgen für einen hohen Korrosions- und mechanischen Schutz.

Dank der BLS®-Steckmuffe lassen sich die Rohre schnell, sicher und zugfest verbinden – ideal auch für grabenlose Einbauverfahren wie Spülbohrung (siehe Bild 4.9). Die Verbindung hält sofort und benötigt keine Abkühlzeit oder Zusatzmaterialien.

Duktile Gussrohre eignen sich für den Einsatz in bebauten Gebieten oder unter Hindernissen wie Strassen oder Gewässer. Sie bieten eine langlebige, wirtschaftliche Lösung mit minimalem Bauaufwand – ideal für thermische Netze mit tiefen Vorlauftemperaturen.



**Bild 4.9** Verlegung duktiler Gussrohre DN 600 in Spülbohrtechnik zur Versorgung des Gesundheitsclusters Lengg in Zürich aus dem Zürichsee [124].

Duktile Gussrohre bieten je nach Ausführung und Eigenschaften folgende Vorteile:

- sehr hohe Nutzungsdauer von bis zu 140 Jahren
- höchste statische Tragfähigkeit, schützen dauerhaft vor mechanischen und chemischen Angriffen
- sind geeignet für alle Bodenarten beliebiger Aggressivität
- erlauben zulässige Korngrößen für die Rohrumhüllung 0 – 63 mm, Grösstkorn 100 mm
- verfügen über guten Korrosionsschutz und sind stabil über die gesamte Lebensdauer
- sind resistent gegen galvanische Korrosion durch Streuströme (z. B. durch Erdung, entlang Bahnlinien oder durch Mischböden)
- einfaches Handling und Bearbeitung
- Steckmuffensysteme gewährleisten eine 100% dichte Verbindung der Rohrleitung
- Standard-Formstücke aus duktilem Gusseisen für optimale Linienführung und Anschlussleitungen.
- Polyurethan (PUR)-Auskleidung, geeignet für den Einsatz in Anergienetze:
  - geeignet für alle Arten von Wasser und Abwasser von pH 1 bis pH 14
  - für weiche und kalkaggressive Wässer
  - beständig gegenüber Frostschutzmitteln, wie Ethanol oder Propylenglykol
  - hydraulisch glatt, Rauheit  $k = 0,0014 \text{ mm}$

#### 4.2.1.6 Glasfaserverstärktes Kunststoffrohr (GFK-Rohr)

Ein GFK-Rohr besteht aus einem starren glasfaserverstärkten Epoxidharz-Rohr. Dieses ist wie bei KMR mit einer Dämmschicht aus PUR und einem PE-Mantel versehen. GFK-Rohre sind leicht und ihr Hauptvorteil ist die Korrosionsbeständigkeit, weshalb GFK-Rohre vor allem für korrosive Medien wie geothermisches Quellwasser eingesetzt werden. Die Belastungsgrenze liegt bei 160°C und 16 bar.

Die Verbindung der einzelnen Rohre und der Formstücke erfolgt durch Verkleben. Nachträgliche Anschlüsse können nur bei entleerter Leitung ausgeführt werden, wobei T-Stücke eingesetzt oder das Hauptrohr mit einer Manschette verstärkt und angebohrt wird. Im Vergleich zu KMR-Rohren ist die Rohrnetzstatik einfacher zu beurteilen. Bei Richtungswechseln müssen je nach Rohrlänge jedoch Widerlager aus Beton ausgeführt werden. Daneben sind der Tiefbau und die Abmessungen des Grabens vergleichbar wie bei KMR. Wegen des hohen Materialpreises werden GFK-Rohre nur bei besonderen Anforderungen und insbesondere für korrosive Medien eingesetzt.

#### 4.2.1.7 Stahlmantelrohr (SMR)

Bei starren Stahlmantelrohren (SMR) wird im Gegensatz zu KMR-Rohren auch das Mantelrohr aus Stahl ausgeführt (Bild 4.10). Dies ermöglicht Betriebstemperaturen über 300°C und Drücke bis 64 bar. Da SMR-Rohre hohe Investitions- und Betriebskosten aufweisen, kommen sie nur in sehr grossen Wärmenetzen mit hohen Vorlauftemperaturen und/oder für industrielle Zwecke zum Einsatz.

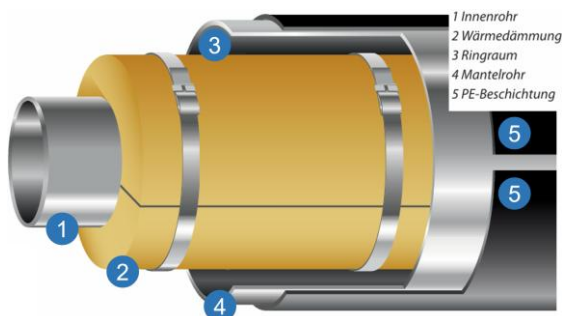


Bild 4.10 Aufbau Stahlmantelrohr (SMR)  
Quelle: Isobruigg Stahlmantelrohr GmbH

Die Wärmedämmung erfolgt hauptsächlich durch ein Vakuum zwischen Medienrohr und Mantelrohr. Zur Verhinderung von Wärmestrahlung wird das Medienrohr zusätzlich durch eine Schicht aus Mineralfaser gedämmt. Die Vakuumdämmung erzielt deutlich geringere Wärmeverluste als andere Rohrsysteme. Die einzelnen Rohrabschnitte werden verschweisst und das Vakuum im Zwischenraum kann zur Erkennung von Undichtigkeiten am Innen- oder Mantelrohr überwacht werden.

#### 4.2.1.8 Doppelrohrausführung

Für die Rohrsysteme KMR, MMR und PMR sind in einem gewissen Nennweitenbereich auch Doppelrohrausführungen, sogenannte Duo-Rohre, erhältlich (Bild 4.11). Für spezielle Anwendungen kann das Stahlmantelrohr in Doppel- oder Mehrfachrohrausführung ausgeführt werden.

Doppelrohr- und Mehrfachrohrsysteme haben folgende Vorteile gegenüber Einzelrohrsystemen:

- niedrige Verlegekosten (geringere Grabenbreite)
- geringere spezifische Wärmeverluste
- halbierte Anzahl Muffenverbindungen
- halbierte Anzahl Kernlochbohrungen und Mauerdichtungen für die Hauseinführung
- geringere Anzahl Dehnschenkel.

Demgegenüber ist durch eine Wärmedämmung im Doppelrohr sicher zu stellen, dass die Wärmeübertragung vom Vorlauf auf den Rücklauf gering gehalten wird und die Rücklauftemperatur nicht unzulässig erhöht wird. Flexible Doppelrohre (MMR oder PMR) eignen sich besonders für das Verlegen von Haus zu Haus, da keine Abzweiger im Erdreich realisiert werden müssen.



Bild 4.11 Flexibles Kunststoffmediumrohr (PMR) als Doppelrohrausführung.  
Quelle: AustroPUR von Armacell Austria GmbH

Beim Einsatz von Doppelrohren mit KMR müssen die Abzweigungen genau bekannt sein, damit die erforderlichen Formstücke eingesetzt werden können. Ein nachträglicher Einbau einer Abzweigung ist mit hohem Aufwand verbunden. Die Leitungsführung muss präzise ausgehoben werden, da KMR-Doppelrohre sehr steif sind. Ideal ist eine horizontale Leitungsführung, da das Verlegen dadurch um einen Freiheitsgrad eingeschränkt wird. Neigungsunterschiede erfordern ebenfalls genau gefertigte Formstücke. Interessant sind KMR-Doppelrohre bei geraden Transportleitungen ohne Abzweiger und konstanter Neigung des Leitungstrasses. Vorteilhaft sind Doppelrohre auch bei Unterstossungen (speziell bei grösseren Distanzen), da kann ein Doppelrohr mit geringem Durchmesser einge-zogen werden.

#### 4.2.1.9 Muffenverbindungen

Eine Muffe verbindet zwei vorgedämmte Rohrsegmente mechanisch stabil und wärmetechnisch geschlossen. Sie schützt die Verbindung vor äusseren Einwirkungen, sorgt für eine gas- und wasserdichte Abdichtung des Mantelrohres und stellt die Kontinuität der Wärmedämmung sicher.

Die fachgerechte Montage der Muffenverbindungen ist ein entscheidender Faktor für die Betriebssicherheit und Lebensdauer von Leitungen thermischer Netze. Muffen verbinden vorgedämmte Rohrsegmente dauerhaft, dicht und wärmebrückenfrei miteinander und müssen den Anforderungen der DIN EN 489 [125] entsprechen. Je nach System werden die Muffen verschweisst, geschrumpft oder mechanisch verriegelt.

Die Muffenverbindungen müssen unter allen zulässigen Baustellen-, Montage- und Betriebsbedingungen und unter allen zulässigen Belastungsfällen dauerhaft, auch gegenüber aussen anstehendes Wasser, dicht sein. Das heisst die Muffenverbindungen müssen insbesondere den Axialverbindungen, den Relativbewegungen von Mantelrohr und Muffenrohr, den radialen Ausdehnungen, den Erd- und Verkehrslasten und Mantelrohrtemperaturen (punktuell bis 60°C) dauerhaft und sicher widerstehen (vgl. auch [126]).

Die Muffenmontage darf daher nur durch geschultes und zertifiziertes Fachpersonal ausgeführt werden. Das Personal muss mit den jeweiligen Systemen, Materialien und Montagebedingungen vertraut sein und entsprechende Schulungen bei Hersteller, Lieferanten oder zertifizierten Instituten nach AGFW Arbeitsblatt FW 603 [127] absolvieren. Nach erfolgreichem Kurs wird ein Montagezertifikat ausgestellt, das zur Verarbeitung des jeweiligen Systems berechtigt. Betreiber fordern häufig Referenzen oder eine Mindestanzahl erfolgreich ausgeführter Muffenmontagen.

Jede Muffenmontage ist zu dokumentieren – einschliesslich Angaben zu Monteur, Systemtyp, Datum, Umgebungstemperatur, verwendeten Materialien und Prüfergebnissen.

Nur durch zertifiziertes Fachpersonal und die Einhaltung der relevanten Normen kann die langfristige Dichtigkeit, Korrosionssicherheit und Betriebssicherheit von Leitungen thermischer Netze sichergestellt werden.

#### 4.2.1.10 Auswahl des Rohrsystems

Bei der Realisierung eines Wärmeverbundes mit Energiezentrale und Fernwärmenetz machen die Investitionskosten des Netzes oft mehr als 50% und damit den Hauptteil der Gesamtkosten aus. Für die Wirtschaftlichkeit ist deshalb eine Kostenoptimierung des thermischen Netzes entscheidend, wozu die aus der Investition resultierenden Kapitalkosten und die im Betrieb anfallenden Betriebskosten zu berücksichtigen sind. In einem ersten Schritt sind dazu mögliche Versorgungsgebiete zu definieren und zusammen mit möglichen Standorten für die Energiezentrale geeignete Varianten zu definieren. Aufgrund einer entsprechenden Vorauswahl für die Randbedingungen des Netzes kommt an-

schliessend der Auswahl und der Auslegung des Rohrsystems eine zentrale Rolle zu. Die Hauptkriterien zur Auswahl des Rohrsystems oder der in einem Verteilnetz zu kombinierenden Rohrsysteme sind folgende Parameter:

- a) Betriebstemperatur
- b) Betriebsdruck (statische und dynamische Drücke)
- c) Leckageüberwachung
- d) Wärmeverlustkosten
- e) Kundendichte
- f) Angebot an Nennweiten
- g) Art der Verlegung
- h) Platzverhältnisse im Tiefbau
- i) Ausbauvorhaben

Zu a: Die Maximale **Betriebstemperatur** eines thermischen Netzes bestimmt, ob kostengünstige PMR-Rohre infrage kommen oder Stahlmediumrohre eingesetzt werden müssen. Bei einem Betrieb bis zu der von den Herstellern angegeben Dauerbetriebstemperatur wird eine Lebensdauer von mindestens 30 Jahren gewährleistet.

Zu b: Der maximale **Betriebsdruck** in einem thermischen Netz hängt von den dynamischen Druckverlusten im Netz und von der Topografie ab (Differenz zwischen dem Standort der Druckhaltung zum höchsten und tiefsten Punkt im Netz). Daraus kann die notwendige Nenndruckstufe abgeleitet werden. Grundsätzlich können in einem Netz auch Bauteile mit unterschiedlichen Nenndruckstufen eingesetzt werden. Zur Klärung, ob dadurch Kostenersparnisse erzielt werden, sind die möglichen Betriebsfälle, der langfristige Ausbau und Betrieb sowie die Standorte im Netz zu beachten.

Zu c: Die Möglichkeit der **Leckageüberwachung** muss mit der Auswahl des Rohrleitungssystems getroffen werden.

Zu d: Die Auswahl der **Dämmstärke** der Wärmedämmung ist anhand einer Wirtschaftlichkeitsberechnung zu klären, wobei die Kapitalkosten bei verschiedenen Dämmstärken den Wärmeverlustkosten gegenüberzustellen sind.

Zu e: Die **Kundendichte** und somit die Anzahl der Abzweigungen im Wärmeverteilnetz kann einen Einfluss auf die Wahl des Rohrsystems haben, da zum Beispiel Doppelrohrsysteme bei einer grossen Anzahl von Abzweignern unvorteilhaft sind.

Zu f: Es ist darauf zu achten, dass einzelne Rohrsysteme nur einen begrenzten Bereich an Rohrdurchmessern abdecken und insbesondere der **maximale Rohrdurchmesser** limitiert sein kann.

Zu g: Bei der **Verlegung** sind unterschiedliche Verlegungsmethoden zu beachten. Die Wahl der Verlegungsmethode ist Abhängig von den Einsatzmöglichkeiten des ausgewählten Rohrsystems. Gegebenenfalls sind Änderungen in der Verlegung oder bei der Wahl des Rohrsystems vorzusehen.

Zu h: Sollte bereits im Vorfeld bekannt sein, dass die **Platzverhältnisse im Tiefbau** (insbesondere bei erdverlegten Rohrsystemen) Einschränkungen unterliegen, muss dies in Bezug auf das ausgewählte Rohrsystem detailliert geprüft werden.

Zu i: Bei der Auswahl des Rohrleitungssystems muss der Endausbau eines Projektes betrachtet werden, da sich die vorgenannten Parameter im Laufe des **Netzausbaus** verändern können. So könnte zum Beispiel ein thermisches Netz aufgrund steigender Kundenzahl oder unerwarteter Verdichtung später mit höheren Temperaturen und Drücken betrieben werden.

Die Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht zu den einzelnen Rohrsystemen. In der Tabelle 4.2 sind die standardmäßig verfügbaren Nenndurchmesser für die Rohrsysteme KMR, MMR und PMR einiger Lieferanten aufgelistet.

Tabelle 4.1 Übersicht Rohrsysteme.

| Rohrsystem                          | Anwendungsbereich                       |                         |              |                    | Lieferbare Längen |          | Doppelrohr-Ausführung<br>bis DN | Bemerkungen                                                                                    |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|--------------|--------------------|-------------------|----------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                     | maximal zulässige<br>Betriebstemperatur | Dauerbetriebstemperatur | Nenndruck PN | Nenndurchmesser DN | Stangen           | Rollen   |                                 |                                                                                                |
|                                     | °C                                      | °C                      | bar          | –                  | m                 | m        |                                 |                                                                                                |
|                                     |                                         |                         |              |                    |                   |          | –                               | –                                                                                              |
| KMR                                 | 160                                     | bis 140                 | 25           | 20–1200            | 6/12/16*          | –        | DN 300                          | Aufgrund der Standardisierung und der Robustheit, das am häufigsten eingesetzte Rohrsystem     |
| MMR                                 | 180                                     | bis 160                 | 25           | 20–150             | 12*               | bis 1000 | DN 50                           | Relativ teuer. Sinnvoll wenn Verlegebedingungen es notwendig machen und KMR teurer wäre.       |
| PMR   (standard)<br><br>(verstärkt) | 95                                      | 80                      | 6            | 20–150             | 12*               | bis 780  | DN 65                           | Relativ günstig. Eingeschränkte Druck- und Temperaturbeständigkeit.                            |
|                                     | 115                                     | 95                      | 10/16        | 20–150             | 12*               | bis 780  | DN 65                           | Relativ günstig. Erhöhte Druck- und Temperaturbeständigkeit gegenüber PMR (standard).          |
| PE-Rohre                            | 50                                      | 40                      | 10/16/25     | 20–600             | 5 bis 12          | 50 / 100 |                                 | Relativ günstig. Eingeschränkte Temperaturbeständigkeit                                        |
| Duktile Gussrohre                   | 50                                      | 40                      | 25 bis 100   | 80-700             | 6                 | –        | –                               | Relativ teuer. Sinnvoll bei schwierigen Bedingungen, eingeschränkte Temperaturbeständigkeit    |
| GFK                                 | 160                                     | 160                     | 16           | 25–1000            | 6*                | –        | –                               | Relativ teuer. Nur bei besonderen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit gerechtfertigt. |
| SMR                                 | 400                                     | 400                     | bis 64       | 25–1200            | 16*               | –        | **                              | Relativ teuer. Nur wenn die Druck-, Temperatur- oder Verlegebedingungen es notwendig machen.   |

\*Standardlänge/n, andere Längen auf Anfrage lieferbar.

\*\* Sonderausführungen auf Anfrage möglich (z. B. Mehrfachrohrausführung)

Tabelle 4.2 Grober Überblick zu standardmässig verfügbaren Nenndurchmesser für die Rohrsysteme KMR, MMR, PMR, PE- und duktile Gussrohre inkl. Angaben zu Dämmstärke und Duo-Rohr-Ausführung. Ohne Gewähr der Vollständigkeit.

KMR: Kunststoffverbundmantelrohr; MMR: Metallmediumrohr; PMR: Kunststoffmediumrohr.

DS: Dämmstärken bei KMR, aufsteigend in der Stärke von 1 nach 3.

S: Standard Dämmung bei MMR und PMR; V: Verstärkte Dämmung bei MMR und PMR.

| DN   | KMR  |      |      | KMR-Duo |      |      | MMR |   | MMR-Duo |   | PMR |   | PMR-Duo |   | PE-Rohre | Duktile Gussrohre |
|------|------|------|------|---------|------|------|-----|---|---------|---|-----|---|---------|---|----------|-------------------|
|      | DS 1 | DS 2 | DS 3 | DS 1    | DS 2 | DS 3 | S   | V | S       | V | S   | V | S       | V |          |                   |
| 20   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 25   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 32   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 40   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 50   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 65   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 80   |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 100  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 125  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 150  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 200  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 250  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 300  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 350  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 400  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 450  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 500  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 600  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 700  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 800  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 900  |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |
| 1000 |      |      |      |         |      |      |     |   |         |   |     |   |         |   |          |                   |

## 4.2.2 Leckageüberwachung

Thermische Netze verfügen je nach Rohrsystem über eine Einrichtung zur Leckageüberwachung. Diese elektrische Überwachung von Feuchtigkeitsein- und austritt wird bei KMR- und MMR-Rohren standardmässig angeboten. Eine kontinuierliche Überwachung mit zentraler Leckortung erhöht die Versorgungssicherheit eines thermischen Netzes. Dadurch können zeitliche und wirtschaftliche Beeinträchtigungen durch Schäden minimal gehalten werden.

Die heute angewandten **Leckageüberwachungssysteme** messen entweder den elektrischen Widerstand der Wärmedämmung zwischen zwei Adern oder zwischen einer Ader und dem Mediumrohr. Bei einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung oder des Indikators sinkt der Widerstand. Durch die Verwendung von zwei Adern kann eine Überwachungsschleife gebildet werden. Die Überwachung dieser Schleife stellt sicher, dass der ganze Kreis überwacht wird. Bei der Auswahl des Leckageüberwachungssystems sollte darauf geachtet werden, dass das Messprinzip eine frühe Erkennung von Schäden (Feuchtigkeitseintritt in die Dämmung aufgrund von Schäden am Aussenmantel oder am Mediumrohr der Fernwärmerohre) sowie eine genaue Ortung dieser ermöglicht, damit frühestmöglich mit den Instandhaltungsarbeiten begonnen werden kann. **Dies ermöglicht eine kontinuierliche Leckageüberwachung und wird grundsätzlich empfohlen.**

Alternativ können mittels **Thermografie** Leckagen ebenfalls geortet werden. Diese Methode wird in der Regel angewendet, wenn keine (vollständige) elektrische Überwachung beim Bau des thermischen Netzes eingebaut wurde. Der Aufwand dazu ist relativ gross und nur bei kalten Aussentemperaturen sinnvoll. Weiter ist zu beachten, dass Messungen mit Fluggeräten wie Flächenflugzeuge, Helikopter oder Drohen erstellt und genehmigt werden müssen. Diesbezüglich sind Flüge in urbanen (Wohn)Gebieten und in der Nähe von kritischen Infrastrukturanlagen wie zum Beispiel Flughäfen speziell herausfordernd.

Bei Niedertemperaturnetzen mit Vorlauftemperaturen unter 40°C und Rohrsystemen ohne Leckageüberwachung (Z. B. PE-Rohre oder Duktile Gussrohre) ist die Thermografie wegen den geringen Temperaturunterschieden und Volumen vielfach nicht zielführend. Alternativ kann dabei ein **Schnüffelpgas mit Oberflächenortung** eingesetzt werden. Diese Methode ist ebenfalls sehr aufwändig und nur bei stillgelegten Netzabschnitten möglich.

Bei der **Kanalverlegung** wird die visuelle Schachtkontrolle als ausreichend erachtet, gegebenenfalls sind automatische Einrichtungen zur Schachtüberwachung zu verwenden. Freileitungen werden in der Regel ohne Überwachungssysteme betrieben. Werden aber Rohrsysteme mit vorhandenem Leckageüberwachungssystem eingesetzt, spricht nichts dagegen, dieses System auch in solchen Situationen einzusetzen.

### 4.2.2.1 Elektrische Überwachungssysteme

Die Leckageüberwachung eines thermischen Netzes mit KMR- und MMR-Rohren erfolgt standardmässig mit fest eingebauten, elektrisch leitenden Drähten/Ader, wofür digitale oder analoge Messgeräte eingesetzt werden:

- **Zentrale Überwachung:** Alle Daten und Werte der Überwachung und mehrerer Überwachungskreise werden an einem zentralen Ort erfasst.
- **Dezentrale Überwachung:** Überwachungsgeräte sind vor Ort in den Überwachungskreisen installiert. Die Daten werden entweder in einem periodischen Turnus abgefragt oder die Alarmer werden übertragen.
- **Manuelle Überwachung:** Im festgelegten Turnus werden die momentanen Zustandswerte durch transportable Überwachungsgeräte überprüft.

Bei den nachfolgend beschriebenen Überwachungssystemen ist mit dem Begriff System die in der Dämmung des Rohres verwendeten Adern (Kabel) gemeint.

#### Brandes-System (NiCr-Ader)

Das Brandes-System, auch bekannt als Widerstandsdraht-System, besteht aus zwei sich nicht berührenden Adern. Einer Sensorader mit perforierter Isolation aus NiCr (80 % Ni und 20 % Cr) und einer vollisolierten Rückführader aus Kupfer. Die Perforation erlaubt es, Feuchtigkeit im Schaum zu detektieren. An jedem Rohrende werden die beiden Adern verbunden und es wird so eine Überwachungsschleife gebildet. Der hohe Widerstand der Fühleradern hat den Vorteil, dass daraus ein direkter Rückschluss auf die angeschlossene Rohrlänge bzw. Fühleraderlänge gemacht werden kann, womit eine präzise Ortung von Feuchtestellen möglich ist. Ein weiterer Vorteil liegt in der einheitlichen Anwendung und Verdrahtung der Adern durch alle Hersteller und Lieferanten von Rohrsystemen.

#### Nordisches-System (Kupferadern)

Das Nordische-System verwendet zwei sich nicht berührende Kupferadern. Diese können je nach Lieferant unterschiedlich ausgebildet sein. Es gibt blanke, verzinnte und isolierte Adern, wobei sich die Anwendung von zwei blanken Adern mehrheitlich durchgesetzt hat (verzinnete Adern gelten ebenfalls als blank). Ein wesentlicher Vorteil des nordischen Systems liegt in der günstigen Beschaffung der Adern. Ein Durchmischen der verschiedenen Aderntypen ist jedoch nicht zu empfehlen. Die Nachteile der Ortungsgenauigkeit von Feuchtestellen mit dem nachfolgend beschriebenen Widerstands-Referenz-Messverfahren können durch verlöten der Verbindungen im Rohrbereich praktisch eliminiert werden. Wie beim Brandes-System werden die Adern an allen Rohrenden miteinander verbunden um eine Überwachungsschleife zu bilden.

#### Hierarchische Systeme

Hierarchische Systeme oder sogenannte Indikator-Systeme benutzen zwei isolierte und verdrehte Kupferadern in der Wärmedämmung. Als Sensoren werden an den Schweissstellen Indikatoren eingebaut, die zum Beispiel aus zwei in Kunststoffgittern gehaltenen und

durch ein anorganisches Keramikvlies gegeneinander isolierten Kupferplättchen bestehen. Bei Auftreten von Feuchtigkeit sinkt der Isolationswiderstand des Keramikvlieses. Die Veränderung des Widerstands ist somit das Überwachungskriterium. Wenn die gesamte Rohrlänge kontrolliert werden soll, müssen entsprechende Überwachungsadern in die Wärmedämmung mit eingebaut werden, die Messungen sind dann allerdings nicht mehr potenzialfrei. Abzweige werden in diesem aus maximal vier Hierarchien bestehenden System über sogenannte Trennweichen angeschlossen. Die Anzahl der Abzweige ist in den einzelnen Hierarchien nahezu frei wählbar. Netzerweiterungen können ohne Eingriff in eine bestehende Anlage vorgenommen werden. Alle angeschlossenen Leitungen werden auf Feuchtigkeit überwacht und die Hauptleitung zusätzlich auf Drahtbruch. Es kann auch bei Rohren verwendet werden, die nicht aus Metall sind. Als nachteilig zu betrachten sind die aufwendige Dokumentation der verschiedenen Hierarchien, der Einsatz von elektronischen Komponenten (anfällig auf Überspannung) und dass die Rohre nur im Muffenbereich auf Feuchtigkeit überwacht werden.

#### 4.2.2.2 Ortungsverfahren

##### Widerstands-Referenz-Messverfahren

Beim Widerstands-Referenz-Messverfahren erfolgt die Ortung einer Feuchtestelle nach dem Prinzip des unbelasteten Spannungsteilers und kommt hauptsächlich beim Brandes-System zur Anwendung. Kann aber

unter Umständen auch beim nordischen System eingesetzt werden. Mit einer „Messbrücke“ werden die beiden Teilstrecken – Schleifenanfang bis Fehlerstelle und Schleifenende bis Fehlerstelle – miteinander verglichen und so eine prozentuale Lage des Fehlers ermittelt. Die Genauigkeit der Ortung steigt mit der Intensität der Feuchte und der abnehmenden Länge der Messstrecke. Der Nachteil ist, dass mehrfache Feuchteschäden in einer Messstrecke nicht als Solche erfasst werden. In diesem Fall wird lediglich ein Mittelwert ausgegeben.

##### Impulslaufzeit-Messverfahren

Beim Impulslaufzeit-Messverfahren wird der Wellenwiderstand der Überwachungsadern genutzt, wie dies auch bei der Fehlerortung in der Kabeltechnik angewendet wird. Vom Ortungsgerät ausgehende Impulse werden an Stellen mit abweichendem „Widerstand“, also Durchfeuchtung oder Aderunterbrechungen unterschiedlich stark reflektiert. Als Mass für den Fehlerort gilt die Laufzeit, die der eingespeiste Impuls vom Leitungsauftrag bis zur Fehlerstelle benötigt. Dieses Verfahren benötigt zur Ortung einer Feuchtestelle eine deutlichere Durchnässung als das Widerstands-Referenz-Messverfahren. Das Impulslaufzeit-Messverfahren eignet sich gut zur Ortung von Aderunterbrüchen.

Die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Leckageüberwachungssysteme sind in der Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3 Vergleich der Systeme zur Leckageüberwachung

| Kriterien                                    | Nordisches-System                                                                                                                               | Brandes-System (NiCr)                                                                                                                            | Indikator-System                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fühleradern</b>                           | zwei sich nicht berührende und nicht isolierte Kupferadern                                                                                      | eine Ader aus NiCr mit perforierter Teflon-Isolierung<br>eine Ader aus Kupfer                                                                    | zwei isolierte und verdrehte Kupferadern mit Indikatoren als Sensoren an den Schweissstellen                                                                                  |
| <b>Messverfahren</b>                         | Impulslaufzeit-Messverfahren und Prinzip des unbelasteten Spannungsteilers                                                                      | Prinzip des unbelasteten Spannungsteilers und Impulslaufzeit-Messverfahren                                                                       | Impulslaufzeit-Messverfahren                                                                                                                                                  |
| <b>Fehlererfassung</b>                       | Feuchte in der Wärmedämmung<br>Kurzschluss der Adern<br>Aderunterbrechungen                                                                     | Feuchte in der Wärmedämmung<br>Kurzschluss der Adern<br>Aderunterbrechungen                                                                      | Feuchte in den Indikatoren (je Schweissstelle bzw. Rohrabschnitt)<br>Kurzschluss der Adern<br>Aderunterbrechungen                                                             |
| <b>Anzeigetoleranz</b>                       | 1-3 % der Messstrecke (z.B. Überwachungsabschnitt)<br>Die genügend genaue Ortung der Leckage erfolgt durch iterative Anpassung der Messstrecke. | ± 0.2 % der Messstrecke (z.B. Überwachungsabschnitt)<br>Die genügend genaue Ortung der Leckage erfolgt durch iterative Anpassung der Messstrecke | < 1 m (je Indikator)                                                                                                                                                          |
| <b>Überwachungsmöglichkeit</b>               | Zentral<br>Dezentral<br>Manuell                                                                                                                 | Zentral<br>Dezentral<br>Manuell                                                                                                                  | Zentral<br>Dezentral<br>Manuell                                                                                                                                               |
| <b>Gleichzeitige Ortung mehrerer Schäden</b> | unter Umständen möglich, bei Aufteilung der Schleife                                                                                            | unter Umständen möglich, bei Aufteilung der Schleife                                                                                             | möglich, bei Aufteilung 1. Fehler sichtbar in Hierarchie                                                                                                                      |
| <b>Länge der Überwachungsabschnitte</b>      | 2'500 m Trasse oder 5'000 m Draht (beide Adern zählen)                                                                                          | 2'500 m Trasse (nur eine Ader zählt)                                                                                                             | hierarchische Unterteilung der Ortungsabschnitte, max. 4 Hierarchien (0-3)<br>0. Hierarchie 1000 m<br>1-3. Hierarchie 1000 m<br>Anzahl Abzweige pro Hierarchie nicht begrenzt |

### 4.2.2.3 Dokumentation und Prüfung

#### Dokumentation

Für die optimale Nutzung einer Überwachungs- und Ortungsanlage ist eine ausführliche und auf den aktuellen Stand nachgeführte Dokumentation über das thermische Netz zwingend erforderlich. Diese umfasst idealerweise auch die Stromlauf- und Verdrahtungspläne, Schleifenpläne, Angaben über Lage und Anordnung von Sensoren und anderen Bauteilen sowie das Abnahmeprotokoll mit Angaben über Prüfungen und Messungen. Es ist darauf zu achten, dass die verschiedenen verwendeten Rohrtypen ersichtlich sind.

#### Prüfung

Nach dem Verbinden der Leckwarndrähte im Zuge der Herstellung der Muffenverbindungen sind die Fühler-schleifen auf Länge, Unterbrechung, metallischen Kontakt und Fremdspannungen mittels eines Montageprüfgerätes zu überprüfen. Eine Isolationsprüfung sollte etwa vier Wochen nach der Inbetriebnahme der Leitung wiederholt werden. Der Isolationswiderstand der verlegten Rohre sollte im Mega-Ohm-Bereich liegen.

### 4.2.3 Armaturen

Wichtig für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb eines thermischen Netzes sind Armaturen. Diese können für die Regelung oder zur Absperrung von Stoffströmen eingesetzt werden. Nachfolgend wird vor allem auf die Funktion der Absperrung eingegangen, da die Funktion der Regelung im Wesentlichen in Anlagen zur Erzeugung, Druckhaltung und Übergabestationen zum Einsatz kommt und dafür praktisch ausschliesslich Ventile eingesetzt werden (siehe auch Kapitel 5.2.3).

Armaturen zur Absperrung, sogenannte Absperrarmaturen, werden für spätere Netzerweiterungen, für allfällige Wartungs- und Unterhaltsarbeiten zur Unterbrechung des Netzbetriebs sowie zum Entleeren und Entlüften der Leitungen eingesetzt. Wie oft oder in welchen Abständen eine Absperrarmatur einzusetzen ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Grundsätzlich sollten so wenig wie möglich (Kosten) aber so viele wie notwendig eingebaut werden (Betrieb, Ausbau etc.). Dies hängt vor allem von der Netzstruktur ab und ist im Einzelfall zu entscheiden. Ein weiteres Entscheidungskriterium kann der Wartungsaufwand sein, bei der das Füllvolumen und Arbeitszeit zusätzlich berücksichtigt wird, indem innerhalb einer Schicht ein Abschnitt entleert, gewartet/repariert und wieder befüllt werden kann.

Folgende grundlegenden Anforderungen werden an die Absperrarmaturen im Verteilnetz gestellt:

- Geringer Druckverlust
- Geringer Platzbedarf
- Dichter Abschluss in beide Richtungen
- Dichtheit der Gehäusedurchführungen
- Geringer Wartungsaufwand
- Geringe Fliessgeräusche
- Austauschbarkeit
- Dämmbar (thermisch)
- Zähigkeit des Gehäusewerkstoffes
- Funktionalität auch bei seltener Anwendung

Einzelne Anforderungen beeinflussen sich gegenseitig, sodass nicht alle gleichzeitig im gleichen Masse erfüllt werden können und die wichtigsten Kriterien nach Bedarf festgelegt werden müssen.

Weiter können Armaturen je nach Ausführung und Einbindung störende Geräusche verursachen. Zu ihrer Unterdrückung gibt es in der VDI-Richtlinie 3733 [128] eine Reihe von Hinweisen. Hauptursachen für die Geräuschentwicklung sind hohe Strömungsgeschwindigkeiten, Richtungsänderungen und Störung der Strömung durch Hindernisse. Bei voll geöffneter Armatur mit vollem Durchgang ist in der Regel die Geräuschentwicklung zu vernachlässigen, solange die Leitungen und Armaturen entsprechend den Empfehlungen in Kapitel 4.11 dimensioniert werden und somit bestimmte Strömungsgeschwindigkeiten nicht überschritten werden.

In thermischen Netzen werden die folgenden vier Grundbauarten Hähne, Schieber, Klappen und Ventile eingesetzt. Sie können in Bezug auf ihr Gehäuse in

gegossener, geschmiedeter oder geschweisster Ausführung hergestellt werden. Je nach Druck- und Temperaturverhältnissen ist die Verwendung zäher Werkstoffe unabdingbar. Die Armaturen werden entweder durch Einschweissen oder mit Flanschverbindungen in die Leitung eingebaut.

Je nach Baugrösse und Standort werden die Armaturen in Schächten platziert oder erdverlegt. Verteilnetze mit erdverlegten Armaturen (insbesondere Kugelhähne) sind in der Regel günstiger zu bauen, die Armaturen müssen im Betrieb jedoch deutlich höhere Belastungen aushalten. Dazu gehören erhöhte Zug- und Druckspannungen, erhöhte Biegemomente sowie Umwelteinflüsse aus dem Tiefbau. Aus diesem Grund sollten erdverlegte Armaturen zwingend nach EN 488 [129] ausgeführt werden.

#### 4.2.3.1 Hähne

Hähne im Allgemeinen bieten Vorteile durch die einfache und robuste Bauweise, den geringen Platzbedarf, und geringen Druckverlust bei strömungstechnisch günstiger Konstruktion des Öffnungsquerschnittes. Der Durchgangsquerschnitt der Hähne entspricht in der Regel dem zur gleichen Nennweite gehörenden Rohrquerschnitt, einem sogenannten Volldurchgang.

Aufgrund langjähriger Erfahrung im Einsatz in thermischen Netzen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Sicherheit, Platzbedarf und geringem Druckverlust, haben sich insbesondere **(erdverlegte) Kugelhähne** bewährt (siehe Bild 4.12). Vereinfacht dargestellt besteht ein Kugelhahn aus drei Teilen, der Kugel, dem Dichtelement und dem Gehäuse. Der Kugelhahn sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Volldurchgang und wenn möglich zylindrischer Durchgang ohne Querschnittverengung. Diese Anforderung ist klar zu spezifizieren, da ansonsten die Gefahr besteht, dass Kugelhähne mit reduziertem Durchgang angeboten werden.
- Kompakte Bauform.
- Hohe Stabilität gegen innere und äussere Kräfte.
- Dichtmittelfrei.
- Wartungsfrei (bis auf Betätigung einmal pro Jahr).
- Hohe Dichtheit bei niedriger Dichtkraft.
- Bidirektional dicht (Dichtigkeitsklasse A).
- Geschützte Lage der Dichtungen.

Gehäuse und Kugel der Kugelhähne werden gewöhnlich aus Stahl bzw. Edelstahl hergestellt. Bis PN 16 können Gehäuse oder Teile davon auch aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GGG) und ab PN 25 auch aus Stahlguss hergestellt sein. Ab DN 150 ist auf eine doppelte Lagerung der Kugel zu achten, dies damit das Dichtelement nicht die ganzen Kräfte aufnehmen muss. Zudem soll die ganze Konstruktion möglichst stabil sein, damit unter Last eine Verformung oder Beschädigung des Gehäuses vermieden wird und die Bedienkräfte nicht unnötig erhöht werden.

Die feststehenden Dichtelemente gleiten beim Schaltvorgang auf der Kugel. Schadhafte Dichtungen können gerade im Zentralbereich je nach Ausführung des

Kugelhahns ersetzt werden. Um den Wartungsaufwand gering zu halten und den Wartungsintervall zu verlängern, ist auf den Einsatz von vorgespannten (angefederten) Dichtelemente zu achten. Zudem sollten die Kugelhähne in beiden Richtungen Dicht sein (bidirektional, Dichtigkeitsklasse A).

Zur Betätigung der Hähne werden etwa ab DN 125 Vorgelege in offenen oder geschlossenen Getriebekästen erforderlich (Bild 4.12). Im erdverlegten Bereich wird für die Betätigung in der Regel ein mobiles Getriebe eingesetzt. Antriebe sollten über Spindelverlängerungen angeschlossen werden, damit eine sachgemässe Wärmedämmung der Rohrleitung und der Armatur möglich wird.

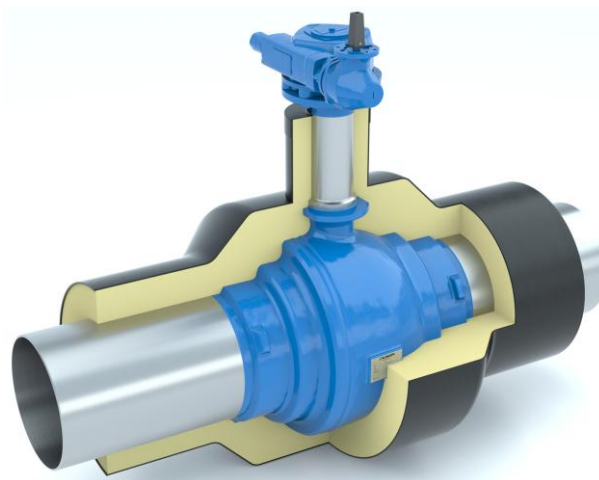


Bild 4.12 Kugelhahn für die Erdverlegung (vorisoliert) mit Volldurchgang, doppelter Lagerung, Handgetriebe und Schweissenden. Quelle: Klinger Gysi, KHSVI-VVS DN 150-250

**Hähne mit zylindrischem Küken** (Kükenhähne) weisen in der Regel keinen Volldurchgang aus, da der Durchgang durch das Küken «rechteckig» ist und daher das Gehäuse verengt ist. Aus diesem Grund verursachen diese Armaturen einen grösseren Druckverlust als Armaturen mit Volldurchgang.

Kükenhähne sind auch weniger Anfällig auf Verschmutzung, haben jedoch höhere Bedienkräfte und weisen einen grösseren Wartungsaufwand auf, da in gewissen Zeitabständen, unabhängig von den Betriebsverhältnissen und der Häufigkeit der Bedienung, diese nachzudichten sind. Das Dichtmittel hat neben der Dichtfunktion auch Korrosionsschutzaufgaben zu übernehmen.

Als Dichtung zwischen dem oberen Gehäuseteil und dem Küken ist eine O-Ringdichtung aus Perbunan oder PTFE eingebaut. Eine Stopfbuchsen Packung ist daher nicht nötig. Das Dichtmittel wird in die Nuten des Kükens gepresst und auf die Dichtflächen verteilt. Hähne ab DN 200 haben ausser am Küken weitere Füllöffnungen im Hahngehäuse. Um ein Herausdrücken des Dichtmittels durch das Medium zu verhindern, ist jede Öffnung mit einem Kugel-Rückschlagventil abgesichert. Während des Dichtens muss der Hahn geöffnet sein, zwischendurch jedoch muss das Küken wiederholt

bewegt werden, um eine gute Verteilung des Dichtmittels zu erreichen.

Entsprechend ist der Wartungsaufwand für solche Hähne deutlich grösser und in Zeiten knapper Personalkapazitäten nicht die geeignete Wahl für einen grossflächigen Einsatz.

#### 4.2.3.2 Schieber

Für Absperrschieber ergeben sich aus den verschiedenen Konstruktionsmerkmalen die in Tabelle 4.4 dargestellten Bezeichnungen.

Tabelle 4.4 Schieberbauarten [130].

| Merkmal                           | Bezeichnung               |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Absperrlement                     | Keilschieber              |
|                                   | Doppelplattenschieber     |
|                                   | Keilplattenschieber       |
|                                   | Scheibenabschlussschieber |
| Form des Deckelstutzens / Gehäuse | Flachschieber             |
|                                   | Ovalschieber              |
|                                   | Rundschieber              |

Schieber kommen in thermischen Netzen immer weniger zum Einsatz, vielfach noch in Zentralen oder in grossen Schächten. In der Regel werden dabei Keilschieber eingesetzt (siehe Bild 4.13). Zum Beispiel auch Schieber mit geteilten Abschlussplatten und Spreizkeilen, die kurz vor Beendigung des Schliessvorgangs die Abschlussplatten auf das Gehäuse pressen.

Ein weiteres wichtiges Element ist die Spindel, mit der der Abschlusskörper betätigt wird. Entsprechend der Spindelbewegung ist eine Einteilung möglich, wie in Tabelle 4.5 dargestellt.

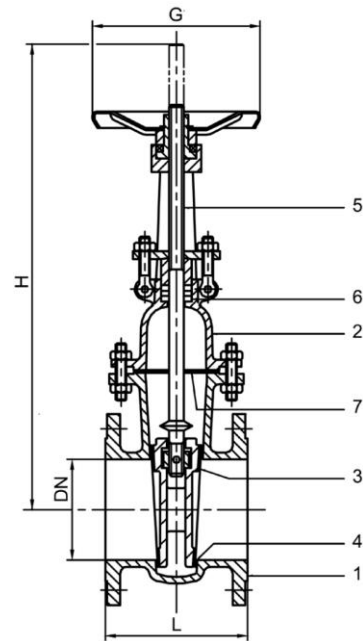


Bild 4.13 Keilschieber, metallisch dichtend mit Flansch (Stellung geschlossen). Quelle: Klinger Gysi, GYSI-RT, Stahl, Spindel aussenliegend, PN 16

Tabelle 4.5 Einteilung der Schieber nach der Spindelbewegung [130].

| Kriterien              | Innenliegende Spindel                                                                                                                  | Aussenliegende Spindel                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bewegung der Spindel   | Drehbewegung                                                                                                                           | Axiale Hubbewegung und Drehbewegung                                                                                                                                                                                    | Axiale Hubbewegung                                                                                                                                                                                                                           |
| Bewegung des Handrades | nicht steigend                                                                                                                         | steigend                                                                                                                                                                                                               | Nicht steigend                                                                                                                                                                                                                               |
| Vorteil                | Geringe Bauhöhe bei geschlossenem und geöffnetem Schieber. Keine Verschmutzung des Spindelgewindes                                     | Einfache Bauart. Besserer Schutz des Spindelgewindes gegen strömendes Medium. Geringere Betätigungskräfte. Zweifache Führung der Spindel. Sichtkontrolle der Spindelposition. Handradstellung entspricht Keilstellung. | Einfache Bauart. Besserer Schutz des Spindelgewindes gegen strömendes Medium. Geringere Betätigungskräfte. Zweifache Führung der Spindel. Sichtkontrolle der Spindelposition. Spindelstellung entspricht Keilstellung. Geringer Platzbedarf. |
| Nachteil               | Das Spindelgewinde ist dem strömenden Medium ausgesetzt und der Sichtkontrolle entzogen. Verschmutzung durch Ablagerungen ist möglich. | Mehr Raumbedarf und unbequeme Bedienung, da Stellung des Handrades sich ändert. Verschmutzung am Gewinde durch äussere Einflüsse möglich.                                                                              | Mehr Fertigungsaufwand und daher teurer. Verschmutzung am Gewinde durch äussere Einflüsse möglich.                                                                                                                                           |

Die eingesetzten Werkstoffe für Schieber richten sich nach dem Einsatzbereich. Im Warmwasserbereich bis 110°C und 16 bar kann lamellarer Grauguss (GG) eingesetzt werden. Bei höheren Drücken und Temperaturen sollte ein Werkstoff mit höherer Zähigkeit wie Grauguss mit Kugelgraphit (GGG), Stahlguss oder Schmiedestahl verwendet werden. In den meisten Fällen wirken auf die Armaturen ausser dem Innendruck noch Kräfte und Momente aus der Wärmedehnung der Rohrleitung. Diese Beanspruchungen sprechen für die Verwendung eines zähen Armaturenwerkstoffes.

Beim Einsatz von Stahlguss- oder Schweisskonstruktionen kann die Kraftaufnahme erheblich erhöht werden. Schieber bis etwa DN 250 werden vorzugsweise im

Gesenk hohlgeschmiedet. Auch werden ab etwa DN 50 Schieber in Schweisskonstruktionen aus Stahlblech wegen ihrer guten Festigkeitseigenschaften angewendet. Schieber sollten aufgrund der Formgebung so steif sein, dass die Sitzflächen keine Verformungen durch Rohrleitungskräfte und Druckbeanspruchungen erleiden und die Dichtheit nicht beeinträchtigt wird.

Schieber in thermischen Netzen weisen meist folgende Konstruktionsmerkmale auf:

- Flexibler Keil oder Doppelplattenkeil. Doppelplattenkeil ist unempfindlich gegen Verformung durch Kräfte und Momente aus der Rohrleitung. Er ist ausserdem reparaturfreundlich.

- Aussenliegende Spindel, wenn es der Platzbedarf zulässt. Aber auch innenliegende Spindeln sind gebräuchlich. Hierbei ist auf die Stopfbuchsabdichtung besonders zu achten. Eine innenliegende Spindel ist erst ab DN 200 sinnvoll.
- Metallische Dichtflächen.
- Leckrate 1 nach [131].
- Ausreichende Härte und Dicke der Panzerung auf den Dichtflächen.
- Möglichkeit des nachträglichen Einbaues eines automatisierten Antriebes.

#### 4.2.3.3 Klappen

Klappen sind Absperrorgane, deren Abschlusskörper überwiegend die Form einer Scheibe haben, die sich innerhalb des zylindrischen Gehäuses um eine Achse dreht. Sie haben durch kompakte Bauweise gegenüber anderen Absperrorganen den Vorteil des geringsten Raumbedarfs und sind ausserdem leicht bedienbar. Klappen sind teilweise so konstruiert, dass sie von beiden Seiten beaufschlagt werden können.

Die Dicke der kreisförmigen oder annähernd kreisförmigen Scheibe ist abhängig vom Betriebsdruck des Mediums. Wenn die Drehscheibe ausserhalb der Scheibenmitte liegt, können Unterbrechungen des Dichtringes vermieden werden.

Die Klappenscheibe wird über die einseitig durch das Gehäuse geführte Antriebswelle mit einem angebauten Getriebe verstellt und die Klappenscheibenstellung durch eine mechanisch übertragene Anzeigevorrichtung kenntlich gemacht.

Das Gehäuse wird entweder mit Anschweissenden oder Anschlussflanschen hergestellt. Es kann auch als flanschloses Klappengehäuse zum Einklemmen zwischen zwei Rohrleitungsflanschen ausgeführt werden. Schweisskonstruktionen für das Gehäuse haben sich gut bewährt. Ist der Sitzring der Klappenscheibendichtung in das Klappengehäuse eingeschweisst, dann trägt die Klappenscheibe die Dichtung. Umgekehrt kann aber auch die Profildichtung im Gehäuse angeordnet werden.

In Bild 4.14 sind die gebräuchlichsten Varianten der Lagerung der Klappenscheibe im Gehäuse dargestellt.

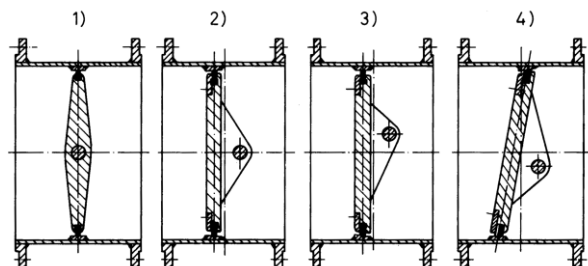


Bild 4.14 Anordnung der Klappenscheiben [130]:  
 1 Zentrische Lagerung  
 2 Exzentrische Lagerung  
 3 Doppel-exzentrische Lagerung  
 4 Doppel-exzentrische Lagerung (metallisch dichtend).

Für die Betätigung der Klappen stehen neben pneumatischen und hydraulischen Steuerzylindern auch Getriebe zur Verfügung, die in der Regel an das Klappengehäuse angeflanscht und direkt mit dem Antriebszapfen der Klappenscheibe verbunden sind. Die Getriebe müssen selbsthemmend ausgeführt und entsprechend dem maximal auftretenden Drehmoment der Absperrklappen unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors ausgelegt werden. Bei grossen Antriebsmotoren und wenn lange Schliesszeiten notwendig sind, können Stirnradvorgelege vorgeschaltet werden. Am häufigsten werden Schneckenrad-, Schraubenspindel- und Schubkurbelgetriebe verwendet.

#### 4.2.3.4 Ventile

Nach der konstruktiven Gestaltung werden die Ventiltbauarten nach Tabelle 4.6 unterschieden. Im Gegensatz zu den Schiebern gleiten die Sitzflächen der Ventile nicht aufeinander.

Tabelle 4.6 Ventiltbauarten [130]:

| Merkmal               | Bezeichnung         |
|-----------------------|---------------------|
| Art des Ventilsitzes  | Kolbensitzventil    |
|                       | Tellersitzventil    |
|                       | Kegelsitzventil     |
| Lage des Ventilsitzes | Gradsitzventil      |
|                       | Schrägsitzventil    |
| Deckelaufbau          | Aufsatzventil       |
|                       | Kopfstückventil     |
|                       | deckellooses Ventil |
| Strömungsrichtung     | Durchgangsventil    |
|                       | Eckventil           |

Ventile weisen gegenüber Schiebern folgende Vorteile auf, die ihren bevorzugten Einsatz im unteren Nennweitenbereich begründen:

- Einfacher Aufbau, dadurch geringere Herstellungskosten.
- Gute Abdichtung auch bei hohen Temperaturen und Drücken.
- Einfache Nachschleifmöglichkeit bei Beschädigung des Sitzes.

Nachteilig wirken sich folgende Kriterien aus:

- Begrenzung der Nennweite durch die erhöhte Betätigungskraft kurz vor der Schliesslage gegenüber von Schiebern und Klappen.
- Ventile lenken die Strömung stärker um als Schieber und Hähne. Sie haben deshalb einen relativ hohen Druckverlust.

Ventile sind in thermischen Netzen für die Sektionierung und Absperrung klar nicht die erste Wahl und wenn, dann ist ein Kolbenschieberventil die bevorzugte Bauform. Hingegen werden Ventile oft und gern für Entleerungen und Entlüftungen verwendet, welche nicht konstant durchströmt werden.

### 4.2.3.5 Einsatzbereich

Da für die Auswahl einer Armatur meist mehr als eine der beschriebenen Armaturentypen in Frage kommt, sind in der Tabelle 4.7 wichtige Eigenschaften von Absperrarmaturen vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 4.7 Qualitativer Vergleich wichtiger Eigenschaften von Absperrarmaturen [130].

| Vergleichskriterien                       | Kugelhahn                                          | Kükenhahn                                                                                                                   | Schieber                                                                                                                        | Klappe                                                                                     | Ventil                                      |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Sitz (Flächengrösse)                      | grosse Sitzfläche                                  | grosse Sitzfläche                                                                                                           | 2 breite Sitzringpaare                                                                                                          | 1 schmaler Sitzring                                                                        | 1 schmales Sitzringpaar                     |
| Baulänge                                  | mittel                                             | gross                                                                                                                       | klein                                                                                                                           | klein                                                                                      | gross                                       |
| Bauhöhe                                   | klein                                              | klein                                                                                                                       | gross                                                                                                                           | mittel                                                                                     | mittel                                      |
| Strömungswiderstand                       | klein                                              | klein                                                                                                                       | klein - mittel                                                                                                                  | mittel - hoch                                                                              | hoch                                        |
| Schaltzeit                                | kurz                                               | kurz                                                                                                                        | lang                                                                                                                            | kurz                                                                                       | mittel                                      |
| Betätigungshäufigkeit                     | gut                                                | gut                                                                                                                         | mittel                                                                                                                          | mittel                                                                                     | gut                                         |
| Eignung für Richtungswechsel der Strömung | gut                                                | gut                                                                                                                         | gut                                                                                                                             | gut                                                                                        | nicht geeignet                              |
| Verwendungsbereich                        | DN 20 bis DN 1000                                  | DN 10 bis DN 900                                                                                                            | DN 40 bis DN 1000                                                                                                               | DN 20 bis DN 1000                                                                          | DN 15 bis DN 200                            |
| Eignung bei äusseren Kräften und Momenten | unempfindlich wenn ohne Flansch (z.B. geschweisst) | Vorgabe der Grenzbelastungen bei der eine Betätigung noch möglich ist bei Überschreitung Verklemmen und Undichtheit möglich | unempfindlich besonders geeignet für die Aufnahme hoher Kräfte und Momente sind Rundschieber am anfälligsten sind Flachschieber | wenig empfindlich geeignet für die Aufnahme hoher Kräfte, ohne Einfluss auf die Abdichtung | empfindlich gegen hohe äussere Belastungen  |
| Funktionssicherheit                       | Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig        | Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig                                                                                 | Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig                                                                                     | Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig                                                | Betätigung mindestens 1x jährlich notwendig |
| Langlebigkeit                             | lang (60-80 Jahre)                                 | mittel / lang (40-60 Jahre)                                                                                                 | mittel / lang (40-60 Jahre)                                                                                                     | mittel / lang (30-60 Jahre)                                                                | mittel (20-40 Jahre)                        |
| Kosten inkl. Einbau                       | mittel tief (bei grossen DN)                       | mittel hoch (bei grossen DN)                                                                                                | mittel hoch (bei grossen DN)                                                                                                    | tief (Einklemmkappen) mittel                                                               | tief                                        |

### 4.2.3.6 Betriebliche Hinweise

#### Lagerung

Die richtige Lagerung und der fachgerechte Einbau spielen eine wesentliche Rolle für einen langfristigen und zuverlässigen Einsatz. Die Lagerung hat grundsätzlich nach den Vorgaben der Hersteller zu erfolgen. Für die Lagerung sind grundsätzlich folgende Punkte zu beachten [132]:

- Eine Verschmutzung, insbesondere im Inneren ist zu verhindern. Sind Schutzkappen durch den Hersteller angebracht, dürfen diese erst kurz vor dem Einbau entfernt werden.
- Zulässige Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung sind zu beachten.
- Kugelhähne ist in der Stellung offen zu lagern und einzubauen, da in dieser Position die Dichtelemente ordnungsgemäss geschützt werden. Absperrklappen und -schieber werden hingegen in Stellung Zu gelagert.

#### Einbau

Beim Einbau sind die Montage- und Einbauvorschriften der Hersteller zu beachten. Es gibt aber auch allgemeingültige Vorschriften, welche Herstellerübergreifend zu beachten sind [132]:

- Der Einbau ist nur durch geeignetes und geschultes Fachpersonal vorzunehmen. Bei Grossarmaturen sind die vom Hersteller vorgeschriebenen Anschlagpunkte zu verwenden.
- Bei der Montage von Flanschverbindungen sind neben den Vorgaben des Herstellers auch die Vorgaben des Dichtungsherstellers zu beachten und Drehmomente für Schrauben einzuhalten.
- Beim einschweissen sind die maximal zulässigen Temperaturen einzuhalten.

#### Stellantriebe

Bei hohen Differenzdrücken und grossen Nennweiten sind Spindeldrehmomente erforderlich, die durch Handkraft nicht mehr aufgebracht werden können. Die Grenze liegt für Schieber und Hähne im Nennweitenbereich um DN 200. Die Grenze kann bei Schiebern durch Anordnung von Kugellagern nach oben verschoben werden. Durch den Anbau von Übersetzungsgetrieben kann das Drehmoment herabgesetzt werden.

In folgenden Situationen wird die Betätigung durch einen Elektro-Antrieb empfohlen:

- Bei grossen Armaturen, bei denen die manuelle Betätigung zu anstrengend ist.
- Wenn die manuelle Betätigung in der erforderlichen Zeit nicht durchführbar ist.
- Bei Gefahr von Leib und Leben.
- Wenn eine zentrale Steuerung vorgesehen ist.
- Automatische Betätigung durch Impuls von Druck-, Temperatur- oder Niveaureglern.
- Wenn spezifische Ablaufprozedere vorgesehen sind.

Für die Fernbetätigung von Armaturen lassen sich auch hydraulische, vereinzelt auch pneumatische Antriebe einsetzen.

#### **Äussere Kräfte und Momente**

Die Aufnahme von Kräften und Momenten durch das Armaturengehäuse wird in DIN EN 12516-2 [133] behandelt.

Armaturen sollten nach Möglichkeit nicht im Bereich hoher äusserer Belastungen angeordnet werden und sie sollten kein Festpunkt der Leitung sein. Zur Entlastung der Armaturen sind gegebenenfalls konstruktive Massnahmen an der Rohrleitung erforderlich. Zuverlässige Aussagen über die am Einbauort zu erwartenden Kräfte und Momente sind aus einer statischen oder aus einer dynamischen Berechnung abzuleiten.

Die verschiedenen Armaturen reagieren unterschiedlich auf äussere Kräfte und Momente. Eine grobe Einteilung der Absperrarmaturen ist in Tabelle 4.7 zu sehen.

#### **Schliesszeiten und Druckstoss**

Jede Veränderung in der Durchflussmenge verursacht in einer unter Überdruck stehenden Rohrleitung Druckschwankungen, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten, dem sogenannten Druckstoss. Da im Betrieb solche Mengenänderungen häufig vorkommen, sind die Rückwirkungen von Druckschwankungen zu beachten. Für die Bemessung der Rohrleitung sind extreme Belastungsfälle massgebend. Sie können bei Notabschaltungen und bei plötzlichem Ausfall von Pumpen auftreten.

Die Schliesszeiten liegen erfahrungsgemäss im Bereich einiger Minuten. Die einzelnen Bauarten der Armaturen unterscheiden sich in der möglichen Schliess- und Öffnungszeit. Schnelle Schliess- und Öffnungsvorgänge sind deshalb auch bei Nennweiten  $\leq$  DN 150 möglichst zu vermeiden.

In Haupt- und Transportleitungen werden Umgehungen beziehungsweise Bypässe der Armaturen eingebaut. Umgehungen dienen dem Druckausgleich, verhindern einen zu grossen Druckstoss und erleichtern das Öffnen der Armaturen. Betreffend die Betätigung von Armaturen ist DIN EN 12266 Teil 1 [131] zu beachten.

#### **Wartung und Instandsetzung von Armaturen**

Für die Wartung und Instandsetzung von Armaturen sind die Herstellerangaben zu beachten. Diese Vorga-

ben sind im Rahmen der Gewährleistung zwingend einzuhalten. Bei Armaturen mit erhöhtem Wartungsaufwand muss überlegt werden, ob es sich lohnt diese durch eine weniger wartungsintensive Armatur zu ersetzen.

Die erforderlichen Wartungsarbeiten sind unter Berücksichtigung der geltenden Sicherheitsvorgaben und Vorschriften durchzuführen.

#### **Funktionssicherheit**

Zur Sicherstellung der Funktion wird eine Betätigung der Absperrarmaturen einmal jährlich empfohlen.

#### **4.2.3.7 Kennzeichnung und Dokumentation**

Die Armaturen sollen deutlich und dauerhaft mindestens folgendermassen gekennzeichnet werden:

- Nenndruckstufe
- Maximal zulässige Betriebstemperatur
- Fliessrichtung
- Hersteller, Typ und Fabrikationsnummer.

Antriebe sind mit Typenschilder zu kennzeichnen:

- Drehrichtung der abtreibenden Welle
- Schutzart
- Drehmoment bzw. Antriebsleistung nach DIN
- Hersteller, Typ und Fabrikationsnummer.

Dem Betreiber sollten folgende Unterlagen des Herstellers zur Verfügung stehen:

- Einbauvorschriften
- Bedienungsanleitungen
- Wartungsvorschriften
- Ersatz- und Verschleisssteilelisten
- Nachweis über Erzeugnis- und Werkstoffprüfungen.

## 4.3 Netzaufbau

Der Begriff thermisches Netz bezeichnet das Bindeglied zwischen Wärme- und/oder Kälteerzeugung und Kunden. Die Wahl von Netzstruktur, Trassenführung, Rohrsystem und Verlegungsmethode wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Nebst der Siedlungsstruktur bilden technische, geologische, ökonomische, sicherheitstechnische und strategische, aber auch architektonische und juristische Faktoren wichtige Entscheidungskriterien. Das Versorgungsgebiet eines thermischen Netzes stehen deshalb meist nicht von vornherein fest und ändert sich mit der Zeit.

Ein thermisches Netz wird in der Regel in Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen unterteilt (Bild 4.15). Die Hauptleitung entspricht der ersten Leitung ab der Energiezentrale. Daneben wird auch der Begriff Stammleitung oder bei grossen Wärmeerzeugern, die weit weg von den Versorgungsgebieten liegen, auch der Begriff Transportleitung verwendet. Zweig- oder auch Verteilleitungen genannt zweigen von den Hauptleitungen ab und dienen der Unterverteilung zu den einzelnen Versorgungsgebieten. Die Hausanschlussleitungen dienen zum Anschluss eines Kunden an eine Haupt- oder Zweigleitung.

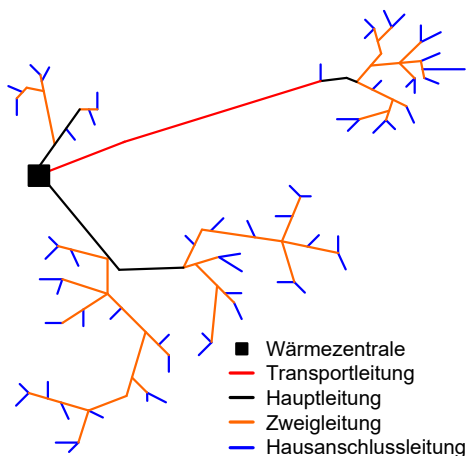


Bild 4.15 Netzaufbau und Leitungstypen.

### 4.3.1 Unterteilung nach Anzahl Leitungen

Moderne thermische Netze werden fast ausschliesslich als geschlossene **Zweileiter-Systeme** mit Wasser als Wärmeträgermedium und je einer Vor- und Rücklaufleitung ausgeführt (Bild 4.16). Sonderfälle sind das Dreileiter- und das Vierleiter-System.

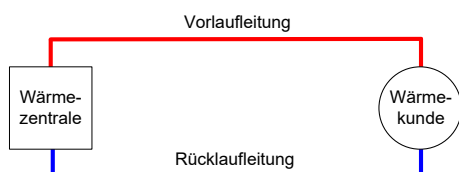


Bild 4.16 Zweileiter-System.

Das **Dreileiter-System** (Bild 4.17) besteht aus zwei Vorlauf- und einer Rücklaufleitung oder aus einer Vor-

lauf- und zwei Rücklaufleitungen. Bei zwei Vorlaufleitungen kann zum Beispiel mit einer Vorlaufleitung die Heizungsanlage der Kunden in Abhängigkeit der Ausstemperatur gleitend gefahren werden während mit der zweiten Vorlaufleitung bei konstanter Vorlauftemperatur das Warmwasser bereitgestellt wird. Bei zwei Rücklaufleitungen kann zum Beispiel beim Einsatz einer Abgaskondensationsanlage die tiefen Rücklauftemperaturen in einem Rücklaufstrang zusammengefasst werden.

Vorteile von Dreileiter-Systemen sind die bessere verbrauchsabhängige Regelmöglichkeit und der geringere Wärmeverlust durch den gleitend gefahrenen Vorlauf. Nachteilig sind die höheren Investitionskosten sowie die komplexere Verlegung und Betrieb. Zudem kann wegen der diskontinuierlichen Entnahme aus der zweiten Vorlaufleitung der Massenstrom in der Rücklaufleitung schwanken, so dass sich der Betriebspunkt der Anlage verschiebt und die Kundenanlagen nicht mit gleichbleibenden Massenströmen versorgt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass während der Übergangszeit die gemeinsame Rücklauftemperatur über der Temperatur des gleitenden Vorlaufs liegen kann.

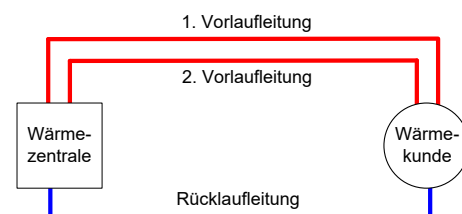


Bild 4.17 Dreileiter-System.

Das **Vierleiter-System** (Bild 4.18) besteht aus zwei getrennten Zweileiter-Systemen. Zum Beispiel kann eines mit konstanter und eines mit gleitender Vorlauftemperatur oder auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus (Kühlen/Heizen) betrieben werden. Damit können die verbrauchsabhängige Regelung verbessert und die Wärmeverluste reduziert werden. Da das Vierleiter-System aufwändig und teuer ist, wird es nur eingesetzt, wenn die beiden Netze unterschiedliche Drücke, Temperaturen oder unterschiedliche Heizmedien haben.

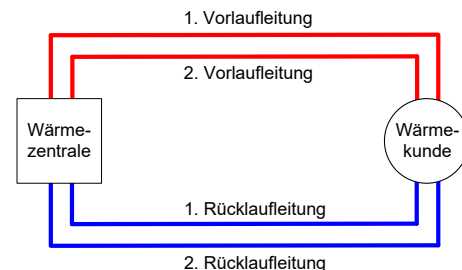


Bild 4.18 Vierleiter-System.

## 4.3.2 Netzstruktur

### 4.3.2.1 Hauptverteilung

Der Aufbau oder die Struktur eines thermischen Netzes kann grundsätzlich in zwei Grundtypen eingeteilt werden, Strahlen- oder Maschennetz.

Bei kleinen bis mittelgrossen Netzen und vielfach am Anfang beim Aufbau eines thermischen Netzes sind **Strahlennetze** die bevorzugte Netzstruktur (Bild 4.19). Vor- und Rücklaufleitungen sind üblicherweise gleich dimensioniert und die Durchmesser der Rohrleitungen sind beim Austritt aus der Zentrale am grössten und nehmen mit der Distanz zu den Kunden ab. Die Pumpen werden so ausgelegt, dass am Netzende beim letzten Kunden der vereinbarte Differenzdruck zur Verfügung steht. Durch eine möglichst optimale Trassenführung und optimalen Dimensionierung der Rohrleitungen ergeben sich geringe Baukosten und Wärmeverluste. Nachteil ist, dass nachträgliche Erweiterungen problematisch sein können und die Versorgungssicherheit geringer ist, da bei einer Störung im Netz der gesamte nachfolgende Strang davon betroffen ist.

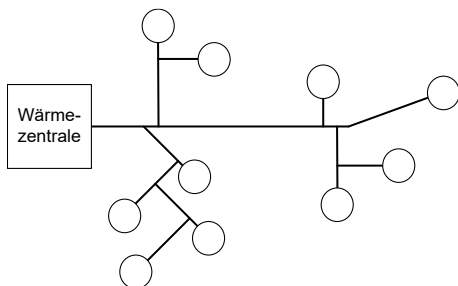


Bild 4.19 Strahlennetz mit einer Energiezentrale.

Infolge Ausbau sowie beim Zusammenschluss mehrerer thermischer Netze, können sogenannte **Maschennetze** entstehen (Bild 4.20). Sie zeichnen sich infolge der mehrfachen Lieferwege durch eine grosse Versorgungssicherheit aus. Bei grossen städtischen Versorgungsgebieten sind sie oft das Resultat einer langfristigen Strategie sowie einer stetigen Erweiterung und Verdichtung. Maschennetze besitzen oftmals mehrere Energiezentralen und werden im Verbundbetrieb gefahren.

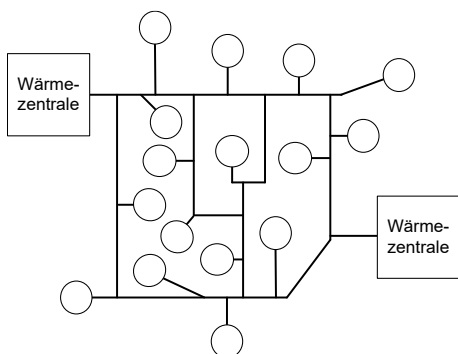


Bild 4.20 Maschennetz mit zwei Energiezentralen.

Ein Sonderfall des Maschennetzes ist das Ringnetz (Bild 4.21), bestehend aus einer einzigen Masche, der sogenannten Ringleitung, ohne Verbindungen zwischen der Ringleitung.

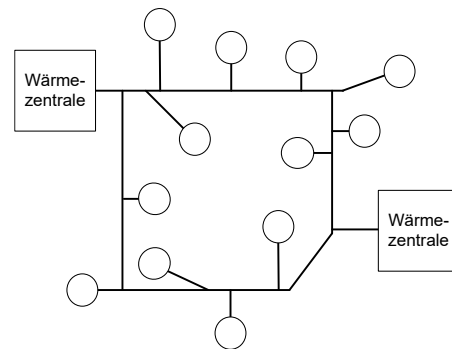


Bild 4.21 Ringnetz mit zwei Energiezentralen.

### 4.3.2.2 Unterverteilung und Hausanschlüsse

Bei einer Standard-Trassenführung, wie in Bild 4.22 dargestellt, werden alle Kunden separat an die Haupt- oder Zweigleitung angeschlossen. Diese im öffentlichen Raum häufig eingesetzte Trassenführung bietet die grösste Flexibilität beim Anschluss zusätzlicher Kunden. Allerdings können bei geringer Anschlussdichte oder langen Hausanschlussleitungen im Vergleich zu anderen Trassenführungen längere Leitungswege erforderlich werden. Insbesondere bei dichter Bebauung können die notwendigen Abzweige und Formstücke zu hohen Investitionskosten führen.

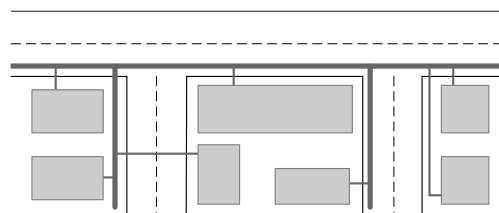


Bild 4.22 Standard-Trassenführung.

Bei der Haus-zu-Haus-Trassenführung (Bild 4.23) werden Gebäude zu Gruppen zusammengefasst, wobei nur ein Haus direkt an die Haupt- oder Zweigleitung angeschlossen wird. Von diesem Anschluss aus werden die weiteren Häuser versorgt, wodurch weniger Abzweige erforderlich sind. Da die Rohrleitungen über Privatgrundstücke und durch Gebäude verlaufen, sind hierfür Durchleitungsrechte der Eigentümer notwendig.

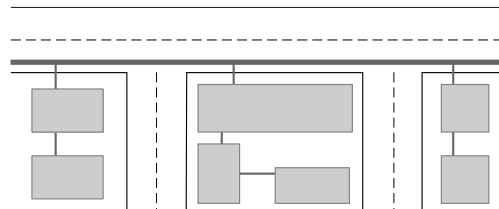


Bild 4.23 Haus-zu-Haus-Trassenführung.

Bei Reihenhausbauungen geht die Haus-zu-Haus-Trassenführung oft in den Sonderfall der Kellerverlegung über. Diese gehört zu den kostengünstigsten Verlegemethoden, da weder Tiefbauarbeiten nötig sind noch spezielle Fernwärmerohre verlegt werden müssen. Mögliche Leckagen werden schnell erkannt und können präzise lokalisiert werden. Voraussetzung für die Kellerverlegung ist, dass die Gebäude oder Tiefgaragen aneinandergrenzen und kurze Leitungsverbindungen

zwischen den Hausstationen möglich sind. Bei nicht aneinandergrenzenden Gebäuden kann auch eine Mischform aus Haus-zu-Haus- und Kellerverlegung eingesetzt werden. Nachteile der Kellerverlegung sind die aufwendigere Koordination der Bauabschnitte sowie die notwendige Abstimmung mit den Eigentümern bezüglich der Durchleitungsrechte.

Eine weitere, selten angewandte Technik ist die Einschleif-Trassenführung (Bild 4.24). Diese basiert auf keiner der bisher genannten Netzstrukturen, sondern versorgt alle Gebäude durch die Haus-zu-Haus-Trassenführung. Dadurch entfallen erdverlegte Rohrverbindungen und Abzweige weitgehend. Allerdings ist eine nachträgliche, nicht geplante Netzerweiterung nahezu unmöglich, weshalb die Einschleif-Methode nur bei kleinen thermischen Netzen, mit klar definiertem Versorgungsgebiet, und mit flexiblen Rohrsystemen sinnvoll ist.

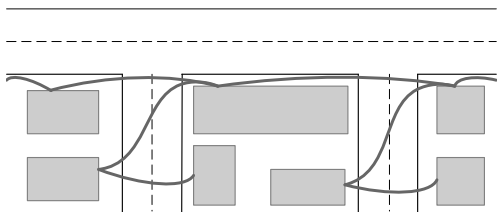


Bild 4.24 Einschleif-Trassenführung.

Häufig bietet eine Mischform aus Standard- und Haus-zu-Haus-Trassenführung eine kostengünstige Lösung, da sie die Vorteile beider Systeme kombiniert.

#### 4.3.2.3 Entwicklung der Netzstruktur

Das Versorgungsgebiet von thermischen Netzen ist oft das Resultat eines Entwicklungs- und Ausbauprozesses,

der über Jahre oder Jahrzehnte dauern kann. Das Bild 4.25 zeigt typische Stadien in der Entwicklung eines thermischen Netzes, wobei sich die Zahlen 1 bis 4 auf charakteristische Phasen beziehen und folgende Situationen beschreiben:

- 1) Einzelne thermische Netze, als Strahlennetze, werden vielfach zuerst gebaut. Dies kann eine strategische Entscheidung eines Energieversorgers zum schnellen Ausbau und punktuellen Versorgung interessierter Gebäude, Zonen, Arealen oder Gebiete sein oder die Netze entwickeln sich unabhängig voneinander.
- 2) Zwei oder mehrere bestehende thermische Netze schließen sich zusammen. Es können bestehende Energiezentralen übernommen und ausgebaut werden, teilweise entstehen auch neue, zusätzliche Energiezentralen an neuen Standorten.
- 3) In einem weiteren Entwicklungsschritt kommt es zu einem Zusammenschluss einzelner Leitungsabschnitte und es entsteht ein Ringschluss. Mit einem Ringnetz können weitere Gebiete und Kunden angeschlossen werden, zudem verbessert es die Versorgungssicherheit über alternative Versorgungswege im Netz.
- 4) Weitere Querverbindungen zwischen Haupt- und Zweigleitungen innerhalb eines Ringes führen zu einer Maschenstruktur. Somit lassen sich weitere Kunden und Gebiete versorgen. In der Regel sind für den Ausbau weitere Energiezentralen oder der Ausbau bestehender Zentralen notwendig.

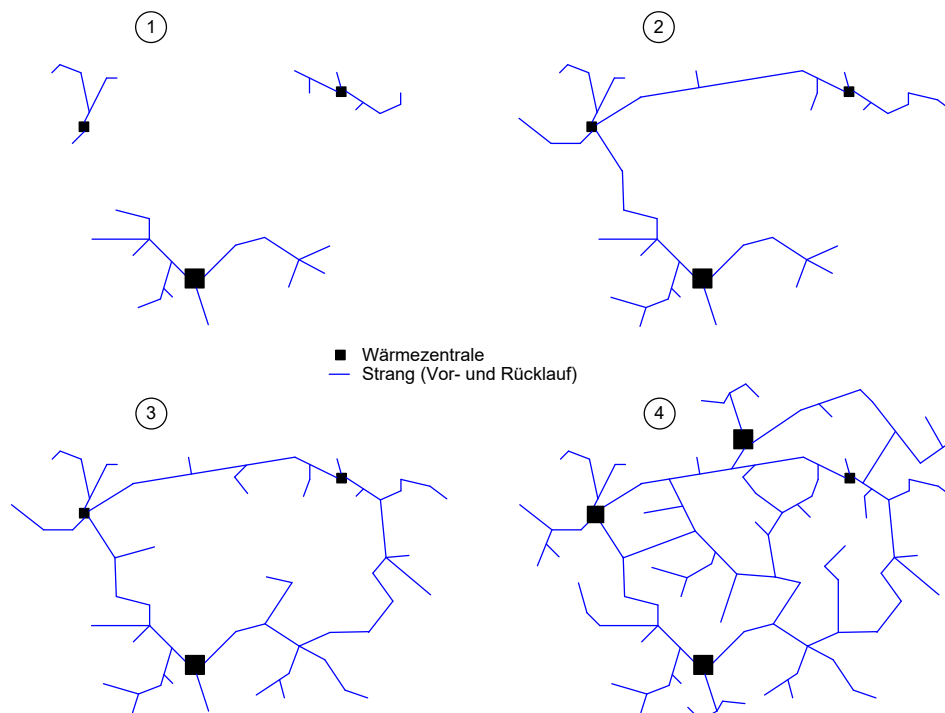


Bild 4.25 Vier typische Entwicklungsstadien thermischer Netze.  
1) Strahlennetze 2) Zusammenschluss 3) Ringnetz 4) Maschennetz.

### 4.3.3 Entlüftung und Entleerung

Bei ausgedehnten und grossen thermischen Netzen sollte die Leitung bei der nachträglichen Montage von Abzweigern und Hausanschlüssen oder bei Wartungs- und Unterhaltsarbeiten abschnittsweise entleert werden können. Hierfür wird das thermische Netz mithilfe von Absperrarmaturen so unterteilt, dass einzelne Streckenabschnitte schnell entleert werden können. Dadurch wird zudem beim Befüllen der Leitungen nur eine begrenzte Menge an aufbereitetem Wasser benötigt.

Als Entleerungsarmaturen werden in der Regel Hähne und Ventile eingesetzt. Es empfiehlt sich, die Entleerungen mit genormten Schlauchanschlüssen zu versehen. Entleerungsstellen sollten als Schlammfang ausgebildet sein.

Wird das Kreislaufwasser in Abwasserkanäle eingeleitet, ist dafür zu sorgen, dass die Einleittemperatur 35°C nicht überschreitet. Das ist durch Beimischen von kaltem Wasser zu erreichen. Während des Betriebes sind die Entleerungen durch Blindflansche, Stopfen oder Kappen zu sichern.

Zum Befüllen und Entleeren der Leitungen muss Luft entweichen und einströmen können. Dazu sind Ent- und Belüftungen an den Hochpunkten des Leitungsabschnittes anzubringen. Bei flach verlegten Zweigleitungen ohne wesentliche Gefällstrecken kann auch über eine Hausanschlussleitung die Luft zu- und abgeleitet werden.

### 4.3.4 Messeinrichtungen

Die Druckverhältnisse im thermischen Netz müssen überwacht werden können. Es sollten deshalb an markanten Stellen Armaturen mit Prüfanschluss für Druckmessgeräte nach DIN 16271 [109] angebracht werden. Sie müssen gut zugänglich sein. Auch Entleerungs- und Belüftungsleitungen können zum Anbringen von Druckmessstellen benutzt werden.

Daneben wird empfohlen, an geeigneten Stellen Temperaturmessstutzen nach DIN 43772 [134] zu montieren. Zur Fernübertragung der Messwerte kann es zweckmässig sein, beim Bau des Netzes entsprechende Kabel zu verlegen oder anderweitige Übertragungsmöglichkeiten vorzusehen.

## 4.4 Verlegung

### 4.4.1 Oberirdische Verlegung

Eine oberirdische Verlegung ist ökonomisch und betriebstechnisch grundsätzlich vorteilhaft. Aus Sicht der Raumplanung, Architektur und Landschaftsgestaltung ist deren Einsatz jedoch selten vorzufinden, zumindest in der Schweiz. Häufige Situationen mit oberirdischer Verlegung sind um Beispiel Querungen von Strassen, Gewässer etc. auf sogenannten Rohrbrücken oder anderen Infrastrukturbauten. Weiter sind bei der Verlegung auch Witterungseinflüsse (UV-Strahlung, Frost, Korrosion) oder auch Vandalismus zu beachten und entsprechende Massnahmen zu ergreifen.

Die Verlegung erfolgt vorzugsweise auf Sockeln oder hängend an Pendelstützen (Bild 4.26). Die Rohrhalterungen sind durch die Fluidmasse und die Kräfte aus der Wärme-dehnung hoch belastet zudem muss die freie Dehnung aufgenommen bzw. kompensiert werden. Die Verlegung auf Stützen und Rohrbrücken beschränkt sich auf Industriegelände und Gebiete ohne besondere Gestaltungsanforderungen.



Bild 4.26 Oberirdische Leitungen in Jena (Stadwerke Energie Jena-Pöessneck).

### 4.4.2 Unterirdische Verlegung im Kanal

Die Verlegung im unbegehbaren Kanal ist eine solide Bauweise mit langer Lebensdauer. Nachteile sind die hohen Baukosten und der grosse Flächenbedarf für die Tiefbaumassnahmen, weshalb kanalverlegte Trassen nur noch selten zum Einsatz kommen und nachfolgend nicht weiter behandelt werden.

### 4.4.3 Unterirdische Verlegung im Graben

Die Verlegung im Graben mit Mantelrohren (Erdverlegung) hat sich wegen ihrer Vorteile hinsichtlich Kosten und Verlegegeschwindigkeit als häufigste Verlegemethode durchgesetzt (Bild 4.27). Die Vorteile sind:

- Geringer Aufwand an Tiefbauleistungen im Vergleich zu anderen unterirdischen Verlegearten.
- Weitgehender Entfall aufwändiger Schachtbauwerke, ausser für Armaturen, die nicht direkt in das Mantelrohrsystem eingebunden sind.
- Auch bei schwierigen Bodenverhältnissen wie zum Beispiel im Grundwasserbereich einsetzbar.
- Kurze Montagezeiten durch hohen Vorfertigungsgrad konfektionierter Bauteile.
- Grosse Flexibilität in der Trassenführung durch vorgefertigte Formstücke.

Besondere Sorgfalt ist bei der Herstellung und Wärmedämmung der Verbindungen unter Baustellenbedingungen erforderlich, weshalb diese Arbeiten von ausgebildeten Fachleuten auszuführen sind.



Bild 4.27 Fernwärmerohre im gespiessten Graben.

#### 4.4.4 Grabenlose Verlegung

Unterquerungen von Hindernissen wie Strassen, Bahntrassen oder Wasserläufe werden durch Vortriebs-techniken wie Spülbohrungen, Pressvortrieb, Düker und Tunnelbau realisiert. Bei grabenlosen Verlegetechniken wird zwischen Bodenverdrängungs- und Bodenentnahmeverfahren unterschieden. Letztere unterteilen sich in steuerbare und nichtsteuerbare Verfahren. Bei den nichtsteuerbaren Verfahren muss zu Beginn bereits eine genügend präzise Ausrichtung der Bohrung erfolgen. In der Regel werden die mediumführenden Rohre durch ein Schutzrohr eingezogen.

Für den Rohrvortrieb sind dazu hochproduktive Spezialgeräte erforderlich.

##### 4.4.4.1 Bodenverdrängungsverfahren

Durch einen in den Boden getriebenen Verdrängungskegel wird ein Hohlraum erzeugt, in den das Schutzrohr nachgeschoben wird. Das Verfahren wird bis etwa DN 200 angewendet. Der Krafteintrag erfolgt entweder über einen pneumatisch angetriebenen Verdrängungshammer im Erdreich oder mittels einer Horizontalramme im Startschacht.

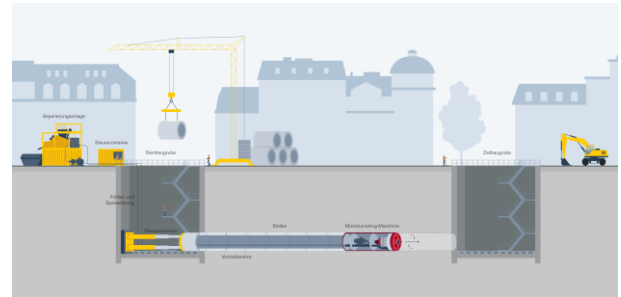
##### 4.4.4.2 Bodenentnahmeverfahren

Das Erdmaterial wird durch einen rotierenden Bohrkopf oder ein horizontal eingerammtes offenes Rohr gelöst und mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch in die Startgrube befördert (Spülbohrverfahren). Durch den entstehenden Hohlraum können Schutzrohre aus Kunststoff oder Stahl eingezogen werden.

Beim Verfahren mit Pressvortrieb werden mit einer hydraulischen Presse von der Startgrube aus Rohre bis vier Meter Durchmesser auf Längen bis 150 m zur Zielbaugrube vorgepresst. Am Start- und Zielpunkt sind Schächte zur Aufnahme der Bohrgeräte und zur Einbringung und Installation der Rohre notwendig.

Das Durchbohren ist über grosse Entfernungen auch mit gesteuertem Bohrkopf oder mittels Spülbohrverfahren in Lockersedimenten und halbfesten Sedimenten bis maximal 63 mm Korngrösse möglich. Das Bohrgut wird durch das an den Bohrköpfen austretende

Wasser oder eine tonhaltige Suspension (Bentonit) ausgespült. Beim rückwärtigen Herausfahren des Bohrkopfes wird die Rohrleitung in den verdichteten Bohrkanal eingezogen. Für steinigen Untergrund eignet sich die Erstellung eines Mikrotunnels aus Beton mit einer ferngesteuerten Vortriebsmaschine.

Bild 4.28 Mikrotunnel mit Start- und Zielgrube (Quelle: [ewz Zürich](#)).

Mit den Verfahren können Rohrleitungen mit hoher Präzision unter Strassen, Bahndämmen, Flüssen oder Gebäuden verlegt werden. Richtungsänderungen werden, wenn möglich mit grossen Radien ausgeführt. Zur Sanierung bestehender Leitungen sind Rohrberstverfahren gebräuchlich, bei denen die alten Leitungen zerstört und ins Erdreich verdrängt und anschliessend neue Leitungen eingezogen werden.

#### 4.4.4.3 Düker

Düker (von duiker, niederländisch für Taucher) sind Bauwerke zur Unterquerung einer Strasse, eines Tunnels, eines Flusses oder von Bahngleisen mit einer Rohrleitung. Vor allem Gewässer werden vielfach mittels Dükerung gequert. Die Dükerung schmalen, kleiner Gewässer ist relativ einfach. Oftmals reicht die Elastizität der Rohrleitung aus, um diese durch das Gewässer zu führen, wobei eine Verankerung und Überdeckung erforderlich ist. Wenn dies nicht möglich ist, wird ein Rohrgraben (Dükerrinne) im Gewässeruntergrund erstellt. Die vormontierte Rohrleitung wird unter Vorkehrungen zum Schutz der Wärmedämmung mit mobilen Kränen in die Dükerrinne gehoben und zur Auftriebssicherung belastet.

Grosse Düker für Gewässer werden an Land vorgefertigt. Dabei gelten die gleichen Vorschriften für Biegen, Schweißen, Korrosionsschutz und Druckprüfung wie bei erdverlegten Rohren. Die Verlegung des vorgefertigten Dükers in die Dükerrinne erfolgt nach folgenden Verfahren:

- Einspülverfahren: Der Düker wird bei flexiblen Rohren von kleinen Durchmessern durch Vibration in den Gewässergrund eingespült.
- Absenkverfahren: Der vorgefertigte Düker wird durch Baukrane von Land oder durch Schiffskrane vom Wasser aus in die Dükerrinne abgesenkt.
- Einschleppverfahren: Der Düker wird an Land auf Schlitten vormontiert, die auf einer Kufenbahn stehen. Diese liegt in der verlängerten Flucht der Dükerung. Der Düker wird dann vom gegenüberliegenden Flussufer in die vorbereitete Dükerrinne gezogen (Bild 4.29).

Die Düker werden gegen mechanische Beschädigung mit Beton oder Faserzement ummantelt. Der Mantel dient gleichzeitig als Auftriebssicherung. Das Verlegen in einer offenen Dükerrinne wird zunehmend durch das steuerbare horizontale Richtbohrverfahren (Directionally Controlled Horizontal Drilling) verdrängt. Dieses Verfahren ist wirtschaftlich, verlangt aber eine gute Vorbereitung und präzise Montageausführung.



Bild 4.29 Vorgefertigter Düker wird in die Dükerrinne gehoben um danach auf Rollen in das Flussbett geschoben zu werden [135].

#### 4.4.5 Häufige Verlege-Situationen

Die folgenden Ausführungen beschreiben häufige Verlege-Situationen mit Vor- und Nachteilen für die unterschiedlichen Rohrsysteme. Für die Verlegung ist zu beachten, dass je nach Druck, Temperatur und Rohrdurchmesser nicht alle Rohrsysteme geeignet sind.

##### 4.4.5.1 Befestigte Oberflächen

In der Regel wird eine Trassenführung im öffentlichen Strassenbereich bevorzugt. Die Energieversorger erwerben das Verlegerecht (Durchgangsrecht) im öffentlichen Raum oder schliessen Konzessionsverträge mit den Gemeinden ab. Allgemein wird versucht, die wichtigsten Hauptleitungen in geschützte Strassenstreifen (Grünstreifen, Gehwege) zu verlegen, die bei einer Störung leicht zugänglich sind. Strassenquerungen sollten auf ein Minimum reduziert werden. Für Verlegungen im Strassenbereich oder auch bei unbefestigten Oberflächen haben sich erdverlegte Kunststoffmantelrohre (KMR, MMR und PMR) durchgesetzt. Kanalverlegeverfahren kommen nur noch selten und in speziellen Fällen zum Einsatz.

Für Situationen ohne kreuzende Leitungen oder andere Hindernisse ist die Festlegung der Trassenführung meist unproblematisch. Für KMR besteht zudem die Möglichkeit, die Rohre zu grösseren Teilstücken zu verschweissen und in der sogenannten Pipeline-Verlegung zu verlegen (Bild 4.30). Flexible Rohrsysteme

weisen dagegen den Vorteil auf, dass sie ab Rolle verlegt werden können und zudem selbstkompensierend sind. Für Situationen mit kreuzenden Leitungen kann eine Trassenfindung mit starren Rohrsystemen aufwändig werden und für KMR den Einsatz zusätzlicher Formstücke wie z. B. 90°-Bögen erforderlich machen.



Bild 4.30 Pipeline-Verlegung [135].

##### 4.4.5.2 Unbefestigte Oberflächen

Für Leitungen in unbefestigten Oberflächen wie zum Beispiel Kulturland, kann die Trassenführung weitgehend auf das gewählte Rohrsystem optimiert und kostengünstig ausgeführt werden.

##### 4.4.5.3 Führung an Geländeabschnitten

Oft besteht die Möglichkeit Leitungen entlang einer Strasse, einer Bahnlinie oder eines Wasserlaufs zu verlegen, was teilweise bereits bei der Zonenplanung berücksichtigt wird. Diese Nutzung bedarf der Vereinbarung mit dem jeweiligen Eigentümer.

Wenn Flüsse, Autobahnen oder Gleise über- oder unterquert werden müssen, kann die Trasse in einem Düker oder in einem Sonderbauwerk Dritter wie zum Beispiel einer Eisenbahnbrücke untergebracht werden. Die Nutzung von Bauwerken Dritter birgt allerdings das Risiko, dass bei Änderungen erheblicher Aufwand für Anpassungen entsteht. Bei Unterquerungen haben sich grabenlose Verlegemethoden bewährt.

##### 4.4.5.4 Privatgrundstücke

Für jede Leitung, die auf einem Privatgrundstück verlegt wird, muss die Nutzung rechtlich abgesichert werden. Dies kann durch Eintragung einer Grunddienstbarkeit oder durch Vereinbarung zwischen Netzbetreiber und Eigentümer erfolgen (Durchgangsrecht).

##### 4.4.5.5 Nachträglich anzuschliessende Kunden

Wenn beim Bau des thermischen Netzes bekannt ist, dass zu einem späteren Zeitpunkt Neubauten geplant oder bestehende Verbraucher angeschlossen werden sollen, empfiehlt sich, einen Abgang für den Anschluss vorzubereiten. Die entsprechenden Hausanschlussleitungen können zum Beispiel bereits bis in den Garten geführt und mit einem Bedarfskugelhahn oder einem Stahlestück mit Anbohrmöglichkeit ausgeführt werden.

Bei KMR-Leitungen kann auch ein ungeplanter nachträglicher Anschluss durch Anbohren der Verteilleitung während des Betriebs erfolgen. Bei PMR-Leitungen kann nachträglich ein T-Stück durch Einfrieren, Abquetschen oder Ausserbetriebnahme der Leitung eingesetzt werden. Bei MMR-Leitungen kann nachträglich ein T-Stück nur durch Ausserbetriebnahme der Leitung eingesetzt werden.

#### 4.4.6 Berücksichtigung anderer leitungsgebundener Sparten

Bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb von thermischen Netzen ist eine sorgfältige Koordination mit anderen leitungsgebundenen Infrastrukturen unerlässlich. Die zunehmende Verdichtung im unterirdischen Raum erfordert eine vorausschauende, integrale Planung unter Berücksichtigung technischer, gesetzlicher und sicherheitsrelevanter Aspekte.

Nur durch eine enge Abstimmung mit allen beteiligten Akteuren und unter Einhaltung der geltenden Normen kann eine nachhaltige, sichere und wartungsfreundliche Infrastruktur gewährleistet werden. Dies ist Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb und die langfristige Nutzbarkeit des unterirdischen Raums.

Folgende Sparten sind in der Planung zu berücksichtigen:

- Gasleitungen
- Stromleitungen (Hoch-, Mittel- und Niederspannung)
- Wasserleitungen (Trinkwasser, Fernwärme und Fernkälte)
- Abwasser- und Regenwasserleitungen
- Datenleitungen (Glasfaser, Kupferleitungen für Kommunikation)
- Tram- und Bahngleise
- Bauliche Anlagen (Fundamente, Stützmauern etc.)
- Vegetation (Pflanzungen, Bäume, Wurzelschutzbereiche etc.)

Für die sichere Verlegung und den späteren Unterhalt der Leitungen thermischer Netze sind Richtwerte für Mindestabstände gemäss Tabelle 4.8 einzuhalten, sofern dies technisch möglich und nicht anderweitig geregelt ist. Die effektiven Abstände sind im Einzelfall mit den zuständigen Werkeigentümern, Gemeinden, kantonalen oder eidgenössischen Behörden abzustimmen.

Tabelle 4.8 Richtwerte für Mindestabstände zwischen Leitungen thermischer Netze zu unterschiedlichen Leitungssparten und mögliche andere Konfliktfälle.

| Sparten / Konfliktfall                             | Horizontal / Parallel | Über- / Unterquerung | Norm / Richtlinie                                                                                          |
|----------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gas (Hochdruck HD, Mitteldruck MD, Niederdruck ND) | 0.40 m                | 0.20 m               | SR 746.1 (RLG) [136], SR 746.11 (RLV) [137], SR 746.12 (RLSV) [138], SN 532 205 SIA [139], SVGW G2 d [140] |
| Strom 0.4 kV Niederspannung                        | 0.40 m <sup>1)</sup>  | 0.20 m <sup>1)</sup> | SR 734.0 (EleG) [141], SR 734.31 (LeV) [142], SN 532 205 SIA [139], ESTI-Weisung Nr. 250 [143]             |
| Strom bis 30 kV Mittelspannung                     | 0.40 m <sup>1)</sup>  | 0.20 m <sup>1)</sup> | SR 734.0 (EleG) [141], SR 734.31 (LeV) [142], SN 532 205 SIA [139], ESTI-Weisung Nr. 250 [143]             |
| Strom bis 380 kV Hochspannung                      | 0.40 m <sup>1)</sup>  | 0.20 m <sup>1)</sup> | SR 734.0 (EleG) [141], SR 734.31 (LeV) [142], SN 532 205 SIA [139], ESTI-Weisung Nr. 250 [143]             |
| Andere Werkleitungen (Leitungen allgemein)         | ≥ 0.40 m              | ≥ 0.40 m             | SN 532 205 SIA [139], SVGW W4 [144]                                                                        |
| Stammbildende Pflanzen (Bäume etc.)                | ≥ 2.00 m              | –                    | SVGW G2 d [140], SVGW W4 [144]                                                                             |
| Bauten / Fundamente / Bohreranker / Erdsonden      | ≥ 1.00 m              | –                    | SVGW G2 d [140], SVGW W4 [144]                                                                             |
| Bahngleis (Zone A: 4–10 m)                         | ≥ 4.00 m              | ≥ 2.00 m             | SN 671 260 VSS [145]                                                                                       |
| Tramgleis                                          | 2.80 m                | –                    | SN 671 260 VSS [145]                                                                                       |

Horizontal / Parallel: Betrifft Leitungen, die über eine Strecke von > 5 m nebeneinander verlaufen.

Über- / Unterquerung: Wo sich Leitungen kreuzen (rechtwinklig).

Die Mindestabstände gelten als lichte Weite (d.h. gemessene freie Distanz zwischen den Leitungshüllen oder zwischen Leitung und Bauwerk).

Norm / Richtlinie: Empfohlene Dokumente, keine abschliessende Aufzählung respektive keine Gewähr der Vollständigkeit

1) Abstände gelten bei erdverlegten Starkstromleitungen in Kunststoffkabelschutzrohren, welche als zusätzliche Isolation funktionieren [143].

Hinweise zu Kreuzung oder Parallelführung:

- Kreuzungen sollen möglichst rechtwinklig erfolgen, um die Einbau- und Unterhaltskosten sowie das Risiko von Beschädigungen zu minimieren.
- Parallelführungen benötigen erhöhte Sorgfalt bei der Planung: Wärmeeinflüsse, Schutzabstände, Zugänglichkeit und gleichzeitige Bauphasen müssen abgestimmt sein.
- Wo schutzbedürftige Infrastrukturen (z. B. Trinkwasser, Gas) betroffen sind, kann eine Schutzrohrverlegung oder ein separater Leitungsträger notwendig werden.

Empfehlungen für die Praxis

- Frühzeitige Koordination mit allen Werkeigentümern und der Gemeinde
- Nutzung von Leitungskataster und Koordinationsplattformen
- Digitale Trassenplanung (BIM, GIS) zur Kollisionsvermeidung und Dokumentation
- Schutzmassnahmen bei kritischen Sparten (z. B. Schutzrohre, Abstandshalter, Opferanode etc.)
- Regelmässiger Austausch zwischen Netzbetreibern, Bauherren und Behörden.

## 4.5 Tiefbau

Die Tiefbauarbeiten im Leitungsbau betreffen die Aushebung der Gräben für die Verlegung erdverlegter Leitungen sowie die anschliessende Instandstellung der Oberfläche. Hinzu kommen Kanäle für kanalverlegte Leitungen, Schachtbauwerke für Entlüftungen, Entleerungen, Kabelzugarbeiten, Sektionierung, Pumpstationen, Netztrennungen und Übergabestationen sowie grabenlose Vortriebsverfahren oder Tunnelbauten bei der Unterquerung von Objekten.

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die Techniken des Tiefbaus, über Standards, Richtlinien und weiterführende Literatur für die Tiefbaugestaltung. Es beschreibt die Abläufe und Anforderungen zur zweckmässigen Gestaltung von thermischen Netzen. Der Fokus richtet sich dabei auf die heute gängigen Methoden der direkten Erdverlegung. Spezielle Verfahren wie Verlegung in Ortsbetonkanälen oder Schächten werden nicht oder nur am Rande behandelt. Vor allem in dichtbesiedelten Gebieten sind für die Planung und Ausführung von Tiefbauarbeiten umfangreiche Kenntnisse des Planers notwendig.

### 4.5.1 Allgemeines

Ohne Tiefbauarbeiten kann kein thermisches Netz erstellt werden. Die Randbedingungen aus dem Tiefbau haben sogar massgeblichen Einfluss auf die Leitungsführung und auf die Tiefenlage der Rohr. So ist zum Beispiel der Strassenbereich in der Regel von Werkleitungen bereits belegt, und das thermische Netz muss mit dem restlichen zur Verfügung stehenden Platz auskommen oder andere Wege gehen. Teilweise können Gebäude nicht auf dem kürzesten Weg erschlossen werden, da vielbefahrene oder frisch sanierte Strassen und anderweitige Gründe dies verhindern. Die Betriebsgesellschaften, die involvierten Planer und die Kommune müssen die Randbedingungen kennen. Für eine optimale Umsetzung ist genügend Zeit für die übergeordnete Koordinierung und Planung vorzusehen.

Von den gesamten Investitions- und Betriebskosten eines thermischen Netzes fallen in der Regel etwa 50 % bis 60 % für das Leitungsnetz an, je grösser das thermische Netze um so grösser wird der Anteil des Leitungsnetzes [27]. Davon wiederum gut 60% bis 75% für den Leitungsbau (Tiefbau und Leitungen). Eine sorgfältige Planung der Leitungsführung hilft daher, die Wirtschaftlichkeit eines Projektes zu verbessern. So sollte zum Beispiel die Trassenführung entlang von Hauptstrassen oder Hauptverkehrsadern vermieden werden, da der Aufwand für die Koordinierung und Verkehrsführung immens sind.

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Trassenplanung, spätestens jedoch mit dem Bauprojekt, ist die Erhebung sämtlicher vorhandener Werkleitungen. Manche Stadtwerke/Energieversorger verfügen über interne Werkvorschriften, welche bei der Planung und Ausführung zu berücksichtigen sind. Nicht zuletzt ist auch die Beurteilung der Rohrstatik für die Leitungsführung von

Belang. Bei starren Rohrsystemen empfiehlt sich die Erstellung von Längenprofilen in bebauten Gebieten.

Längenprofil, 1:200/50

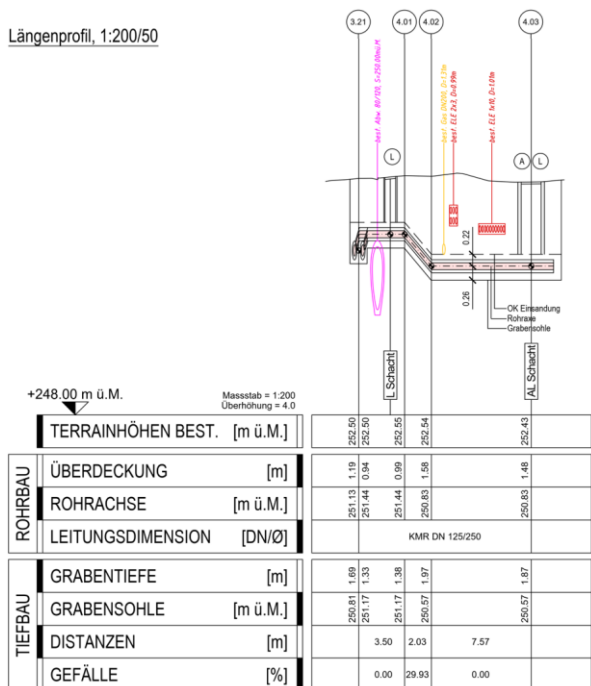


Bild 4.31 Beispiel eines Längenprofils für eine kurze Leistungssektion (Quelle: Triplex Energieplaner AG)

Wichtig ist auch frühzeitig die Baustellenlogistik und die Verkehrsführung während des Bauzustandes zu berücksichtigen sowie dies mit den zuständigen Ämtern von Gemeinden, Kantonen oder Bund zu koordinieren.

Um eine lange Lebensdauer erdverlegter Leitungen zu gewährleisten, ist ein hoher Ausführungsstandard erforderlich und benötigt entsprechendes Knowhow und Fachkräfte.

## 4.5.2 Trassenplanung

### 4.5.2.1 Starre Rohrsysteme

Grundsätzlich ist bei der Trassenplanung darauf zu achten, dass die Leitungen mit möglichst kurzen Distanzen zu den Kunden führen. Entsprechend sind lange Hausanschlussleitungen wenn möglich zu vermeiden. Neben der horizontalen Lage der Leitungen ist auch die Tiefenlage von hoher Bedeutung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Hausanschlussleitungen ab der Hauptleitung idealerweise nach oben abzweigen sollten. Weiter ist aufgrund des oft schon stark mit Werkleitungen anderer Sparten belegten Strassenuntergrundes, eine Verlegung in der Tiefenlage bestehender Wasserleitungen erfahrungsgemäss am einfachsten realisierbar.

Bei Richtungsänderungen ist der Rohrstatik (Kapitel 4.10) grosse Bedeutung zuzumessen. Richtungsänderungen beziehungsweise Dehnschenkel kommen vorwiegend in folgenden Fällen zum Einsatz:

- bei Gefällswechsel
- bei Hindernissen
- bei Richtungsänderungen
- bei Durchpressungen
- bei Fix-Punkten (z.B. Hausanschlüsse)

Im Bild 4.32 bis Bild 4.35 sind Empfehlungen dargestellt, wie diese Richtungsänderungen zu planen sind. Die Rohrstatik lässt sich für jeden Einzelfall berechnen.

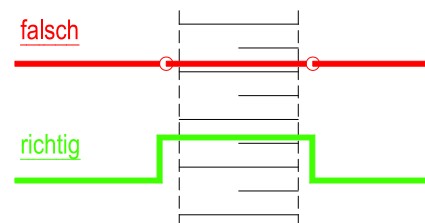


Bild 4.32 Gefällswechsel

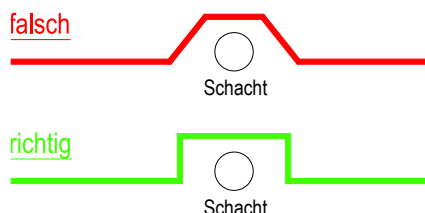


Bild 4.33 Hindernis

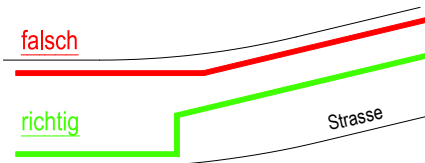


Bild 4.34 Richtungsänderung (Bogenrohr oder elastisches Biegen als Alternative)

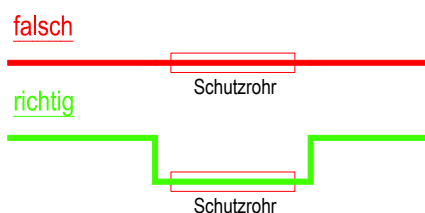


Bild 4.35 Durchpressung

Um die Leistungsführung bei Richtungsänderung zu optimieren, besteht auch die Möglichkeit gerade Rohre durch Kaltverformung zu biegen und sogenannte Bogenrohre einzusetzen (Bild 4.34). Beim Biegen ist darauf zu achten, dass im Stahlmediumrohr, im Dämmstoff, im Mantelrohr und den Adern der Leckageüberwachung keine unzulässigen Spannungen und Verformungen (Ovalisierungen) auftreten. Bogenrohre können Werkmässig oder auf der Baustelle mit entsprechenden Biegewerkzeugen hergestellt werden. Das Mantelrohr ist dabei vor Beschädigung zu schützen.

Minimale Biegeradien für Bogenrohre, die auf der Baustelle gebogen werden, können aus dem AGFW-Merkblatt FW401 Teil 9 [121] entnommen werden. Weitere Hinweise zur Statik sind im AGFW-Merkblatt FW401 Teil 10 [121] enthalten.

Sämtliche Hochpunkte müssen zwingend entlüftet und Leitungsabschnitte mit Absperrarmaturen abgesperrt (sektioniert) werden können. Leitungen grösser DN 100 sollten zudem entleerbar sein. Dabei kommen Schächte zum Einsatz, welche aus Ortsbeton oder aus vorfabrizierten Produkten erstellt werden. Schachtbauwerke kommen auch bei Absperrarmaturen und bei Kabelzugschächten für Leitsysteme und Lecküberwachung zum Einsatz. Alternativ und wesentlich kostengünstiger kann die Leitung zum Beispiel über Entlüftungs- und Entleerungsarmaturen mit Druckluft ausgeblasen werden.

Für die optimale Trassenplanung starrer KMR-Rohre wird wegen den oben genannten Punkten die Erstellung eines Längenprofils empfohlen. Nachfolgend sind einige Argumente aufgelistet, welche für ein Längenprofil sprechen.

- Erhöhung der Planungssicherheit
- Erkennen der Lage von Entlüftungen und Entleerungen.
- Grundlage für die Tiefbauausschreibung (Normpositionenkatalog NPK [146] unterscheidet zwischen verschiedenen Grabentiefen).
- Erkennen von kritischen Tiefenlagen (zu viel bzw. zu wenig Überdeckung).
- Erkennung von Konfliktstellen mit bestehenden Werkleitungen.
- Für einen statischen Nachweis muss die Verlegetiefe beziehungsweise die Überdeckung der Rohrleitung bekannt sein.
- Bei Hausanschlüssen wird der Zusammenhang zwischen Terrain- und Kellerhöhe hergestellt.

Die Ausgestaltung der Gräben richtet sich nach den Rohrdimensionen, den Grabentiefen sowie dem Terrain (Strasse oder Grünland). Dabei ist zu beachten, dass im Bereich der Dehnzonen für die Montage eine grössere lichte Grabenbreite notwendig ist. Es wird zwischen verbauten (gespriessten) und geböschten Gräben unterschieden.

Grundsätzlich kommen verbaute Gräben vorwiegend im Strassenbereich, geböschte Gräben dagegen im Grünland zum Einsatz. Die Art des Grabentyps ist auch aus Sicht der Bauarbeitenverordnung des Bundes (BauAV) [86] und nach der DIN 4124 [147] zu wählen.

#### 4.5.2.2 Flexible Rohrsysteme

Die Trassenplanung für flexible Rohre gestaltet sich wesentlich einfacher als bei starren Rohren. Ausser im Übergangsbereich zwischen starren und flexiblen Rohren sind in der Regel keine rohrstatischen Randbedingungen der Leitungsführung zu berücksichtigen.

Das Haupt-Einsatzgebiet liegt bei Rohrdimensionen bis rund DN 100 für die Feinverteilung und für Hausanschlüsse. Grössere Dimensionen kommen zum Beispiel zur Überwindung von Steilhängen oder bei Bachquerungen zum Einsatz.

Bei der Planung ist speziell zu beachten, dass die Radien für die Verlegung genügend gross gewählt werden. Besonders bei grösseren Dimensionen sind die von den Herstellern genannten Mindestradien knapp ausgelegt, was in untenstehendem Beispiel verdeutlicht werden soll (Bild 4.36).

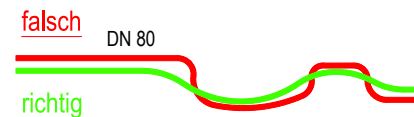


Bild 4.36 Radien bei der Verlegung flexibler Rohrsysteme.

Ein grosser Vorteil von flexiblen Rohren besteht in der schnellen Bauweise, da der Graben schmaler und vorwiegend ungespriesst bei geringer Grabentiefe erstellt werden kann. Die Verlegearbeiten der Rohre dauern normalerweise einen Tag, gefolgt von einem weiteren Tag für die Muffenmontage.

#### 4.5.2.3 Bewilligungsverfahren

Ein weiterer Punkt bei der Trassenplanung betrifft die Bewilligungsfähigkeit. So kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, eine Versorgungsleitung über unbebautes Privatland zu verlegen. Allerdings muss in einem solchen Fall die Dienstbarkeit geregelt sein, bevor weitere Planungsschritte, wie das ordentliche Bewilligungsverfahren oder die Ausschreibung, in Angriff genommen werden.

Auch sind Vorabklärungen mit den Behörden zu treffen, wie das Bewilligungsverfahren durchgeführt werden muss. Die Unterschiede zwischen den Gemeinden und Kantonen sind, auch was die Dauer des Verfahrens betrifft, teilweise beträchtlich. So reicht in manchen Kantonen ein einfaches Aufgrabungsgesuch, während in anderen ein ordentliches Baubewilligungsverfahren durchgeführt werden muss. Es ist abzuklären, ob Strassen gequert oder belegt werden dürfen und wie sie instand gestellt werden müssen.

Diverse Beprobungen des Belags- sowie Fundationsmaterials sind zu empfehlen. Ab einer bestimmten Trassenlänge und je nach kantonalen Vorschriften sind diese zwingend erforderlich. Das ist ebenfalls frühzeitig zu klären, denn daraus wird das Entsorgungskonzept bestimmt und die entsprechenden Entsorgungsgebühren abgeschätzt.

Dringend zu empfehlen beziehungsweise ein Muss ist die Planungs- und Baukoordination mit anderen Gewerken und Werkleitungseigentümern. Dies ist zwar aufwändig und zeitintensiv, im urbanen Kontext mit diversen Interessengruppen jedoch unabdingbar, um die Trassenplanung technisch wie auch ökonomisch optimal zu gestalten.

### 4.5.3 Bauablauf

Die Bauarbeiten für Fernwärmeleitungen sind grundsätzlich in 4 Phasen gegliedert:

- 1) Grabenaushub (inkl. Mauerdurchführungen und Schachtbauwerke)
- 2) Rohrleitungsbau
- 3) Grabenverfüllung
- 4) Instandstellung der Oberfläche

Aus Sicht des Tiefbauunternehmers können Unterbrüche von mehreren Tagen, im Falle der Instandstellung gar von mehreren Monaten entstehen. Es ist Sache des Planers, ein Rahmenterminprogramm zu verfassen, welches ein möglichst unterbruchfreies Arbeiten des Tiefbauunternehmers ermöglicht.

Aus Sicht des Rohrbaus sind möglichst lange Etappen wünschenswert, und zwar unabhängig vom gewählten Verlegesystem oder Rohrtyp. Wesentliche Vorteile von langen Etappen sind zum Beispiel die Reduktion der Anzahl Druckproben, die Ermöglichung von Vorspannungen, die Verhinderung von Muffen bei flexiblen Rohren oder von Kleinmengen-Montagen. Alle genannten Punkte wirken sich auf Baukosten und Gesamtbauzeit aus.

Vor Baubeginn ist durch die Bauleitung eine Begehung durchzuführen, an der neben dem Tiefbauunternehmer auch der Rohrbauer und eventuell die für den Verkehr zuständigen Behördenvertreter teilnehmen. Neben den Installationsplätzen für den Tiefbau sind auch Rohrzwischenlagerplätze, Rohreinhebeöffnungen in der Grabenspriessung sowie die Strom- und Wasserversorgung zu klären. Hilfestellung bieten die Merkblätter der AGFW FW 401, Teil 12 und 18 [121].

#### 4.5.3.1 Grabenaushub

Sind keine Vorgaben der Bauherrschaft beziehungsweise des Betreibers vorhanden, gelten beim Grabenaushub grundsätzlich die Vorgaben der Rohrsystemlieferanten. Übergeordnet zu diesen Vorgaben stehen in jedem Fall die Vorschriften der SUVA [148], die BauAV [86] sowie die DIN 4124 [147].

Bei gut verfestigtem, standfestem Material (z. B. Lehm) kann bis zu einer **Grabentiefe** von 1.50 m auf eine Spriessung verzichtet werden (Bild 4.37). Ab einer Grabentiefe von 1.50 m müssen die Gräben aus Sicherheitsgründen zwingend verspiessst oder abgeböschst ausgeführt werden. Aufgrund der langen und vielfach gleichzeitigen Erstellung mehrere Grabenetappen ist zu beachten, dass sehr viel Spriessmaterial verwendet wird, welches die Tiefbauunternehmung vorhalten muss.

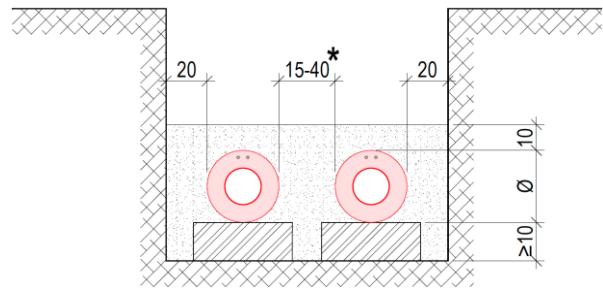


Bild 4.37 Lichte Grabenbreite ungeböschst (\* gemäss Herstellerangaben; Angaben in cm).

Das Verhältnis Y:X bei geböschten Gräben (Bild 4.38) richtet sich nach dem Aushubmaterial. So liegt das Verhältnis der Böschungsneigung in festem Material wie zum Beispiel Lehm höchstens bei 2:1, während es in lockerem (rolligen) Material wie zum Beispiel bei Schotter bei 1:1 zu liegen kommt. Sollten die Bedingungen nicht eingehalten werden können, muss ein Sicherheitsnachweis eines Fachingenieurs oder eines Geotechnikers vorliegen.

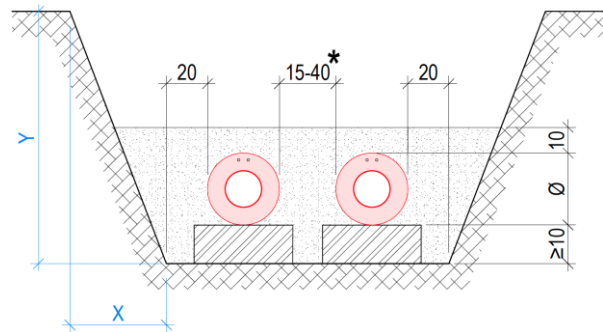


Bild 4.38 Lichte Grabenbreite geböschst (\* gemäss Herstellerangaben; Angaben in cm).

Ob das **Aushubmaterial** seitlich oder auf einer Baustellendeponie gelagert werden kann oder abgeführt werden muss, ist für die Rohrverlegung zunächst nicht relevant. Da aber Material für die Rohrumhüllung zugeführt werden muss, ist in jedem Fall ein beträchtlicher Teil des Aushubmaterials abzuführen.

Freigelegte **Werkleitungen** sind gemäss Auflagen der Werkleitungseigentümer zu sichern und zu schützen.

Bei flexiblen Rohrsystemen wird der Graben vor der Rohrverlegung mit dem Rohrumhüllungsmaterial in einer Stärke von mindestens 10 cm verfüllt.

**Mauerdurchführungen** erfolgen in der Regel bei Hausanschlüssen, wenn Versorgungsleitungen durch Einstellhallen führen oder bei Schachtbauwerken aus Ortsbeton. Die Anforderungen sind generell eine wasserdichte Einführung der Rohre vom Erdreich in die Gebäude. Zuweilen werden auch Gasdichte Einführungen verlangt. Für die Erfüllung dieser Anforderungen ist es zwingend erforderlich, dass keine lateralen, axialen oder radialen Bewegungen seitens der Rohre auf die Durchführung einwirken. Die Leitungsführung ist entsprechend zu planen.

Die Durchführungen werden normalerweise mit Kernbohrungen erstellt. Dabei sollte im Vorfeld geklärt sein, wie die Durchführungen abgedichtet werden. In Frage

kommen hierfür Mauerdichtringe aus Neopren-Gummi, welche über die Rohre geschoben werden, oder Ringraumdichtungen. Die Tabelle 4.9 zeigt die unterschiedliche Dimensionierung der Kernbohrungen auf. Massgebend ist der Durchmesser des Hüllrohres (z. B. das PE-Mantelrohr bei KMR).

Tabelle 4.9 Durchmesser der Kernbohrungen in mm in Abhängigkeit von Rohrdimensionen und Dichtungsart.

| Durchmesser Kernbohrungen | Durchmesser des Hüllrohres (z. B. Mantelrohr bei KMR) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                           | 110                                                   | 125 | 140 | 160 | 180 | 200 | 225 | 250 | 280 | 315 | 355 | 400 |
| Mauerdichtring            | 200                                                   | 200 | 250 | 250 | 300 | 300 | 350 | 350 | 400 | 400 | 450 | 500 |
| Ringraumdichtung          | 200                                                   | 200 | 200 | 250 | 250 | 300 | 300 | 350 | 350 | 400 | 450 | 500 |

Einsatzgebiet der einfacheren Mauerdichtringe ist in Situationen mit gut durchlässigen Böden mit Steigung in Richtung Durchführung. In allen anderen Gebieten sowie in Hanglagen, bei Staunässe oder bei Gefälle in Richtung Durchführung sind Ringraumdichtungen einzusetzen. Es ist zu beachten, dass beim Einsatz von Ringraumdichtungen diese im Innern der Gebäude nicht verputzt werden dürfen, da sie bei Bedarf angezogen werden müssen. Im Neubaubereich bieten sich auch sogenannte Mehrsparten-Hauseinführungen (Bild 4.39) mit der unabhängigen Abdichtung einzelner Leitungen an (Wasser, Wärme, Strom etc.).

Zur Dimensionierung und Ausführung wird auf Herstellerangaben und die AGFW FW 401 Teil 7 [121] verwiesen. Die Anforderungen für Bauwerksabdichtungen sind in der DIN 18195 [149] festgehalten und sollten dementsprechend beachtet werden.



Bild 4.39 Beispiel Mehrsparten-Hauseinführung  
Quelle: DOYMA GmbH.

Bei **Schachtbauwerken** wird zwischen begehbaren und nicht begehbaren Schächten unterschieden. Begehbare Schächte werden aufgrund ihrer Grösse vorwiegend in Ortsbeton erstellt. Für die Ausführung gelten die Mindestanforderungen von Arbeitsblatt FW 433 der AGFW [150] sowie die Vorschriften der SUVA [148] und die BauAV [86]. Diese Vorschriften beinhalten unter anderem folgende Punkte:

- Mindesthöhe Innenraum Schächte für Bedienung von Armaturen (1,8 m) und Mindestfläche für Bedienarbeiten (1,5 m<sup>2</sup>), Mindestbreiten (1 m), Bedienungsgänge (min. 500 mm)
- Schachtbelüftung (natürliche Zirkulation)
- Schachtsohle mit Pumpensumpf oder Bodenablauf
- Schachteinstieg (min. 0,8 m, resp. 0,6 m) und Ausrüstung

Bei den nicht begehbaren Schächten ist besonderer Wert auf deren Foundation zu legen, insbesondere im Strassenbereich.

#### 4.5.3.2 Rohrleitungsbau

In dieser Phase pausieren die Tiefbauarbeiten. Aus Sicht des Tiefbauunternehmers können aber Beihilfe bei der Rohreinbringung, Umspriessarbeiten oder die Erstellung von Vorspannfestpunkten anstehen.

In den Kapitel 4.3 bis Kapitel 4.4.5 wird auf den Netzaufbau, unterschiedliche Verlege-Methoden und typische Verlege-Situationen eingegangen. Auf eine ausführlichere Erläuterung zum Rohrleitungsbau, wie zum Beispiel Ausführung der Schweissarbeiten, Muffenmontage, Dichtprüfung etc., wird in diesem Planungshandbuch aus Platzgründen verzichtet.

Weiterführende Literatur zum Rohrleitungsbau bietet das Regelwerk und auch weitere Publikationen von der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V. wie zum Beispiel das Technische Handbuch Fernwärme [126] oder das praktische Montagehandbuch [132] vom Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. bietet detaillierte Informationen zu den einzelnen Arbeitsschritten und Abläufe im Rohrleitungsbau.

Grundsätzlich sind bei der Rohrverlegung nur Unternehmen zu beauftragen, die ihre fachliche Eignung nachweisen können. In der Schweiz ist es üblich, bei öffentlichen Ausschreibungen in der Regel obligatorisch, dass das für den Rohrleitungsbau verantwortliche Unternehmen anhand Referenzen deren Eignung nachweisen muss. Üblicherweise umfasst die Referenz für den Rohrleitungsbau zwei ähnliche Anlagen in vergleichbarer Grössenordnung. Weiter muss das Unter-

nehmen nachweisen, dass die angestellten Schweisser über die erforderlichen Schweisszertifikate verfügen (Schweissklasse B). In Deutschland und Österreich wird bei öffentlichen Ausschreibungen auch eine Zertifizierung des Unternehmens nach dem AGFW Arbeitsblatt FW 601 [151] verlangt.

Nach Fertigstellung der Schweissarbeiten sind die Schweissnähte in dem zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer vereinbarten beziehungsweise in der Projektbeschreibung geforderten Umfang zu prüfen. In der Regel folgt auf eine Sichtprüfung (nach DIN EN ISO 17637 [152]) eine zerstörungsfreie Schweissnahtprüfung im entsprechend festgelegten Umfang. Bei einer Durchstrahlungsprüfung ist die Prüfklasse B der DIN EN ISO 17636-1 [153] anzustreben. Eine Eindringprüfung ist nach DIN EN ISO 3452-1 [154], die Ultraschallprüfung nach DIN EN ISO 17640 [155], eine Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO 17638 [156] auszuführen.

Nach der zerstörungsfreien Prüfung erfolgt die Dichtheits- und/oder Festigkeitsprüfung nach AGFW-Merkblatt FW 602 [157]. Die Sichtverfahren mit Luft werden als Regelprüfung gegenüber denen mit Wasser empfohlen, dabei werden die Schweissnähte mit einem schaumbildenden Mittel benetzt. Ist innerhalb von mindestens einer Minute keine Bläschenbildung festzustellen, gilt die Dichtheit als nachgewiesen. Bei der Methode mit innerem Luftüberdruck beträgt der Prüfdruck 0,2 bis 0,5 bar, mit äusserem Luftunterdruck (Vakuumbrille) maximal 0,6 bar absolut. Eine Kaltwasserdruckprobe an der entlüfteten Trasse ist in Anlehnung an das DVGW-Arbeitsblatt G 469, Verfahren A1 auszuführen. Der Prüfdruck beträgt das 1,3-fache des Betriebsdruckes am Hochpunkt und ist 3 Stunden zu halten.

#### 4.5.3.3 Grabenverfüllung

Nach Beendigung des Rohrleitungsbaus (mit Muffen- und Dehnkissenmontage als letztem Schritt) muss, bevor das Sandbett erstellt werden kann, die Trasse durch einen verantwortlichen Bauleiter freigegeben werden.

Die Rohrumhüllung mit feinkörnigem Material besteht aus Schlemmsand (Korngrösse 0 - 0,75 mm) oder gewaschenem Rundkies (Korngrösse 0 - 4 mm, keine gebrochenen Materialien erlaubt!). Bei den starren Systemen ist darauf zu achten, dass die Rohre sauber unterstopft werden. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei, um Hohlräume zu vermeiden, den Zwischenräumen oder auch Rohrzwickeln zwischen den Rohren zu widmen. Diese Räume müssen gesondert unterstampft und verdichtet werden. Dadurch werden spätere Setzungen sowie Verschiebungen vermieden. Während dieser Arbeiten sind gleichzeitig eventuell verwendete Hilfsauflager zu entfernen, sofern es sich nicht um Sandsäcke, die aufzuschlitzen sind, oder Hartschaumauflager handelt. Dieser Arbeitsschritt muss immer von Hand erfolgen. Das Einschlämmen der Rohrumhüllung ist nicht erlaubt. Die Rohre müssen mindestens 10 cm mit diesem feinen Material umhüllt werden. Es empfiehlt sich, auf die Rohrumhüllung pro Rohr ein Trassen-Warnband zu verlegen.

Wenn es aufgrund ungünstiger Bedingungen nicht ausgeschlossen ist, dass während der Tiefbauarbeiten der Bettungssand ausgeschwemmt wird, ist die Bettungszone mit Geotextilien zu umhüllen. In Hang- beziehungsweise Steilstrecken sollte dies wegen der Drainagewirkung des Grabenprofils generell beachtet werden. Durch die Wasserzugabe liegt der Wassergehalt des Sandes oberhalb des optimalen Gehaltes und genügt nicht dem Verdichtungsgrad ( $D_{Pr} \geq 97\%$ ). Hierbei werden die Korngrössen entmischt, so dass die Sollreibungsbeiwerte am KMR nicht zu erzielen sind und es stellt sich der sogenannte ‚Tunneleffekt‘ ein. Unter anderem ist aus diesen Gründen, gemäss AGFW FW 401 Teil 12, das Einschlämmen des Sandes nicht als Stand der Technik eingestuft.

Sollten fließfähige Bettungsmaterialien wie zum Beispiel selbststabilisierende Sandmischungen (SSM) oder Bodenmörtel verwendet werden, ist zu beachten, dass hinsichtlich des Entfernens dieser mit einfachem Gerät noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen. Zu den mechanischen Kennwerten wie Langzeiterverhalten liegen in der Praxis ebenfalls keine dauerhaften und abgesicherten Prüfergebnisse vor. Eine allgemeine Zulassung dieser Verfüllmaterialien als Strassenbaustoff durch die Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, ist bisher nicht erfolgt. In den rohrstatischen Grundlagen nach AGFW FW 401 Teil 10 und 11 sind diese jedenfalls nicht berücksichtigt.

Ersatzstoffe wie Schaumglasgranulate, Brechsand, Recyclingmaterial oder ähnliches sind in der Leitungszone als Bettungsmaterial bzw. Sandbett grundsätzlich unzulässig.

Sind Schutzmassnahmen für die Rohre infolge Über- oder Unterschreitung der zulässigen Überdeckungshöhe notwendig, sind diese nach der Rohrumhüllung zu veranlassen. Wird die maximale Überdeckungshöhe gemäss Angaben des Rohrlieferanten überschritten, empfiehlt sich der Einsatz von vorgefertigten U-Profilen aus Beton. Wird im Strassenbereich die Überdeckungshöhe von 60 cm unterschritten, können über der Rohrumhüllung Lastverteillplatten zur Verminderung des Raddrucks erstellt werden (Bild 4.40).

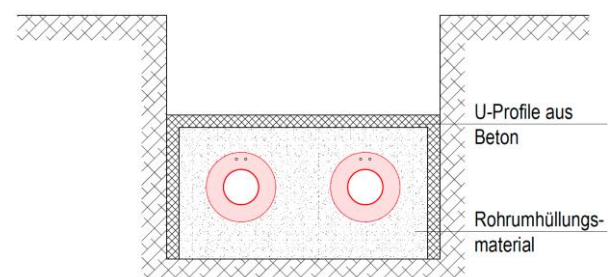


Bild 4.40 Beispiel Schutzmassnahmen bei Überschreitung der maximalen Überdeckungshöhe mit Lastverteillplatten aus vorgefertigten U-Profilen aus Beton.

Im Grünland und insbesondere in Gärten wird bei Überdeckungen kleiner 65 cm generell die Verlegung von Gartenplatten aus Beton empfohlen (Bild 4.41).

Diese Massnahme dient als Schutz vor mechanischer Beschädigung (z. B. durch Einschlagen von Pfählen).

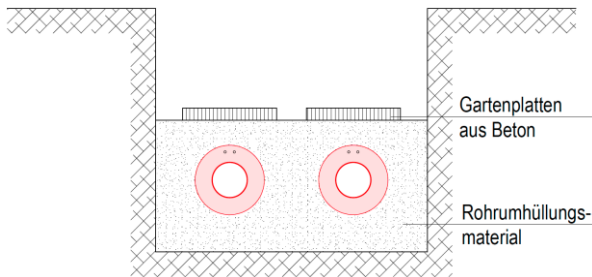


Bild 4.41 Beispiel Schutzmassnahmen gegen mechanische Beschädigung mit Gartenplatten aus Beton.

Nach der Rohrumhüllung erfolgt die eigentliche Grabenverfüllung mit Aushub- oder gut verdichtungsfähigem Material (z. B. Kiesgemisch 0/45, frostsicher) gemäss Bild 4.42. Das Material ist in Schichten von je ca. 30 bis 50 cm Stärke einzubringen und mit geeigneten Mitteln zu verdichten. Bestehende, freigelegte Werkleitungen sind mit Magerbeton zu untermauern. Dabei ist auch auf die Vorschriften der einzelnen Werke zu achten. Allfällige Verbauungen der Gräben können in diesem Arbeitsschritt entfernt werden. Je nach Grabentiefe besteht die Möglichkeit, auf der ersten Zwischenplanie Kabelschutzrohre für Leitsystem oder Lecküberwachung zu verlegen. Auf die fachgerechte Verdichtung ist grosser Wert zu legen, da bei unsachgemäss ausgeführten Arbeiten später Schäden auftreten können, insbesondere im Strassenbereich.

Der oberste Teil des Grabens besteht aus Oberboden (Grünland) oder der Kofferung inkl. Belagsschicht (Stassen, Trottoirs). Die Ausführung der Kofferung und der Belagsschichten ist nach den kantonalen oder kommunalen Vorschriften zu erstellen.

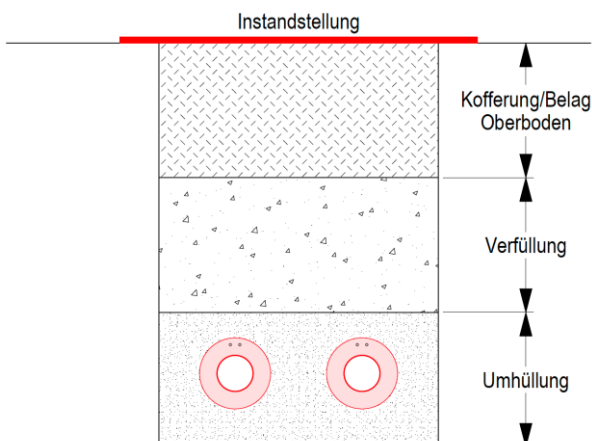


Bild 4.42 Schematische Darstellung (Schichtung) der Grabenverfüllung.

#### 4.5.3.4 Instandstellung

Als Instandstellung wird die Wiederherstellung des Oberflächen-Zustands vor Beginn der Bauarbeiten bezeichnet. Im Kulturland ist die Umsetzung am weitest aus einfachsten zu bewerkstelligen. Aufwändiger wird es in Gärten, wo Rasen neu gesät, Sträucher neu gepflanzt oder Gehwege wieder versetzt werden müssen. Im Strassenbereich bestimmen in der Regel die örtlichen Behörden (Strassenmeister) den Umfang des nachzubessernden (Deck-)Belags.

Die Instandstellung erfolgt oft zeitlich versetzt zu den eigentlichen Tiefbauarbeiten. Gründe dafür sind zum Beispiel Neubepflanzungen in Gärten, welche durch Gartenbauunternehmen und nicht durch den Tiefbauer ausgeführt werden. Ein weiteres Beispiel sind die Deckbelagsarbeiten im Strassenbereich, welche nicht während der kalten Monate ausgeführt werden dürfen.

## 4.6 Wasserqualität

Um Schäden durch Korrosion, Erosion oder Werkstoffüberbeanspruchungen in den Anlagen zu vermeiden, muss das Kreislaufwasser im thermischen Netz bestimmte Qualitäts-Anforderungen erfüllen. Eine umfassende Darstellung liefern das AGFW Arbeitsblatt FW 510 [158], die SWKI-Richtlinie BT102-01 [159] und das Merkblatt Beschaffenheit des Füll- und Ergänzungswassers für Heizungs- und Kühlanlagen von suissetec [160]. Die folgenden Ausführungen fassen daraus die wichtigsten Punkte zusammen.

### 4.6.1 Wasserarten

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Flüssigkeitskategorien sowie gebräuchliche Begriffe für die unterschiedlichen Wasserarten in der Gebäudetechnik und in thermischen Netzen kurz beschrieben. Besonders Augenmerk wurde auf den Begriff Warmwasser gelegt, welcher in der Gebäudetechnik sowie in thermischen Netzen gebräuchlich ist, umgangssprachlich jedoch auch für warmes Trinkwasser, sprich für erwärmtes Kaltwasser verwendet wird. Aus diesem Grund wird in diesem Dokument für warmes Trinkwasser der Begriff Brauchwarmwasser und Brauchwarmwassererwärmung (kurz BWE) benutzt.

#### 4.6.1.1 Flüssigkeitskategorie

Flüssigkeiten, die in Kontakt mit Trinkwasser kommen können, werden gemäss SVGW Richtlinie W3 [161] in fünf **Flüssigkeitskategorien** eingeteilt. Gemäss diesen Flüssigkeitskategorien entspricht das Kreislaufwasser in thermischen Netzen (primär- und sekundärseitig) vielfach den Flüssigkeitskategorien 3 und 4.

##### Flüssigkeitskategorie 1:

Wasser für den menschlichen Gebrauch, das direkt einer Trinkwasserinstallation entnommen wird und den Bestimmungen der Lebensmittelgesetzgebung entspricht.

##### Flüssigkeitskategorie 2:

Flüssigkeit die keine Gefährdung der menschlichen Gesundheit darstellt. Flüssigkeiten, die für den menschlichen Gebrauch geeignet sind, einschliesslich Wasser aus einer Trinkwasserinstallation, das eine Veränderung in Geschmack, Geruch, Farbe oder Temperatur (Erwärmung oder Abkühlung) aufweisen kann.

Beispiele: Warmes Trinkwasser, Fruchtsäfte, Suppen, Kaffee, Wasser von gekochten Lebensmitteln etc.

##### Flüssigkeitskategorie 3:

Flüssigkeit die eine Gefährdung für Menschen durch die Anwesenheit eines oder mehrerer giftiger Stoffe darstellt.

Beispiele: Heizungswasser (ohne Additive), Wasser mit Frostschutzmittel, Spülwasser für Geschirr- und Küchengeräte, Spülkastenwasser, zahnärztliche Arbeitsplätze etc.

##### Flüssigkeitskategorie 4:

Flüssigkeit die eine Gefährdung für Menschen durch die Anwesenheit eines oder mehrerer giftiger oder

besonders giftiger Stoffe oder einer oder mehrerer radioaktiver, mutagener oder kanzerogener Substanzen darstellt.

Beispiele: Heizungswasser mit Additiven, Wasser mit oberflächenaktiven Stoffen, Wasser mit Desinfektionsmittel, Wasser mit Algecidin, etc. Die Abgrenzung zwischen Kategorie 3 und 4 ist  $LD_{50} = 200 \text{ mg/kg Körpergewicht}$ .

##### Flüssigkeitskategorie 5:

Flüssigkeit die eine Gesundheitsgefährdung für Menschen durch die Anwesenheit von mikrobiellen oder viralen Erregern übertragbarer Krankheiten darstellt.

Beispiele: Regenwasser, Schwimmbeckenwasser, Waschmaschinenwasser, WC-Wasser, Wasser aus Tiertränken etc.

#### 4.6.1.2 Begriffe in der Gebäudetechnik

##### Trinkwasser:

Nach der schweizerischen Lebensmittelgesetzgebung ist Trinkwasser definiert als Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung bestimmt ist zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen sowie zur Reinigung von Gegenständen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen [162]. Unter Trinkwasser wird auch Wasser für Körperpflege und -reinigung (Dusch- und Badewasser usw.) verstanden.

##### Kaltwasser:

Kaltes Trinkwasser, dessen Temperatur nicht gezielt erhöht wird.

##### Brauchwarmwasser (umgangssprachlich Warmwasser):

Warmes Trinkwasser, dessen Temperatur durch Zuführung von Wärme erhöht wird. Nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Fernwärmetechnik.

In diesem Dokument wird für den weiteren Gebrauch der Begriff Brauchwarmwasser und Brauchwarmwassererwärmung (BWE) benutzt.

##### Betriebswasser:

Wasser für gewerbliche und häusliche Einsatzbereiche, welches keine Trinkwasserqualität haben muss.

#### 4.6.1.3 Begriffe in thermischen Netzen

##### Rohwasser:

Das vor der Aufbereitungsanlage zur Verfügung stehende Wasser, unabhängig von einer eventuellen vorhergehenden ausserbetrieblichen Behandlung.

##### Weichwasser:

Durch Ionenaustausch von Erdalkalien befreites (enthärtetes) Wasser.

##### Entsalztes Wasser:

Durch Ionenaustausch von dissoziierten wasserlöslichen Stoffen weitestgehend befreites Wasser, gekennzeichnet durch eine elektrische Leitfähigkeit  $< 20 \mu\text{S/cm}$  und einen Kieselsäuregehalt  $< 0.5 \text{ mg/l}$ .

##### Vollentsalztes Wasser:

Durch Ionenaustausch von dissoziierten wasserlöslichen Stoffen befreites Wasser (auch bekannt als Deionat, VE-Wasser oder salzfreies Wasser), gekennzeichnet

net durch eine elektrische Leitfähigkeit  $< 0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$  und einen Kieselsäuregehalt  $< 0.02 \text{ mg}/\text{l}$ .

#### Füll- und Ergänzungswasser:

Aufbereitetes Wasser, mit dem die Erst-, Neu- und Teilfüllung von thermischen Netzen erfolgt.

#### Kreislaufwasser:

Wasser, das in thermischen Netzen durch den Wärmeerzeuger, das Verteilnetz und allenfalls durch Heizkörper oder Wärmeübergabestationen fließt. Der Begriff gilt nicht nur für Primärnetze, sondern auch für Wasser in einem Sekundärnetz.

#### Warmwasser :

Kreislaufwasser mit einer Temperatur  $\leq 110^\circ\text{C}$ . Muss nicht zwingend über Trinkwasser-Qualität verfügen und ist nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Gebäudetechnik.

#### Heisswasser :

Kreislaufwasser mit einer Temperatur  $> 110^\circ\text{C}$ .

### 4.6.2 Empfehlung an die Wasserbeschaffenheit in thermischen Netzen

Die in diesem Kapitel angegebenen Empfehlungen betreffen das **Kreislaufwasser im thermischen Netz** (primär- und sekundärseitig) und dienen dazu, wasserseitige Schäden durch Korrosion und Ablagerungen und eine hohe Energieeffizienz langfristig zu vermeiden respektive sicherzustellen.

Die aufgeführten Daten stammen aus der SWKI-Richtlinie BT102-01 [159]. Die Datenblätter können auf der Webseite von SWKI heruntergeladen werden und direkt als Bestandteil einer Ausschreibung oder einer Offertanfrage verwendet werden.

Neben den nachfolgenden Richtwerten ans Kreislaufwasser sind auch Anforderungen der Komponentenhersteller zu berücksichtigen respektive sind Anforderungen ans Kreislaufwasser sowie zu Komponenten und Materialien in den technischen Anschlussvorschriften aufzuführen.

Bei Abweichungen der Qualität von den Richtwerten sind Korrekturmaßnahmen (Wasseraufbereitung, Wasserbehandlung etc.) vorzunehmen. Bei Warmwasser wird eine jährliche Kontrolle des Kreislaufwassers empfohlen, bei Heisswasser ist eine vierteljährliche Kontrolle des Kreislaufwassers empfehlenswert.

#### 4.6.2.1 Warmwasser bis $110^\circ\text{C}$

In der Tabelle 4.10 sind Richtwerte für das Füll- und Ergänzungswasser und in der Tabelle 4.11 für das Kreislaufwasser angegeben.

Tabelle 4.10 Anforderungen an Füll und Ergänzungswasser bis  $110^\circ\text{C}$  [159].

| Bezeichnung           | Einheit                 | Soll    |
|-----------------------|-------------------------|---------|
| elektr. Leitfähigkeit | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | $< 100$ |
| pH-Wert               | –                       | 6.0-8.5 |
| Gesamthärte GH        | $\text{mmol}/\text{l}$  | $< 0.1$ |

Tabelle 4.11 Anforderungen an Kreislaufwasser bis  $110^\circ\text{C}$  [159].

| Bezeichnung                       | Einheit                 | Soll    |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|
| elektr. Leitfähigkeit             | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | $< 200$ |
| pH-Wert                           | –                       | 8.2-10  |
| Gesamthärte GH                    | $\text{mmol}/\text{l}$  | $< 0.5$ |
| Chloride                          | $\text{mg}/\text{l}$    | $< 30$  |
| Sulfate                           | $\text{mg}/\text{l}$    | $< 50$  |
| Sauerstoff                        | $\text{mg}/\text{l}$    | $< 0.1$ |
| Eisen gelöst                      | $\text{mg}/\text{l}$    | $< 0.5$ |
| Totaler organischer CO-Gehalt TOC | $\text{mg}/\text{l}$    | $< 30$  |

#### 4.6.2.2 Heisswasser ab $110^\circ\text{C}$

In thermischen Netzen sind bei Temperaturen des Kreislaufwassers über  $110^\circ\text{C}$  zwei wasserchemische Betriebsweisen üblich:

- salzarme Betriebsweise
- salzhaltige Betriebsweise.

In der Tabelle 4.12 sind Richtwerte für das Füll- und Ergänzungswasser und in der Tabelle 4.13 für das Kreislaufwasser ab  $110^\circ\text{C}$  aufgelistet.

Tabelle 4.12 Anforderungen an das Füll und Ergänzungswasser ab  $110^\circ\text{C}$  [159].

| Bezeichnung           | Einheit | Wasserchemische Betriebsweise<br>Sollwerte    |           |            |
|-----------------------|---------|-----------------------------------------------|-----------|------------|
|                       |         | salzarm                                       |           | salzhaltig |
| Allgemein             |         | farblos, klar, frei von ungelösten<br>Stoffen |           |            |
| elektr. Leitfähigkeit | µS/cm   | 10 - 30                                       | >30 - 100 | 100 - 1500 |
| pH-Wert               |         | 8.0-10                                        | 8-10.5    | 8.5-10.5   |
| Gesamthärte GH        | mmol/l  | < 0.02                                        | < 0.02    | < 0.02     |
| Sauerstoff            | mg/l    | < 0.1                                         | < 0.1     | < 0.1      |

Tabelle 4.13 Anforderungen an das Kreislaufwasser ab 110°C [159].

| Bezeichnung                 | Einheit | Wasserchemische Betriebsweise Sollwerte    |            |            |
|-----------------------------|---------|--------------------------------------------|------------|------------|
|                             |         | salzarm                                    | salzhaltig |            |
| Allgemein                   |         | farblos, klar, frei von ungelösten Stoffen |            |            |
| elektr. Leitfähigkeit       | µS/cm   | 10 - 30                                    | >30 - 100  | 100 - 1500 |
| pH-Wert                     |         | 9.0-10.0                                   | 9.0-10.5   | 9.5-10.5   |
| Gesamthärte GH              | mmol/l  | < 0.02                                     | < 0.02     | < 0.02     |
| Sauerstoff                  | mg/l    | < 0.1                                      | < 0.05     | < 0.02     |
| K <sub>S8,2</sub> (p-Wert)* | mmol/l  | –                                          | 0.1-0.5    | 0.5-5      |
| Phosphat                    | mg/l    | 3-6                                        | 5-10       | 5-15       |

Die Säurekapazität K<sub>S8,2</sub> gibt an, wie viel Säure eine Wasserprobe bis zum Umschlagspunkt des Indikators Phenolphthalein (pH 8,2) aufnimmt. Diese Messung gibt Auskunft über die Laugenkonzentration, die im Wasser vorhanden ist und wird in mg/l angegeben. Diese Messung ist im Dampfkesselbereich zusätzlich durchzuführen.

#### 4.6.2.3 Messgrößen

Die Qualitätsüberwachung des Kreislaufwassers in thermischen Netzen kann durch die Messung und Überwachung der folgenden Werte gewährleistet werden:

##### pH-Wert:

Der pH-Wert ist eine Masszahl für die saure, neutrale oder alkalische Reaktion des Wassers. Säuren spalten im Wasser Wasserstoffionen (H<sup>+</sup>) ab. Laugen (Basen) spalten im Wasser Hydroxidionen (OH<sup>-</sup>) ab. Der pH-Wert ist daher das Mass für die Wasserstoffionenkonzentration (H<sup>+</sup>).

$$pH = -\log_{10}(H^+)$$

Beispiel: 0.00001 mol H<sup>+</sup>/l: pH =  $-\log_{10} 0.00001 = 5$

Bezogen auf die Temperatur von 25°C gilt die pH-Skala von 0 bis 14. Wasser ist sauer bei pH < 7, neutral bei pH = 7 und alkalisch bei pH > 7. Eine Veränderung des pH-Wertes um eine Stelle (zum Beispiel von pH 8 auf pH 9) bedeutet, dass sich der Säuregehalt des Wassers um das Zehnfache verändert hat.

Die Messung erfolgt mit Indikatoren (Indikatorpapier oder flüssige Indikatoren) oder elektrochemisch mittels pH-Elektroden.

##### Elektrische Leitfähigkeit:

Die Bestimmung des Salzgehaltes erfolgt in der Regel durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, in die alle dissoziierten Bestandteile des zu untersuchenden Mediums eingehen, d.h. Basen, Säuren und Salze. Eine steigende Leitfähigkeit begünstigt die elektrochemischen Korrosionsvorgänge.

Die elektrische Leitfähigkeit stellt den reziproken Wert des elektrischen Widerstands ( $S = 1/\text{Ohm}$ ) bezogen auf

einen Wasserwürfel von 1 cm bei 25°C dar (Einheit: µS/cm; Mikrosiemens/cm).

##### Wasserhärte:

Nach dem SI-Masssystem wird der Gehalt der Erdalkalitionen, also die Gesamthärte in Mol pro Liter oder für die geringen Konzentrationen in Millimol pro Liter (mmol/l) angegeben.

Die Wasserhärte wurde früher in Grad deutscher Härte (°dH) angegeben. Ein Deutscher Härtegrad entspricht 10 mg Calciumoxid pro Liter oder 10 g Calciumoxid pro Kubikmeter. In der Schweiz sind die französischen Härtegrade °fH weit verbreitet. Später wurde die Angabe der Wasserhärte in der praxisgerechten Stoffmengen-Äquivalenzeinheit Millival pro Liter (mval/l) verwendet (siehe Tabelle 4.14). Heute sind gesetzlich die oben genannten molaren Angaben gefordert.

Tabelle 4.14 Umrechnung der Wasserhärte.

|                   |        | °dH  | °fH  | mval/l | mmol/l |
|-------------------|--------|------|------|--------|--------|
| Deutsche Grad     | °dH    | 1    | 1.78 | 0.357  | 0.1783 |
| Französische Grad | °fH    | 0.56 | 1    | 0.2    | 0.1    |
| Äquivalenzeinheit | mval/l | 2.8  | 5    | 1      | 0.5    |
| SI-Masssystem     | mmol/l | 5.6  | 10   | 2      | 1      |

Die Wasserqualität kann regional stark unterschiedlich sein. Vereinfacht wird unter der Härte des Wassers der Gehalt an gelösten Kalzium- und Magnesiumsalzen verstanden (Gesamthärte GH). Zusätzlich wird zwischen Carbonathärte (CH) und Nichtcarbonathärte (NCH) unterschieden. Beide Härtebildner spielen eine besondere Rolle, da diese sich bereits bei einer Erwärmung ab 61°C als schwer lösliche Niederschläge (Kesselstein) an den Rohr- und Behälterwandungen ablagern.

- GH: Summe der Erdalkalien GH:  
GH = Calcium Ca<sup>2+</sup> + Magnesium Mg<sup>2+</sup>
- CH: Derjenige Anteil an Calcium und Magnesium, welcher als Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Carbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) vorliegt.
- NCH: Anteil an Calcium und Magnesium, welcher mit anderen Anionen verbunden ist, wie Chloride (Cl<sup>-</sup>), Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Es gilt: **GH = CH + NCH**

In der Schweiz wird Wasser in sechs Härtestufen unterteilt (siehe Tabelle 4.15). Die Wasserqualität kann regional stark unterschiedlich sein. Allgemeine Angaben diverser Regionen sind deshalb unzureichend. Zudem können die Wasserwerte bei Verbundanlagen von Seewasser, Grundwasser und Quellwasser im Jahresverlauf unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 4.15 Wassertypen in der Schweiz und deren Einteilung in französische Härtegrade.

| Wassertyp     | Wasserhärte °fH |
|---------------|-----------------|
| sehr weich    | 0-7             |
| weich         | 7-15            |
| mittelhart    | 15-25           |
| ziemlich hart | 25-32           |
| hart          | 32-42           |
| sehr hart     | > 42            |

Es wird empfohlen, die Wasseranalyse des entsprechenden Wassers bei der zuständigen Wasserversorgung einzufordern. Trinkwasser ist ein Lebensmittel und untersteht der Deklarationspflicht. Die notwendigen Analysedaten müssen deshalb von der Wasserversorgung zur Verfügung gestellt werden. Bei der Verwendung von Oberflächenwasser und von Regenwasser muss die Wasseranalyse aufgrund einer repräsentativen Probe erstellt werden.

#### Sauerstoff

Normales Leitungswasser enthält, je nach Herkunft, in der Regel zwischen 5 und 12 mg/l Sauerstoff. In einem geschlossenen Wassersystem stellt sich nach einigen Tagen bis Wochen und ohne weitere Nachspeisung ein tieferer Sauerstoffgehalt ein.

Ein erhöhter Sauerstoffgehalt in einem geschlossenen System (Heiz- oder Kühlkreislauf) ist unerwünscht und kann von einer früheren Nachspeisung oder aber auch von Sauerstoffdiffusion (zum Beispiel durch nicht diffusionsdichte Leitungen) herrühren.

Bei der Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Kreislaufwasser ist darauf zu achten, dass kein zusätzlicher Sauerstoff in das Probewasser gelangen kann.

#### Chlorid

Der Gehalt an Chlorid ist wichtig für die Korrosionswirkung. Chlorid begünstigt die örtliche Korrosion (Loch-, Muldenfrass). Chloride können in grösseren Konzentrationen auch Chromstahl und Chromnickelstahl beeinträchtigen, insbesondere bei höheren Temperaturen. Der Chlorid-Gehalt wird in mg/l angegeben.

#### Sulfat

Sulfat ist ebenfalls wichtig für die Korrosionswirkung, da es die örtliche Korrosion (Loch-, Muldenfrass) beeinflusst. Der Sulfat-Gehalt wird in mg/l angegeben.

#### Nitrat

Nitrat begünstigt ebenfalls die örtliche Korrosion (Loch-, Muldenfrass). Erhöhte Nitratwerte im Trinkwasser, vor allem in Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung, können das Korrosionsverhalten wesentlich beeinflussen. Der Nitratgehalt wird in mg/l angegeben.

### 4.6.2.4 Wasseraufbereitung

Die Verfahren der Wasseraufbereitung können sich auf das Ergänzungswasser und/oder auf einen Teilstrom des Kreislaufwassers beziehen. Die Qualität des Kreislaufwassers kann sich durch Fremdwassereinbruch, Gaseintrag oder Korrosionsvorgänge verschlechtern und durch den Einsatz von Konditionierungsmitteln verändern. Mit Hilfe einer Teilstromaufbereitungsanlage (Filtration, Entgasung und Ionenaustauscher) können im Bypass die suspendierten und gelösten Inhaltsstoffe entfernt werden. Folgende Verfahren kommen zum Einsatz:

#### Filtration:

Bei der Entfernung von wasserunlöslichen Stoffen werden zur Vermeidung von Ablagerungen oder Funktionsbeeinträchtigungen nachgeschalteter Bauteile verschiedene mechanische Verfahren eingesetzt. Für feindisperse Stoffe können z.B. Kerzenfilter, Beutelfilter oder Anschwemmkerzenfilter verwendet werden. Für grobe Schmutzpartikel werden Schmutzfänger eingesetzt.

#### Entsalzung:

Durch Ionenaustauscherverfahren können im Wasser gelöste Salze (Kationen und Anionen) zur Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit entfernt werden. Hierfür werden üblicherweise stark saure Kationenaustauscher in Kombination mit stark basischen Anionenaustauschern eingesetzt. Eine weitgehende Entsalzung kann auch mittels Membrantechnik (Umkehrosmose) erreicht werden. Beim Einsatz der Verfahren sind im Teilstrombetrieb Temperaturgrenzen zu berücksichtigen.

Die Elektrodeionisation (EDI) ist eine elektrochemische Entsalzung. Das Verfahren ist eine Kombination aus Elektrodialyse und Ionenaustauscher. Eine EDI-Anlage wird als Verfahrensschritt zur Restentsalzung nach einer Umkehrosmose eingesetzt. Bei optimaler Vorbehandlung kann eine Leitfähigkeit bis 0,06 µS/cm erreicht werden. Ein EDI-Modul besteht aus ionenselektiven Membranen und Ionenaustauscherharzen die sandwichartig zwischen zwei Elektroden angeordnet sind. Durch das Anlegen einer Gleichstromspannung an die Pole werden die Ionen entsprechend ihrer Ladung zur Wanderung gezwungen. Die anionenselektiven Membranen lassen nur Anionen, die kationenselektiven Membranen Kationen passieren. Beide Membrantypen sind wasserundurchlässig.

#### Enthärtung:

Durch Verwendung von mit technischem Steinsalz regenerierbaren Kationenaustauschern, werden die Härtebildner (Calcium- und Magnesium-Ionen) gegen Natrium-Ionen ausgetauscht. Das Wasser ist somit härtefrei und kann keine Steinbildung mehr verursachen. Diese Art der Wasseraufbereitung wird üblicherweise bei der salzhaltigen Betriebsfahrweise angewendet.

**Entgasung:**

Für die Entfernung des im Wasser natürlich vorhandenen Anteils gelöster Gase, wie  $O_2$ ,  $N_2$  und  $CO_2$  haben sich in der Praxis die Verfahren der thermischen Entgasung und der Vakuumentgasung (Druckstufenentgasung) bewährt.

**Sauerstoff-Entfernung:**

Die teilweise Entfernung von Sauerstoff kann ebenfalls bei der Entgasung geschehen.

In geschlossenen Kreisläufen ist zur Wasserbehandlung der Einsatz von Opferanoden zur Sauerstoffbindung geeignet. Die Magnesiumanoden bauen Magnesium ab, das mit Sauerstoff oxidiert, womit der Sauerstoff gebunden wird. Der dabei entstehende  $Mg(OH)_2$ -Schlamm muss auf geeignete Weise abgeführt werden.

#### 4.6.2.5 Wasserbehandlung – Konditionierung

Unter Konditionierung wird die Wasserbehandlung zur Stabilisierung von Härte, der Korrosionsschutz und die Bekämpfung von biologischem Befall mit geeigneten Zusatzstoffen verstanden. Die Zugabe von chemischen Mitteln kann zur Einstellung der Richtwerte notwendig sein oder auch eine Massnahme zur Begrenzung von Schäden durch die in der Praxis meist unvermeidlichen Fremdwasser- und Lufteinbrüche darstellen.

Dabei sollte beachtet werden, dass Konditionierungsmittel die elektrische Leitfähigkeit erhöhen kann. Es ist auf die Werkstoffverträglichkeit und auf die Reinheit der eingesetzten Chemikalien zu achten. Weiter ist bei der Kombination von Konditionierungsmitteln auf die Verträglichkeit der Chemikalien untereinander zu achten. Beim Einsatz von Konditionierungsmitteln ist neben hygienisch-toxikologischen Aspekten auch auf deren Umweltverträglichkeit zu beachten.

**Anhebung des pH-Wertes:**

Eine Anhebung des pH-Wertes wird durchgeführt, um eine Eisenauflösung im Wasser, die unter der Bildung von Eisen(II)-hydroxid abläuft, zurückzudrängen und eine Schutzschichtbildung aus Eisenoxiden (Magnetit) zu bilden (bei Vorlauftemperatur  $\gg 100^\circ C$ ). Um eine ausreichende Schutzalkalität zu erzielen, können grundsätzlich sowohl Natronlauge ( $NaOH$ ) als auch die in den letzten Jahren bewährten Amine eingesetzt werden.

Als Optimum für den Schutz des Werkstoffes Eisen gilt ein pH-Wert von ca. 9.3. Praktische Erfahrungen zeigen, dass bei indirekt beheizten Anlagen pH-Werte bis runter zu 8.5 für einen störungsfreien Betrieb genügen. Bei Messingwerkstoffen besteht die Gefahr von Erosionskorrosion bei pH-Werten  $> 9$  und örtlich erhöhter Strömungsgeschwindigkeit.

**Härtestabilisierung:**

Die vorher beschriebenen Wasseraufbereitungsverfahren garantieren grundsätzlich die Einstellung des richtigen Härtegrades. Unvermeidbaren geringen Aufhärtingen durch Fremdwassereinbrüche kann durch den Einsatz von Härtestabilisatoren und Kesselsteingegen-

mittel begegnet werden. In der Praxis haben sich Chemikalien auf Phosphatbasis, Polyphosphate sowie Polyacrylate bewährt, die neben der Eigenschaft, harte Kesselsteinablagerungen zu vermeiden, auch Ablagerungen von Korrosionsprodukten und suspendierten Feststoffen verhindern können.

**Sauerstoffeliminierung:**

Bei einem weitgehend geschlossenen hydraulischen Kreis ohne erhöhten Ergänzungswasserbedarf ist im störungsfreien Betrieb der Sauerstoffeintrag so gering, dass keine Korrosionsschäden zu befürchten sind. Die Sauerstoffeliminierung ist hier technisch nicht erforderlich. Eine Sauerstoffeliminierung ist hingegen sinnvoll, wenn wegen besonderer Betriebsbedingungen ein erhöhter Sauerstoffeintrag zu erwarten ist. Die Eliminierung kann durch den Einsatz von Teilstromentgasungsanlagen, durch katalytische und elektrochemische Sauerstoffeliminierung und durch Zugabe eines der folgenden Sauerstoffbindemittel erfolgen:

- Hydrazin: Wegen der Einstufung als kanzerogener Stoff nur noch in begründeten Ausnahmefällen zulässig. Bei direktem Anschluss der Warmwassererwärmung verboten.
- Natriumsulfit: Begrenzt auf die salzhaltige Betriebsfahrweise, da es den Salzgehalt stetig erhöht. Zur Verringerung des Korrosionsrisikos sollte ein Sulfatgehalt von 250 mg/l nicht überschritten werden. Nicht geeignet in Verbindung mit kupferhaltigen Werkstoffen.
- Organische Sauerstoffbindemittel wie Ascorbinsäure.

**Korrosionsinhibitoren:**

Korrosionsinhibitoren und ihre Reaktionsprodukte dürfen bei sachgemäßer Anwendung weder den Wärmeübergang reduzieren noch Korrosion auslösen. Zu den üblichen Korrosionsinhibitoren gehören neben Phosphaten und Silikaten auch Chemikaliengemische auf der Basis von Aminen, Borat, Molybdat, Nitrit und Tannin. Alle diese Stoffe bilden als Zersetzungsprodukte anorganische und/oder organische Säuren oder sonstige organische Verbindungen, so dass mit geeigneten Puffersubstanzen (z.B. Phosphate) der pH-Wert stabil gehalten werden muss.

## 4.7 Wärmeverluste

### 4.7.1 Übersicht und Grobe Beurteilung

Die Wärmeverluste eines thermischen Netzes beeinflussen die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems und werden hauptsächlich durch folgende Faktoren beeinflusst:

- **Netzstruktur** im Raum wie Trassenführung, Anschlussdichte, Ausbaustand.
- **Entwicklung des Leistungsbedarfs** und des Energieabsatzes im Vergleich zu den (plausibilisierten) Plandaten.
- **Leitungen** wie Rohrsystem, Materialien, Dimensionierung, Dämmstärke, Verlegesituationen und -methoden.
- **Betriebsbedingungen** wie Temperaturniveau, Temperaturspreizung, Betriebsdauer und Betriebsregime.

Für die Bestimmung der Wärmeverluste gibt es grundsätzlich zwei Ansätze.

Erstens können die Wärmeverluste anhand von Wärmezählerdaten bestimmt werden, indem die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge mit der gesamthaft an die Kunden gelieferten Wärmemenge verglichen werden. Mitberücksichtigt werden dabei auch Strahlungs- und Konvektionsverluste von Übergabestationen, Pumpen, Armaturen, etc.. Mit dieser Methode kann der Wärmeverlust jedoch erst im Betrieb gemessen werden.

Zweitens können die Wärmeverluste anhand von Netzplänen, Ausbautappen, Leistungsbedarfsdaten, Betriebsbedingungen und Daten der eingesetzten Rohrsysteme berechnet und abgeschätzt werden. Im Vergleich mit der ersten Methode sind in der Regel tiefere Werte zu erwarten, da die oben erwähnten Konvektions- und Strahlungsverluste im Detail nicht mitberücksichtigt sind.

Mit den in Bild 4.43 dargestellten Systemgrenzen kann ein thermisches Netz grob beurteilt werden.

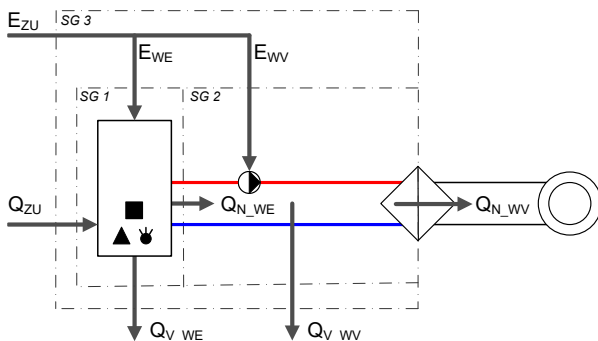


Bild 4.43 Systemgrenzen für die Beurteilung eines thermischen Netzes mit Begriffen nach Tabelle 4.16.  
SG1: Wärmeerzeugung  
SG2: Wärmeverteilung Primärseite  
SG3: Fernwärmesystem „Wärmeverbund“.

Die Systemgrenze SG1 stellt die Wärmeerzeugung (WE) dar. Zugeführte Energieströme sind die elektrische Energie für die Wärmeerzeugungsanlage wie zum Beispiel Pumpen, Fördersysteme, Ventilatoren und die im Brennstoff enthaltene Energiemenge. Die aus der Systemgrenze SG1 abgeführten Energieströme setzen sich zusammen aus Wärmeverluste (unvollständige Verbrennung und Strahlungsverluste der Wärmeerzeugungsanlage) und die zur Nutzung erzeugte Energiemenge.

Die Systemgrenze SG2 stellt die Wärmeverteilung (WV) dar. Zugeführte Energieströme sind die elektrische Energie für die Wärmeverteilung notwendigen Aggregate wie Pumpen, Regelventile, Frequenzumrichter, Leckageüberwachung etc. und die aus der Wärmeerzeugung ins thermische Netz eingespeiste Wärme. Die aus der Systemgrenze SG2 abgeführten Energieströme setzen sich zusammen aus Wärmeverlusten des Verteilnetzes und die an die Kunden verkaufte Wärmemenge.

Die Systemgrenze SG3 stellt das gesamte thermische Netz dar. Zugeführte Energieströme sind die elektrische Energie für alle Aggregate der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung sowie die im Brennstoff enthaltene Energiemenge. Die aus der Systemgrenze SG3 abgeführten Energieströme setzen sich zusammen aus Wärmeverlusten der Wärmeerzeugung und Verteilung sowie die an die Kunden verkaufte Wärme.

Tabelle 4.16 Legende zur Darstellung der Systemgrenzen in Bild 4.43.

| Bezeichnung                          | Symbol      | Einheit |
|--------------------------------------|-------------|---------|
| Zugeführte elektrische Energiemenge  | $E_{ZU}$    | MWh/a   |
| Elektr. Energiemenge Wärmeerzeugung  | $E_{WE}$    | MWh/a   |
| Elektr. Energiemenge Wärmeverteilung | $E_{WV}$    | MWh/a   |
| Zugeführte Wärmemenge                | $Q_{ZU}$    | MWh/a   |
| Nutzwärme Wärmeerzeugung             | $Q_{N\_WE}$ | MWh/a   |
| Nutzwärme Wärmeverteilung            | $Q_{N\_WV}$ | MWh/a   |
| Wärmeverlust Wärmeerzeugung          | $Q_{V\_WE}$ | MWh/a   |
| Wärmeverlust Wärmeverteilung         | $Q_{V\_WV}$ | MWh/a   |

## 4.7.2 Oberirdische Leitungen

Bei oberirdischen (luftumspülten) Leitungen wird der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  für wärmedämmte Rohre auf den Rohrrinnenradius des medienführenden Innenrohres  $r_i$  bezogen, da dieser für die hydraulischen Berechnungen ohnehin verfügbar sein muss.

Bezogen auf das Bild 4.44 berechnet sich der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_i$  in  $W/(m^2 K)$  mit dem Innenradius als Bezugsgrösse wie folgt:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda_R} \ln\left(\frac{r_R}{r_i}\right) + \frac{r_i}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{r_i}{\lambda_M} \ln\left(\frac{r_M}{r_D}\right) + \frac{r_i}{r_M \alpha_a}}$$

Mit den im Heizungsbau üblichen Materialien, Rohrdurchmessern und Strömungsgeschwindigkeiten können der innere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_i$  und die Wärmeleitwiderstände der Rohre  $\lambda_R$  für die Berechnung vereinfachend als unendlich gross angenommen und vernachlässigt werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_R$  wird daher auf den Rohraussenradius des Medienführenden Rohres  $r_R$  bezogen. Die genannten Vereinfachungen führen zu folgendem Ausdruck [163]:

$$U_R = \frac{1}{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{r_R}{r_D \alpha_a}}$$

Für den äusseren Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_a$  bestehend aus Konvektions- und Strahlungsanteil kann für wärmedämmte Rohre in Gebäuden und Kanälen ein Mittelwert von ungefähr  $9.7 W/(m^2 K)$  eingesetzt werden. Für Freileitungen ist der Wärmeübergangskoeffizient wesentlich von der Windgeschwindigkeit abhängig. Als Mittelwert kann ein Wert von rund  $23.2 W/(m^2 K)$  angenommen werden.

Multipliziert mit der massgebenden Oberfläche der Rohrleitung in  $m^2$

$$A_R = 2 \pi l r_R$$

und dem Temperaturunterschied zwischen Innen und Aussen in  $K$

$$\Delta T = T_a - T_i$$

ergibt sich für den Wärmeverluststrom in  $W$  folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_V = U_R A_R \Delta T = \frac{2 \pi l (T_a - T_i)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{1}{r_D \alpha_a}}$$

Der spezifische Wärmeverluststrom pro Meter in  $W/m$  ergibt dann:

$$\dot{q}_V = \frac{\dot{Q}_V}{l} = \frac{2 \pi (T_a - T_i)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{1}{r_D \alpha_a}}$$

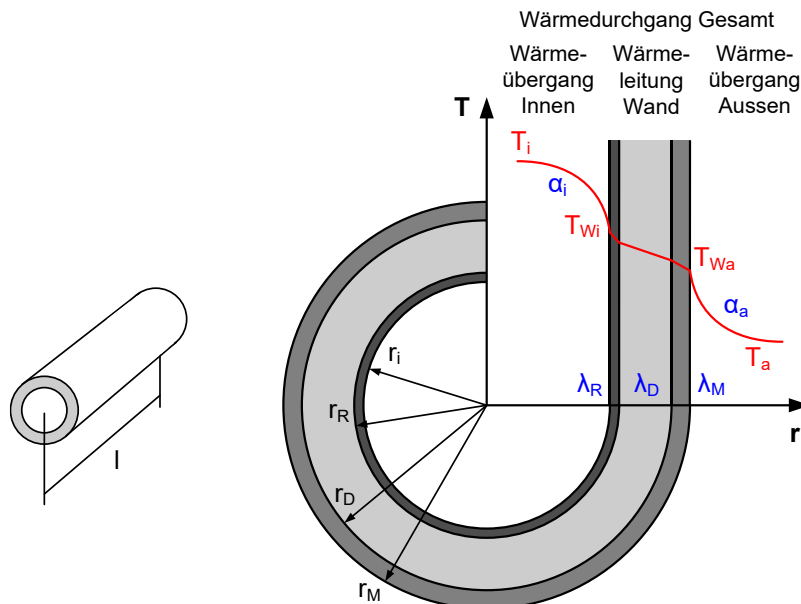


Bild 4.44 Allgemeine Darstellung des Wärmedurchgangs durch ein wärmedämmtes Rohr.

### 4.7.3 Erdverlegte Leitungen

Thermische Netze werden in der Regel in erdverlegten Leitungen ausgeführt. Stahl- oder Kunststoffrohre sind fest mit einer Wärmedämmung versehen und werden von einem Mantelrohr umhüllt (siehe Kapitel 4.2.1).

Die Berechnung der Wärmeverluste ist relativ komplex, da diese mindestens zweidimensional wirken und als Randbedingungen konstante Temperaturen am Rohrumfang, konstante Aussenlufttemperatur an der Erdoberfläche und konstante Erdreichtemperaturen in vorgegebener Tiefe angenommen werden. In Wirklichkeit müssten die Rohrtemperatur, die Aussentemperatur und die Erdreichtemperatur als Zeitfunktion und somit für instationäre Wärmetransport-Prozesse bestimmt werden. Die numerische Berechnung kann mit der Methode der finiten Elemente erfolgen, dies ist jedoch aufwändig und nicht verallgemeinerungsfähig und setzt Kenntnisse über das genaue Temperaturregime der betrachteten Netzteilstrecke als Zeitfunktion voraus [163].

In guter Näherung kann der Wärmetransport jedoch als stationärer Vorgang behandelt werden, weil folgendes gilt:

- Im Dämmmaterial des Rohres werden etwa 80 % bis 90 % der Temperaturdifferenz (Rohr zu Erdoberfläche) abgebaut. Wegen der relativ geringen Schichtdicke, ist der Temperaturverlauf im Mantel näherungsweise als quasistationär anzusehen.
- Die zeitliche Betriebsweise des Netzes ist im Allgemeinen nicht genau bekannt. Temperaturschwingungen mit kurzen Periodendauern beeinflussen die Erdreichtemperatur infolge der grossen Dämpfung nur in unmittelbarer Nähe des Rohres und können vernachlässigt werden.
- Für die Aussentemperaturen der Erdoberfläche beziehungsweise der Aussenluft und des Grundwassers werden analog der genormten Berechnung für den Wärmeverlust erdreichberührender Bauteile zeitliche Mittelwerte verwendet.

Für die heutzutage in der Regel erdverlegten Rohrsysteme müssen zusätzlich die Wärmeleitung vom Erdreich an die Umgebung und der gegenseitige Einfluss der beiden Rohrleitungen aufeinander berücksichtigt werden. Wie in Bild 4.45 ersichtlich, ist als minimale Wärmedämmstärke des Erdreichs gegenüber der Umgebung die Überdeckungshöhe  $h_0$  und der lichte Rohrabstand  $a$  zwischen den beiden Rohrleitungen zu beachten. Wie in Kapitel 4.7.2 werden die Wärmeleitwiderstände der Rohre (Stahlmedium- und Kunststoffmantelrohr) vernachlässigt.

Der Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient erdverlegter Leitungen setzt sich aus folgenden drei Anteilen zusammen:

- Wärmeleitung durch das Dämmmaterial,
- Wärmeleitung durch das Erdreich,
- Gegenseitiger Einfluss der beiden Rohrleitungen.

Zur Vereinfachung wird im weiteren Verlauf auf erdverlegte Leitungen mit starren Stahlmediumrohren in Einzelrohrausführung (KMR) eingegangen. Die Berechnung kann auch auf flexible Rohrsysteme wie MMR und PMR angewendet werden, sofern die benötigten Abmessungen und Daten zur Verfügung stehen.

Für die vereinfachte Berechnung des spezifischen Wärmeverluststroms für erdverlegte Leitungen mit starren Stahlmediumrohren in Einzelrohrausführung gelten folgende Einschränkungen:

- Mediumrohr aus Stahl oder Kunststoff
- Mantelrohr aus Kunststoff (PE)
- Mit dem Medium- und Mantelrohr festverbundener Polyurethan-Schaum (PUR) als Dämmmaterial
- Vor- und Rücklaufleitung haben den selben Nenn-durchmesser
- Immer nur für einen Teilstrang einzeln berechenbar.

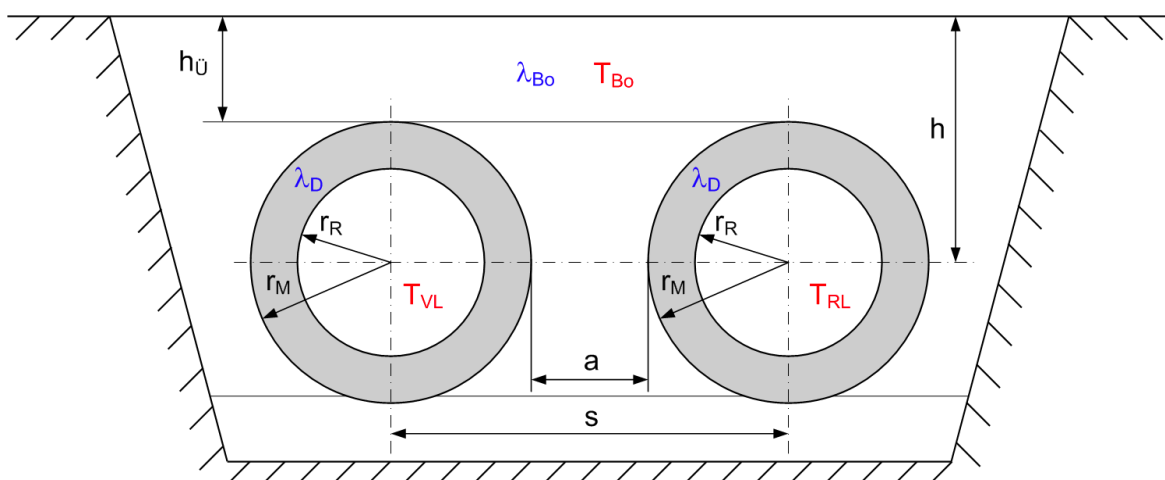


Bild 4.45 Schematische Darstellung von erdverlegten Fernwärmerohren in Einzelrohrausführung.

Aus [3] wurde folgender Zusammenhang für den **Wärmedurchgangskoeffizienten in  $W/(m^2 K)$**  von zwei erdverlegten Einzelrohren übernommen. Der Wärmedurchgangskoeffizient gilt jedoch nur für eines der beiden Einzelrohre. Die Bezugsgrösse ist der Aussenradius des Stahl-Mediumrohres  $r_R$ , da der Temperaturabfall durch das Stahlrohr sehr gering ist und vernachlässigt wird:

$$U_R = \frac{1}{\underbrace{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right)}_{\text{Dämmung}} + \underbrace{\frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{2h}{r_M}\right)}_{\text{Erdreich}} + \underbrace{\frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2h}{s}\right)^2 + 1\right]\right\}}_{\text{Gegenseitiger Einfluss}}}$$

Die **Verlegetiefe  $h$**  in m kann in Abhängigkeit der minimalen Überdeckungshöhe  $h_0$  folgendermassen ausgedrückt werden:

$$h = h_0 + r_M$$

Der horizontale **Rohrabstand  $s$**  in m kann in Abhängigkeit des lichten Rohrabstandes  $a$  wie folgt berechnet werden:

$$s = a + 2r_M$$

Durch Einsetzen der Verlegetiefe  $h$  und des horizontalen Rohrabstandes  $s$  ergibt sich für den **Wärmedurchgangskoeffizienten in  $W/(m^2 K)$**  folgender Ausdruck:

$$U_R = \frac{1}{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{r_M}\right) + \frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{a + 2r_M}\right)^2 + 1\right]\right\}}$$

Die **massgebende Oberfläche in  $m^2$**  berechnet sich wie in Kapitel 4.7.2 jedoch zusammen für die Vor- und Rücklaufleitung. Die Bezugsgrösse ist der Aussenradius des Stahl-Mediumrohres  $r_R$ .

$$A_{VR} = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_R = 4 \cdot \pi \cdot L \cdot r_R$$

Der **Temperaturunterschied für erdverlegte Leitungen in K** berechnet sich aus der Differenz zwischen der Betriebsmitteltemperatur Auslegung  $T_B$  und der mittleren Bodentemperatur  $T_{Bo}$  wie folgt:

$$\Delta T_L = T_B - T_{Bo} = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo}$$

Der **Wärmeverluststrom für die Vor- und Rücklaufleitung eines Teilstranges in W** berechnet sich aus den letzten drei Gleichungen wie folgt:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_V &= U_R \cdot A_{VR} \cdot \Delta T_L \\ \dot{Q}_V &= \frac{4 \cdot \pi \cdot L \cdot \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo}\right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{r_M}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{a + 2r_M}\right)^2 + 1\right]\right\}} \end{aligned}$$

Der **spezifische Wärmeverluststrom pro Trassenmeter in W/m** ergibt dann:

$$\begin{aligned} \dot{q}_V &= \frac{\dot{Q}_V}{L} \\ \dot{q}_V &= \frac{4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo}\right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{r_M}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2(h_0 + r_M)}{a + 2r_M}\right)^2 + 1\right]\right\}} \end{aligned}$$

Von Rohrsystemhersteller werden üblicherweise **spezifische Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung in Watt pro Trassenmeter und Kelvin  $[W/(m K)]$**  angegeben. Diese Herstellerangabe unterscheidet sich von den oben hergeleiteten Formeln dahingehend, dass der Temperaturunterschied für erdverlegte Leitungen noch nicht berücksichtigt ist. Im Kapitel 10.3 sind typische spezifische Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung für KMR-, MMR- und PMR-Rohre aufgeführt und wurden nach der untenstehenden Gleichung berechnet respektive wurden die Angaben zu Doppelrohr-Ausführungen den Produktinformationen folgender Firmen entnommen: Brugg Pipesystems, Isoplus und Logstor.

$$\dot{q}_{V,L} = \frac{U_R A_{VR}}{L} = \frac{U_R 4 \pi L r_R}{L} = U_R 4 \pi r_R$$

$$\dot{q}_{V,L} = \frac{4 \pi}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{2(h_U + r_M)}{r_M}\right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2r_M}\right)^2 + 1\right]^{0.5}\right\}}$$

Die jährlichen Wärmeverluste eines thermischen Netzes können mit dem spezifischen Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung, der mittleren Betriebsmitteltemperatur und der jährlichen Betriebszeit des Wärmenetzes vereinfacht berechnet werden.

#### 4.7.4 Jährliche Wärmeverluste

Im Betrieb können die jährlichen Wärmeverluste anhand von Wärmezählerdaten bestimmt werden, indem die jährlich ins Netz eingespiesene Wärmemenge mit der gesamthaft an die Kunden gelieferten Wärmemenge verglichen werden. Mitberücksichtigt werden dabei Strahlungs- und Konvektionsverluste von Übergabestationen, Pumpen, Armaturen etc. Die **jährlichen Wärmeverluste** werden üblicherweise auf die jährlich ins Netz eingespiesene Wärmemenge bezogen und in Prozent angegeben.

$$q_{V,a} = \frac{(\text{jährlich eingespiesene Wärmemenge ins Netz} - \text{jährlich gelieferte Wärmemenge an Kunden})}{\text{jährlich eingespiesene Wärmemenge ins Netz}} 100\%$$

Die Wärmeverluste können auch anhand von Netzplänen, Ausbaustufen, Leistungsbedarfsdaten, Betriebsbedingungen und Daten der eingesetzten Rohrsysteme berechnet und abgeschätzt werden. Im Vergleich mit der ersten Methode sind in der Regel tiefere Werte zu erwarten, da die oben erwähnten Konvektions- und Strahlungsverluste im Detail nicht mitberücksichtigt sind.

Für die Berechnung des jährlichen Wärmeverlustes braucht es neben der Information zum spezifischen Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung auch die **mittlere Betriebsmitteltemperatur**  $T_{B,m}$ :

$$T_{B,m} = \frac{T_{VL,m} + T_{RL,m}}{2}$$

Die mittlere Betriebsmitteltemperatur  $T_{B,m}$  muss bei gleitender Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Aussentemperatur bestimmt werden. Bei konstanten Vor- und Rücklauftemperaturen entspricht die mittlere Betriebsmitteltemperatur der **Betriebsmitteltemperatur nach Auslegung**  $T_B$ :

$$T_B = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2}$$

Weiter muss der Temperaturunterschied zum Erdreich berücksichtigt werden. Der **mittlere Temperaturunterschied in K** für die erdverlegte Rohrleitung berechnet sich aus der Differenz zwischen der mittleren Betriebsmitteltemperatur  $T_{B,m}$  (oder Betriebsmitteltemperatur nach Auslegung  $T_B$ ) und der mittleren Bodentemperatur  $T_{Bo}$  wie folgt:

$$\Delta T_{L,m} = T_{B,m} - T_{Bo} = \frac{T_{VL,m} + T_{RL,m}}{2} - T_{Bo}$$

Der **jährliche Wärmeverlust für einen Teilstrang in kWh/a** berechnet sich aus dem spezifischen Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung, dem mittleren Temperaturunterschied für die erdverlegte Rohrleitung, der Länge des Trassenabschnittes und der jährlichen Betriebszeit des Netzes wie folgt:

$$Q_{V,a,i} = \frac{\dot{q}_{V,L} \Delta T_{L,m} L}{1000} \tau_N$$

Der **jährliche Wärmeverlust der Wärmeverteilung in kWh/a** berechnet sich aus der Summe der Wärmeverluste der einzelnen Teilstränge:

$$Q_{V,a} = \sum_{i=1}^n Q_{V,a,i}$$

Die **jährlichen Wärmeverluste** werden ebenfalls auf die jährlich ins Netz eingespeiste Wärmemenge bezogen und in Prozent angegeben:

$$q_{V,a} = \frac{Q_{V,a}}{Q_{N,ZU,a}} 100\%$$

## 4.8 Temperaturabfall in Funktion der Distanz

In thermischen Netzen mit Vor- und Rücklauftemperaturen höher als die relevante Umgebungstemperatur (Bodentemperatur), führen die Wärmeverluste in den Leitungen zu einer Abkühlung des Wärmeträgermediums entlang der Transportdistanz. Bei Vor- und Rücklauftemperaturen tiefer als die relevante Umgebungstemperatur (Bodentemperatur), führen die Wärmeverluste in den Leitungen zu einer Aufwärmung des Wärmeträgermediums. Dieser Effekt ist in beiden Fällen umso grösser, je grösser die Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums zur relevanten Umgebungstemperatur ist.

Für den Netzbetreiber ist insbesondere der Temperaturabfall oder -anstieg der Vorlaufleitung von Interesse, da er eine vertraglich vereinbarte Vorlauftemperatur beim Kunden garantieren muss. Die Temperaturdifferenz vom Einspeisepunkt bis zum weitest entfernten Kunden berechnet sich vereinfacht auf Basis der Gleichung für den Wärmestrom wie folgt:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} c_{pW}}$$

Durch Einsetzen des Wärmeverluststroms für die Vorlaufleitung in jedem Teilstrang und Berücksichtigung des darin fließenden Massenstroms ergibt sich der Temperaturabfall in der Vorlaufleitung in diesem Teilstrang als:

$$\Delta T_A = \frac{\dot{Q}_V}{2 \dot{m} c_{pW}}$$

Eine genauere Berechnung der Abkühlung oder Erwärmung der Vorlauftemperatur in Funktion der Distanz für einen erdverlegten Teilstrang ergibt folgende Gleichung [163]:

$$T_{VL,i,1} = T_{Bo} + (T_{VL,i,0} - T_{Bo}) e^{-\frac{U_R 2 \pi r_R L}{c_{pW} \dot{m}}}$$

Die Vorlauftemperatur am Eintritt des Teilstranges  $T_{VL,i,0}$  wird dabei als konstant angenommen.

Der Temperaturabfall im Teilstrang der Vorlaufleitung kann folgendermassen berechnet werden:

$$\Delta T_{A,i} = T_{VL,i,0} - T_{VL,i,1}$$

$$\Delta T_{A,i} = T_{VL,i,0} - \left[ T_{Bo} + (T_{VL,i,0} - T_{Bo}) e^{-\frac{U_R 2 \pi r_R L}{c_{pW} \dot{m}}} \right]$$

Die Abkühlung des Wärmeträgers in der Vorlaufleitung für eine bestimmte Transportdistanz berechnet sich aus der Summe der einzelnen Temperaturabfälle in den zu betrachtenden Teilsträngen wie folgt:

$$\Delta T_{A,Ges} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{A,i}$$

Die Vorlauftemperatur am Ende der betrachteten Teilstränge berechnet sich aus der Differenz zwischen der Vorlauftemperatur an der Einspeisestelle und der Abkühlung in der Vorlaufleitung für die gesamte Transportdistanz wie folgt:

$$\Delta T_{VL} = T_{VL,0} - \Delta T_{A,Ges}$$

## 4.9 Druckverlust

Die Strömungsverluste in Rohrleitungsanlagen setzen sich zusammen aus den Druckverlusten der geraden Leitungsabschnitte und der Summe aus Einzelverlusten, die aus Rohrleitungseinbauten wie Krümmer, T-Stücke, Querschnittsveränderungen, Wärmeübertrager, Armaturen und sonstigen Apparaten herrühren [164].

### 4.9.1 Gerade Rohrleitungen

Der Druckverlust durch Rohrreibung für gerade Rohrleitungsstücke wird folgendermassen bestimmt:

$$\Delta p_v = \lambda \frac{l}{d_R} \rho_w \frac{w_m^2}{2}$$

Anhand von gängigen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten  $w_m$  in Rohrleitungen von thermischen Netzen kann grundsätzlich eine turbulente Rohrströmung im Übergangsbereich vorausgesetzt werden (siehe Bild 4.46).

Der Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung  $\lambda$  ist somit abhängig von der dimensionslosen Reynolds-Zahl und der Rauheit des Rohres. Die Rohrrauheit  $k$  für verschiedene Rohre und Rohrwerkstoffe zeigt Tabelle 4.17. Als Richtwert für Rohrleitungen in thermischen Netzen wird ein Wert von  $\leq 0.01$  mm empfohlen [165].

Die Reynolds-Zahl  $Re$  ist wie folgt definiert:

$$Re = \frac{w_m d_R}{\nu}; Re > 2320 \rightarrow \text{turbulente Strömung}$$

Ab einer Reynolds-Zahl grösser als 2320 schlägt die laminare Strömung in eine turbulente um.

Mit der Reynolds-Zahl  $Re$ , dem Innendurchmesser  $d_R$  und der Rohrrauheit  $k$ , kann in einem Moody-Diagramm (Colebrook-Diagramm) der Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung  $\lambda$  für einen Leitungsabschnitt herausgelesen werden (siehe Bild 4.46).

Für die rechnerische Bestimmung des Rohrwiderstandsbeiwert  $\lambda$  im Übergangsbereich wird folgende Gleichung empfohlen [164]:

Gültigkeitsbereich:

$$\frac{d_R}{k} \log\left(0.1 \frac{d_R}{k}\right) < Re < 400 \frac{d_R}{k} \log\left(3.715 \frac{d_R}{k}\right)$$

Näherungsformel:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{15}{Re} + \frac{k}{3.715 d_R}\right)\right]^2}$$

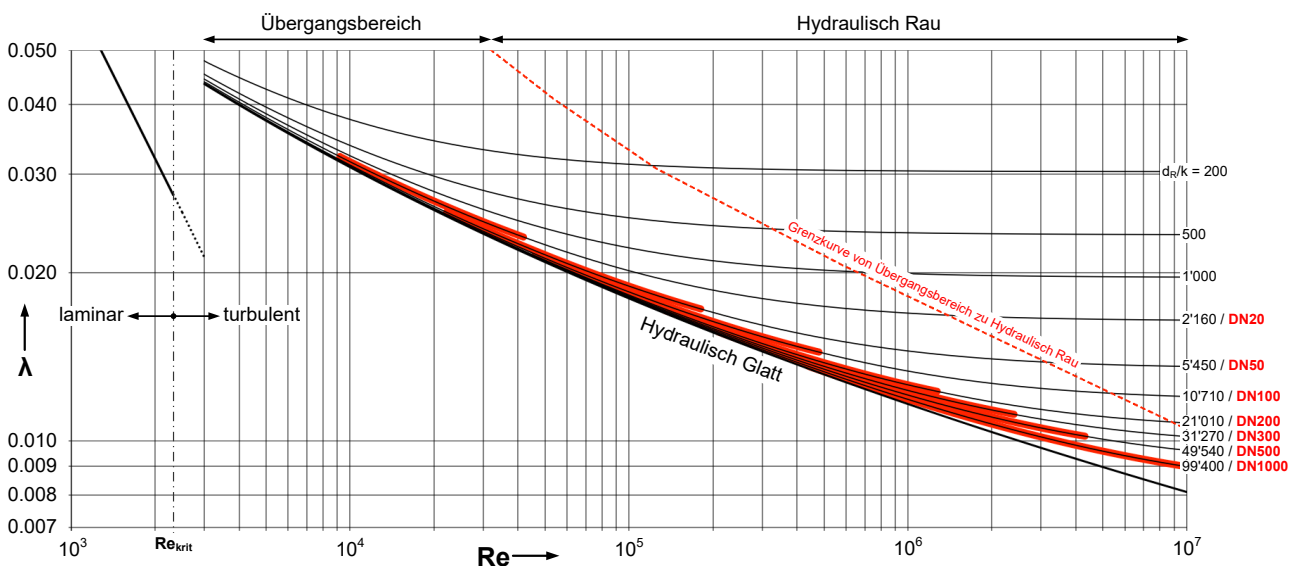


Bild 4.46 Moody-Diagramm (Colebrook-Diagramm) für den Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung  $\lambda$  in Abhängigkeit der Reynoldszahl  $Re$ . Rot hervorgehoben sind Nennweiten DN20 bis DN1000 und der entsprechende Bereich von Rohrwiderstandsbeiwert  $\lambda$  und Reynoldszahl  $Re$  bei einer Rohrrauheit  $k$  von 0.01 mm und bis zu einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit gemäss [29].

Tabelle 4.17 Rohrrauheit  $k$  in mm für verschiedene Rohre und Rohrwerkstoffe [166]

| Werkstoff                                           | Art                                                                                                 | Zustand                                                | k-Wert        |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------|
| Kupfer<br>Messing<br>Bronze<br>Leichtmetall<br>Glas | gezogen oder gepresst                                                                               | neu (auch Stahlrohre mit angegebenem Werkstoffüberzug) | 0.0013-0.0015 |
| Gummi                                               | Druckschlauch                                                                                       | neu                                                    | 0.0016        |
| Kunststoff                                          |                                                                                                     | neu                                                    | 0.0015-0.007  |
| Stahl                                               | nahtlos<br>(handelsüblich)                                                                          | neu                                                    |               |
|                                                     |                                                                                                     | - Walzhaut                                             | 0.02-0.06     |
|                                                     |                                                                                                     | - gebeizt                                              | 0.03-0.04     |
|                                                     |                                                                                                     | - verzinkt                                             | 0.07-0.10     |
|                                                     | längsnahtgeschweisst                                                                                | neu                                                    |               |
|                                                     |                                                                                                     | - Walzhaut                                             | 0.04-0.10     |
|                                                     |                                                                                                     | - bitumiert                                            | 0.01-0.05     |
|                                                     | - galvanisiert                                                                                      | 0.008                                                  |               |
| nahtlos und längsnahtge-<br>schweisst               | gebraucht                                                                                           |                                                        |               |
|                                                     | - mässig verrostet bzw. leicht verkrustet                                                           | 0.1-0.2                                                |               |
|                                                     | empfohlener <b>Richtwert</b> für die Berechnung des Druckverlustes in Fern-<br>wärmeleitungen [165] |                                                        | <b>0.01</b>   |
| Gusseisen                                           |                                                                                                     | neu                                                    |               |
|                                                     |                                                                                                     | - mit Gusshaut                                         | 0.2-0.6       |
|                                                     |                                                                                                     | - bitumiert                                            | 0.1-0.2       |
|                                                     |                                                                                                     | gebraucht                                              | 0.5-1.5       |
| Faser-Zement                                        |                                                                                                     | neu                                                    | 0.03-0.1      |
| Beton                                               |                                                                                                     | neu                                                    |               |
|                                                     |                                                                                                     | - sorgfältig geglättet                                 | 0.1-0.2       |
|                                                     |                                                                                                     | - Glattstrich                                          | 0.3-0.8       |
|                                                     |                                                                                                     | - mittelrau                                            | 1-2           |
|                                                     |                                                                                                     | - rau                                                  | 2-3           |

## 4.9.2 Druckverlust von Wellrohren

Der Rohr widerstandsbeiwert der Rohrströmung  $\lambda$  für ein Wellrohr (Bild 4.47) ist im laminaren Bereich ähnlich wie beim glatten Rohr, umgekehrt proportional zur Reynolds-Zahl. Angaben zu  $\lambda$ -Beziehungen in turbulenten Strömungen sind in der Literatur selten zu finden. Vor allem ist die Re-Abhängigkeit nicht im gesamten technisch relevanten Bereich gesichert. Für den folgenden Gültigkeitsbereich gilt nach [167] folgender Ansatz:

Gültigkeitsbereich:

$$5 \cdot 10^4 < \text{Re} < 3 \cdot 10^5$$

$$0.2 < \frac{h}{a} < 0.6$$

$$0.0455 < \frac{h}{d} < 0.0635$$

Näherungsformel:

$$\lambda = 3400 \left( \frac{h}{d} \right)^{4.13} \left( \frac{h}{a} \right)^{2.30} \left( \frac{h}{d} \right)^{-0.7} \text{Re}^{0.193} e^{\left[ -3300 \left( \frac{h}{d} \right)^{2.6} \frac{h}{a} \right]}$$

Einen vereinfachten Ansatz ergibt sich nach [167] für folgenden Gültigkeitsbereich:

Gültigkeitsbereich:

$$\text{Re} = 5 \cdot 10^4$$

$$0.2 < \frac{h}{a} < 1.2$$

Näherungsformel:

$$\lambda = 0.2 \left( \frac{h}{d} \right)^{0.6} \left( \frac{a}{h} \right)^{0.7}$$

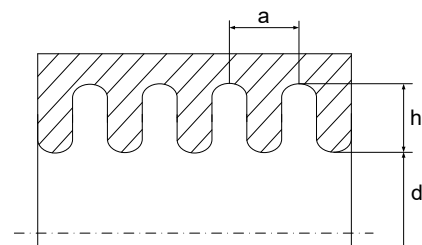


Bild 4.47 Schnitt durch ein Wellrohr mit den für die Berechnung des Rohr widerstandes notwendigen Abmessungen.

Typisch für die turbulente Strömung in Wellrohren ist das Anwachsen der Rohr widerstandsbeiwerte  $\lambda$  bei  $\text{Re} > 4 \times 10^4$ . Diese Erscheinung wird auf das Ausbilden unterschiedlicher Wirbelformen (Primär- und Sekundärwirbel) in den Wandausstülpungen zurückgeführt. Herstellungsbedingt haben die gewellten Rohre in der Regel die Form eines Gewindes. Dadurch wird dem

Medium neben der Axial- zusätzlich eine Rotationsbewegung aufgeprägt. Dieser Einfluss auf das Widerstandsverhalten ist jedoch nur gering. Für den Wärmeübergang ist die Intensität der Rotation allerdings bedeutend, da sie „Totwasserzonen“ in den Rillen verhindern kann [167].

Bei identischen Reynolds-Zahlen weisen Wellrohre einen weitaus grösseren Rohrwiderstandsbeiwert  $\lambda$  auf (Faktor 2- bis 15-mal grösser) als glatte Rohre. Damit der spezifische Druckverlust pro Trassenmeter nicht zu hoch ausfällt, müssen Wellrohre vielfach um ein bis zwei Nennweiten grösser ausgelegt werden als glatte Rohre.

### 4.9.3 Druckverlust von Rohrleitungseinbauten

Einbauten wie Krümmer, T-Stücke, Querschnittsveränderungen, Wärmeübertrager und sonstige Apparate erzeugen im Verteilnetz zusätzliche Druckverluste. Grundsätzlich ist die Rohrströmung nach Einbauten bei turbulenter Strömung auf einer Länge von 10 bis 30 mal der Durchmesser gestört, wodurch sich zusätzlich zu den Druckverlusten in der anschliessenden Rohrleitung weitere Druckverluste ergeben.

Für den Druckverlust in Rohrleitungseinbauten gilt folgende Gleichung:

$$\Delta p_v = \zeta \rho_w \frac{w_m^2}{2}$$

Für den Zusammenhang zwischen dem Widerstandsbeiwert für Einbauten  $\zeta$  und dem Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung  $\lambda$  für einen Leitungsabschnitt gilt:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d_R}$$

Im  $\zeta$ -Wert von Einbauten sind alle Verluste enthalten, die sich durch den Einbau einer Armatur gegenüber den Verlusten der geraden Rohrleitung ergeben.

Je nachdem ist es manchmal hilfreich die  $\zeta$ -Werte wie folgt in eine äquivalente Rohrleitungslänge gleichem Strömungswiderstand umzurechnen.

$$l_{\text{äqu}} = d_R \frac{\zeta}{\lambda}$$

Auf eine detaillierte Herleitung und Auflistung der Berechnungsgleichungen sowie Tabellenangaben von  $\zeta$ -Werten für diverse Rohrleitungseinbauten wird hier verzichtet. Zur Abschätzung empfehlen sich folgende Literaturquellen: Glück [163], Wagner [166] und Böswirth [164] sowie in Englisch von Idelchik [168].

In der Ausführungsplanung wird empfohlen die Herstellerangaben der jeweiligen Einbauten zu benutzen.

## 4.10 Rohrstatik

Dieser Abschnitt enthält Berechnungsgrundlagen, Hinweise und Auslegungsmerkmale zur Bewertung der Festigkeit und zur korrekten Auslegung von Leitungen und Leitungsbestandteilen. In die Betrachtung einbezogen sind Leitungen der Wärmeverteilung und verbindende Leitungen von Anlagen. Dargestellt sind grundlegende Zusammenhänge und Methoden zur Festigkeitsberechnung von Leitungen und zur Berechnung wärmebedingter Spannungen, sowie einige Hilfsmittel und Diagramme zur Gestaltung von Rohrhalterungen und Dehnungsausgleichen. Es wird auf Aspekte der Verletechnik eingegangen, um die statische Auslegung erdverlegter Leitungen bewerten zu können.

Auf eine umfassende Darstellung und Herleitung der statischen Festigkeitsberechnung und den statischen Nachweis einer Fernwärmeleitung, insbesondere für die am häufigsten eingesetzten erdverlegten starren Rohrsysteme (KMR), kann in diesem Planungshandbuch aus Platzgründen nicht eingegangen werden. Dafür wird explizit auf einschlägige Dokumente wie die Merkblätter von AGFW (FW 401 [121], FW 410 [169] und FW 411 [170]) oder auf Normen wie die SN EN13941 [171] verwiesen.

### 4.10.1 Grundlagen der Rohrstatik

Die Berechnung und Dokumentation der Rohrstatik zielt darauf ab, die Leitungen so zu installieren, zu dämmen und zu betreiben, dass keine Beschädigungen durch Bewegungsbehinderungen auftreten. Dadurch soll eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahre bei erdverlegten respektive 80 Jahren bei frei verlegten Leitungen sichergestellt werden. Die Verantwortung für die sachgemäße Ausführung und den regelkonformen Betrieb von Druckgeräten und damit auch Verteilleitungen, liegt beim Anlagenbetreiber. Ihm obliegt es im Projektablauf bei der Errichtung eines (Wärme)Verteilnetzes den statischen Nachweis einzufordern.

Das Wissen, wie mit der Längenausdehnung der Rohre umgegangen werden muss, hat direkte Auswirkungen auf die Trassenplanung (siehe unter Kapitel 4.5.2). Dabei sollte sich der Planer über folgende Fragen im Klaren sein:

- Was macht die Leitung bei Erwärmung?
- Wie kann die Längsdehnung aufgefangen werden?
- Was ist Vorspannung und was bewirkt sie?

Eine Leitung dehnt sich bei **Erwärmung** ab einem Festpunkt in beide Richtungen aus, diese Dehnung muss in irgendeiner Weise aufgefangen werden (Bild 4.48).



Bild 4.48 Schematische Darstellung der thermischen Ausdehnung (nach [172]).

Die Aufnahme der **Längsdehnung** erfolgt auf natürlichem Weg über Dehnschenkel (L-, Z- oder U-Bogen), bei Freileitungen können auch Kompensatoren zum Einsatz kommen.

Mit der **Vorspannung** wird die Längenausdehnung der Rohre unter Betriebszustand reduziert. Dadurch können zum Beispiel Dehnschenkel verkleinert und die Anzahl reduziert werden. Unterschieden wird dabei zwischen einer thermischen und einer mechanischen (Kalt-)Vorspannung.

Die folgenden Kapitel bieten einen Einblick in die physikalischen Grundlagen sowie Lösungsansätze für die Verlegung. Sie dienen dazu, sich grundsätzliche rohrstatische Zusammenhänge vorstellen zu können und um einfache Fragestellungen der Rohrstatik selbst bearbeiten zu können.

**Hinweis:** Die folgenden Erläuterungen über die Rohrstatik beziehen sich auf die im Fernwärmeleitungsbau gebräuchlichen Stahlsorten P235TR1, P235TR2 und P235GH (St. 37.0 bzw. St. 35.8). Für PE- oder PEX-Mediumrohr gelten, trotz rund 20-fachem Wärmeausdehnungskoeffizient, andere Voraussetzungen und werden am Ende des Kapitels behandelt.

#### 4.10.1.1 Druckfestigkeit und Wandstärke

Der folgende Abschnitt widmet sich der vereinfachten Berechnung der alleine durch den Druck in Behältern oder Rohren auftretenden Spannungen und die daraus resultierenden erforderlichen Wandstärken. Diese vereinfachte Berechnung ermöglicht bereits eine Bewertung oder Ermittlung von Spannungen und Wandstärken mit meist verlässlichen Ergebnissen für die Projektierung beziehungsweise groben Auslegung eines Behälters oder Rohres.

Die Berechnung der Druckfestigkeit und der Wandstärken von zylindrischen Behältern und Rohren erfolgt über die Betrachtung des mehrachsigen Spannungszustandes. Dieser besteht im Falle einer Zylinderform aus der Überlagerung von Längs-, Umfangs-, und Radial- bzw. Innendruckspannungen. Hergeleitet aus Festigkeitshypothesen erfolgt die Berechnung von Vergleichsspannungen in vereinfachter Form. Damit wird die Berechnung eines komplexen Spannungszustandes auf leicht anwendbare Beziehungen reduziert.

Die Festigkeitsberechnung erfolgt dabei nach dem Schema gemäss Bild 4.49. Der linke Ast kann unter dem Begriff Beanspruchungsermittlung zusammengefasst werden, während der rechte Ast die Tragfähigkeitsermittlung zur Aufgabe hat. Die Verknüpfung beider Randbedingungen erfolgt unter der Forderung, dass die Beanspruchung im Bauteil die Tragfähigkeit des Werkstoffes nicht überschreitet [172].

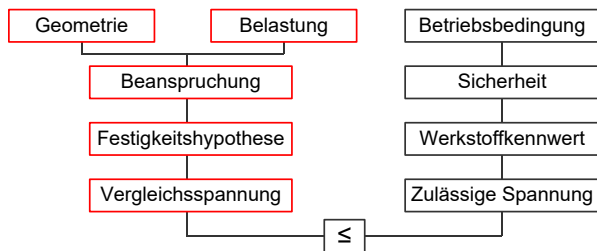


Bild 4.49 Berechnungsschema für die Festigkeitsberechnung nach [172]. Links: Beanspruchungsermittlung; Rechts: Tragfähigkeitsermittlung.

Die Festigkeitsbedingung ist gemäss Bild 4.49 durch den Vergleich der Vergleichsspannung  $\sigma_v$  nach der Schubspannungshypothese (SH) mit der zulässigen Beanspruchung  $\sigma_{zul}$  im Bauteil durch folgende Gleichung gegeben:

$$\sigma_v(SH) \leq \sigma_{zul}$$

Die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  nach der Schubspannungshypothese (SH) für Rohre und zylindrische Behälter, auch Kesselformel genannt, ist gegeben durch:

$$\sigma_v = \frac{p d_m}{2 s}$$

Die zulässige Beanspruchung  $\sigma_{zul}$  muss gewährleisten, dass die errechnete Spannung mit einer genügenden Sicherheit  $S$  unter dem entsprechenden Festigkeitskennwert des Werkstoffes ( $R_e$ ,  $R_m$ ) bleibt.

$$\sigma_{zul} = \frac{R_e}{S_e} = \frac{R_m}{S_m}$$

Tabelle 4.18 Gleichungen zur Berechnung der Rohr- bzw. Zylinderwandstärke  $s_v$  unter Innendruck ohne Zuschläge und Toleranzen bei vorwiegend ruhender Beanspruchung (nach [172]).

| Berechnungsvorschrift | Anwendungsgrenzen                                                    | Werkstoff-Beanspruchung u. Vergleichsspannung          | Berechnungsgleichungen mit                                                                        |                                                                                                   |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |                                                                      |                                                        | Aussendurchmesser                                                                                 | Innendurchmesser                                                                                  |
| SN EN 13480-3 [173]   | $d_a/d_i \leq 1.7$                                                   | vollplastisch Schubspannungshypothese (Mittelspannung) | $s_v = \frac{d_a p}{2 \sigma_{zul} v_N + p}$                                                      | $s_v = \frac{d_i p}{2 \sigma_{zul} v_N - p}$                                                      |
|                       | $d_a/d_i > 1.7$                                                      | Lame-Gleichung                                         | $s_v = \frac{d_a}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{zul} v_N - p}{\sigma_{zul} v_N + p}} \right)$ | $s_v = \frac{d_i}{2} \left( \sqrt{\frac{\sigma_{zul} v_N + p}{\sigma_{zul} v_N - p}} - 1 \right)$ |
| AD2000 [174]          | $d_a/d_i \leq 1.2$<br>(für $d_a \leq 200$ mm<br>$d_a/d_i \leq 1.7$ ) | vollplastisch Schubspannungshypothese (Mittelspannung) | $s_v = \frac{d_a p}{2 \sigma_{zul} v_N + p}$                                                      | $s_v = \frac{d_i p}{2 \sigma_{zul} v_N - p}$                                                      |
|                       | $1.2 \leq d_a/d_i \leq 1.5$                                          | elastisch<br>GE-Hypothese (Spitzenspannung)            | $s_v = \frac{d_a p}{2.3 \sigma_{zul} - p}$                                                        | $s_v = \frac{d_i p}{2.3 \sigma_{zul} - 3 p}$                                                      |

$v_N$  = Schweissnahtwertigkeit (bei nahtlosen Rohren =1, bei Schweissnähten je nach Ausführung 0.7-1)

Das Ergebnis einer berechneten Spannung einer Rohr- oder Zylinderwand gilt nur unter Berücksichtigung des Druckes als Ursache für Materialspannungen und unter Voraussetzung der Berücksichtigung der zulässigen Spannungen ( $\sigma_{zul}$ ) des jeweiligen Werkstoffes. Diese zulässigen Spannungen sind abhängig unter anderem von der minimalen und maximalen Betriebstemperatur

Übliche Sicherheitsfaktoren liegen bei:

- $S_e = 1.5$
- $S_m = 2.4$

Die Wandstärke  $s$  kann durch Umstellung der Kesselformel folgendermassen berechnet werden:

$$s = \frac{p d_m}{2 \sigma_v}$$

Die rechnerische Rohrwandstärke  $s_v$  kann auch nach Tabelle 4.18 berechnet werden.

Bei der Ermittlung der Bestellwandstärke sind die Fertigungstoleranzen und die durch Korrosion hervorgerufene Abnutzung durch entsprechende Zuschläge ( $c_1$ ,  $c_2$ ) zu berücksichtigen. Die aufzuführende Mindestwandstärke  $s$  beträgt somit:

$$s = s_v + c_1 + c_2$$

Die Bestellwandstärke  $s_e$  ergibt sich damit zu:

$$s_e \geq s$$

In [172] sind vertiefte Angaben zur Berechnung und weitere Informationen bezüglich der Sicherheitszuschläge zu finden.

und von der Wandstärke. So verkleinert sich die zulässige Spannung in metallischen Werkstoffen mit gegenüber Umgebungstemperaturen zunehmenden Temperaturen und mit zunehmenden Wandstärken. Ein typischer Rohrleitungswerkstoff P235GH (Werkstoffnummer 1.0345, frühere Bezeichnung St35.8 oder auch Kesselblech H11), hat eine zulässige Spannung bei Raumtemperatur von 235 N/mm<sup>2</sup> bei Wandstärken

< 16 mm. Bei Wandstärken von 40 bis 60 mm liegt die zulässige Spannung bei Raumtemperatur bei lediglich 215 N/mm<sup>2</sup>. Bei einer Temperatur von 100°C beträgt die zulässige Spannung noch bei 198 N/mm<sup>2</sup> und bei 200°C noch 170 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.10.1.2 Biegespannung bei Rohren

Die Berechnung der Biegespannung  $\sigma_B$  bei Rohren erfolgt durch folgenden Zusammenhang:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_B}$$

Das Biegemoment  $M_B$  muss je nach Belastungsfall individuell beurteilt und berechnet werden. Das Widerstandsmoment  $W_B$  für eine Hohlwelle bzw. Rohr berechnet sich folgendermassen:

$$W_B = \frac{\pi (d_a^4 - d_i^4)}{32 d_a}$$

#### 4.10.1.3 Wärmedehnung und Wärmespannung

Ein einseitig fixiertes Bauteil Bild 4.50 dehnt sich bei Erwärmung von der Anfangstemperatur  $T_0$  auf die Endtemperatur  $T_1$  um den Betrag  $\Delta L$ .

$$\Delta L = L \alpha_L \Delta T$$



Bild 4.50 Längendehnung eines einseitig eingespannten Bauteils (nach [172]).

Wird die Wärmedehnung behindert, entstehen Spannungen (Bild 4.51). Ursache der Behinderung kann eine fixe Einspannung, unterschiedliche Temperaturen an verschiedenen Orten im Bauteil oder ungleichmässige Ausdehnungskoeffizienten im Bauteil sein.



Bild 4.51 Längendehnung eines beidseitig eingespannten Bauteils (nach [172]).

Die Stauchung oder Dehnung ist definiert als:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Die Spannung im Bereich des Hookschen-Gesetzes (elastischer Bereich) ist proportional zu den Dehnungen beziehungsweise Stauchungen. Es ergibt sich mit dem Proportionalitätsfaktor  $E$  (E-Modul) folgender Zusammenhang:

$$\sigma = \varepsilon E$$

Die maximal zulässigen Werte der Spannung ergeben sich aus dem eingesetzten Material des Bauteils und der im Einsatz herrschenden Temperaturen. Die im Einsatz erzeugte Spannung bei maximaler Temperaturdifferenz darf die maximal zulässige Spannung nicht überschreiten.

$$\sigma_T < \sigma_{zul}$$

Die Spannung bei maximaler Temperaturdifferenz ergibt sich aus:

$$\sigma_T = \varepsilon E = \frac{\Delta L}{L} E = E \alpha_L \Delta T$$

Die maximale Temperaturdifferenz ist dabei:

$$\Delta T_{zul} = \frac{\sigma_{zul}}{E \alpha_L}$$

Tabelle 4.19 Längenausdehnungskoeffizient  $\Delta L$  und E-Modul  $E$  einiger Werkstoffe.

| Material          | Längenausdehnungskoeffizient           | E-Modul                           |
|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
|                   | 10 <sup>-6</sup> / K                   | 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> |
| Stahl unlegiert   | 12.0                                   | 210                               |
| Stahl hochlegiert | 10.0 (ferritisch), 16.7 (austenitisch) | 200                               |
| Kupfer            | 16.5                                   | 100-130                           |
| Aluminium         | 23.0                                   | 70                                |
| Grauguss          | 9.0                                    | 90-145                            |

#### 4.10.1.4 Überlagerung von Spannungen

Für eine rohrstatische Auslegung und einen statischen Nachweis müssen alle einwirkenden Spannungen und deren Überlagerungen in die Berechnung mit einbezogen werden. Es genügt also nicht, eine Rohrwand oder Behälterwand einzig auf die Festigkeit bedingt durch den Druck auszulegen, sondern es müssen alle überlagerten Spannungen aus Biegung, Torsion, Knickung, Wärme und deren wechselseitigen Wirkungen in den statischen Nachweis integriert werden. Für die Berechnung und Bewertung weiterer Spannungsarten wie zum Beispiel Knick-, Torsions-, Abscher- und Wärmespannungen wird auf [172] verwiesen.

Zu den ermittelten Spannungen unter Grenzlastbedingungen kommt für eine Bewertung der Statik die zeitliche Verteilung der Belastung hinzu. Die Belastung eines Bauteiles (Rohres) kann statisch (ruhend) oder dynamisch (wechselnd) sein. Ein Werkstoff weist gewöhnlich bei dauerhaft gleichbleibender statischer Belastung (zum Beispiel gleichbleibender Innendruck in einem Behälter) eine höhere Dauerfestigkeit auf, als bei wechselnder Belastung (Druckschwankungen) und bei schwingender Belastung (Wechsel Zugspannung – Druckspannung). Eine hohe Lastwechselzahl führt zur Festigkeitsminderung.

Gerade bei Fernwärmleitungen und -anlagen muss durch Temperaturschwankungen mit entsprechenden

Lastwechselzahlen gerechnet werden. Als ein Lastwechsel versteht sich dabei zum Beispiel ein Aufheiz- und Abkühlvorgang im Temperaturbereich zwischen minimaler und maximaler Betriebstemperatur. Für die statische Berechnung einer Leitung muss als Berechnungsgrundlage die Lastwechselzahl mit einbezogen werden. So haben Leitungen, die saisonal ausser Betrieb genommen werden wesentlich höhere Lastwechselzahlen als Leitungen, die nur geringe leistungsbedingte Temperaturschwankungen aufweisen.

#### 4.10.1.5 Statischer Nachweis

Wie oben beschrieben sind für den statischen Nachweis alle sich überlagernden mechanischen Beanspruchungen miteinzubeziehen. Daher kann sich ein statischer Nachweis sehr aufwändig gestalten. Berechnungsprogramme wie sie in der Tabelle 4.20 aufgeführt sind, ermöglichen je nach Anwendungszweck einen umfänglichen statischen Nachweis.

Wegen der Komplexität und der erforderlichen Qualität rohrstatischer Berechnungen ist eine umfängliche Anwendungspraxis zur zielgerichteten Bearbeitung hilfreich. Somit wird der statische Nachweis häufig durch Institutionen und Personen erbracht, welche die entsprechenden Kenntnisse und Erfahrungen in Festigkeitslehre und Statik mitbringen.

Das Ergebnis der statischen Berechnungen für Rohrleitungen beinhaltet folgende Punkte:

- Definition des betrachteten Rohrleitungsabschnittes.
- Bezugnahme auf die Eignung des gewählten Werkstoffes.
- Nachweis der Einhaltung werkstoffbedingter Spannungsgrenzwerte für den betrachteten Rohrleitungsabschnitt im Rahmen der betrieblichen Temperaturen.
- Nachweis Grenzwerteinhaltung unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Lastwechselzahlen.
- Nachweis der Statik der Leitungshalterung.
- Angabe der dreiachsigen Spannungen und Momente für alle Elemente des betrachteten Rohrabschnittes.

- Statischer Nachweis der Rohrleitungshalterung (Festpunkte, Loslager).

Bei erdverlegten Kunststoffverbundmantelrohre (KMR) kommen folgende Punkte hinzu (siehe auch 4.10.4):

- Belastung des Dämmmaterials (PUR-Schaum) und der PE-Ummantelung.
- Eignung und Dimensionierung der Kompensations Elemente wie Dehnpolster.

Aus den Ergebnissen der statischen Berechnungen können sich bei Grenzwertverletzungen folgende Massnahmen ergeben:

- Wandstärken der Rohrelemente, Bögen, T-Stücke, Anbohrungen anpassen.
- Überbelastung eines Rohrelementes durch Anpassung der geometrischen Anordnung entschärfen.
- Positionierung von Festpunkten und anderen Halterungspunkten anpassen.

Nach Korrektur der Gestaltung und Auslegung des Rohrleitungsabschnittes und nach erneuter Überprüfung der Statik in korrigierter Anordnung kann nach Bereinigung aller Grenzwertverletzungen die statische Eignung des Rohrabschnittes nachgewiesen werden.

Tabelle 4.20 Übersicht spezieller Software für die rohrstatische Berechnung (Liste ist nicht abschliessend).

| Programm                             | Normabdeckung                               | Besonderheiten                                            |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| SIS-KMR                              | AGFW FW 401<br>DIN EN 13941                 | Spezialisiert auf KMR, Standard im deutschen Markt        |
| ROHR2 (Fernwärmemodul)               | DIN EN 13480<br>AGFW FW 401<br>DIN EN 13941 | Leistungsstark, FEM-Modul für schwierige Fälle            |
| SIMFLEX                              | AGFW FW 401<br>DIN EN 13941                 | Modular erweiterbar, intuitive Oberfläche                 |
| AUTOPIPE (mit Fernwärme-Zusatzmodul) | DIN EN 13480<br>DIN EN 13941                | Sehr gutes Reporting, Bentley-Ökosystem                   |
| START-PROF (Fernwärme-Version)       | AGFW FW 401<br>DIN EN 13941                 | Sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis, moderne Oberfläche |

### 4.10.2 Rohrstatistische Auslegungstemperatur

Massgebend für die Berechnung der Rohrstatik ist immer die rohrstatistische Auslegungstemperatur  $\Delta T_{RS}$ . Diese lässt sich aus der Auslegungstemperatur  $T_{Aus}$  und der Verlegetemperatur  $T_{Ver}$  folgendermassen berechnen:

$$\Delta T_{RS} = T_{Aus} - T_{Ver}$$

Für erdverlegte Rohrsysteme wird bei einer maximalen Betriebstemperatur unter 100°C eine Auslegungstemperatur  $T_{Aus}$  von 110°C empfohlen. Bei einer maximalen Betriebstemperatur über 100°C wird eine Auslegungstemperatur  $T_{Aus}$  von 130°C, jedoch mindestens 10°C über der Betriebstemperatur empfohlen.

Für frei verlegte Rohrsysteme wird eine Auslegungstemperatur in Abhängigkeit der Betriebstemperatur empfohlen. Die Auslegungstemperatur  $T_{Aus}$  beträgt dabei 10°C mehr als die maximale Betriebstemperatur.

Für die Verlegetemperatur bzw. die Aussentemperatur bei der Verlegung der Rohre können folgende Werte angenommen werden:

- Erdverlegt: Sommer: 20°C  
Frühling/Herbst: 10°C  
Winter: 0°C
- Freileitungen in Kellern, Einstellhallen und Gebäuden: generell 20°C

Anmerkung: Es wird nicht zwischen der Vorlauf- und Rücklauftemperatur unterschieden! Der Rücklauf wird bei der statischen Betrachtung gleich wie der Vorlauf behandelt.

### 4.10.3 Dehnungsaufnahme

Ein natürlicher Rohrdehnungsausgleich wird gewöhnlich einer Kompensation der Wärmedehnung durch Kompensatoren vorgezogen, vor allem wenn die Trassenführung ohnehin eine Geometrie aufweist, die einen natürlichen Dehnungsausgleich ermöglicht. Wichtig ist, dass die Rohre nach der Inbetriebnahme, also nach der Längenausdehnung, möglichst spannungsarm verlegt beziehungsweise montiert sind.

Bei erd- wie auch bei freiverlegten Rohren wird durch Richtungswechsel der Rohrleitungen ein natürlicher Dehnungsausgleich ermöglicht. Die dabei entstehenden Dehnschenkel erleichtern die elastische Verbiegung des Rohres, womit die Längenänderungen auf natürliche Weise kompensiert werden. Dehnschenkel beziehungsweise Dehnungsausgleicher werden als Winkelbogen (L-Bogen), doppelter Winkelbogen (Z-Bogen) und U-Bogen realisiert (Bild 4.53). Auf die spezifischen Gegebenheiten für erdverlegte Rohre wird in Kapitel 4.10.4 und für frei verlegte Rohre in Kapitel 4.10.5.4 eingegangen.

Die Winkellage der Dehnschenkel im Dehnungsbogen hat einen zusätzlichen Einfluss auf den Dehnbereich, der durch Dehnungspolster aufgenommen werden muss (Bild 4.52). Nach Möglichkeit sind die Bögen rechtwinklig auszuführen, da mit 90°-Bögen die Längsausdehnung am besten aufgenommen werden kann. Bei Bögen mit einem stumpfen Winkel ( $> 90^\circ$ ) vergrößert sich der Dehnbereich im Vergleich mit einem 90°-Bogen. Bögen mit einem spitzen Winkel ( $< 90^\circ$ ) sind generell nicht zu empfehlen.

Bei der Verlegung mit einer Thermischen-Vorspannung wird die Auswirkung der Dehnung entschärft. Bei Hochtemperatur-Systemen ist es fast unerlässlich die Leitungen (thermisch) vorzuspannen. Näheres zur Technik der Vorspannung wird in den Kapitel 4.10.4.4 und 4.10.5.3 beschrieben.

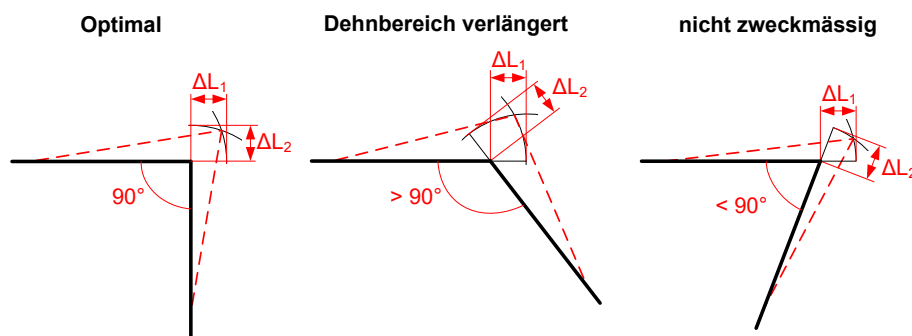


Bild 4.52 Beispielhafte Darstellung der Winkellage bei einem L-Bogen. Die thermisch bedingten Ausdehnungen  $\Delta L$  ( $\Delta L_1 = \Delta L_2$ ) sind bei den drei Fällen identisch.

## 4.10.4 Erdverlegte starre Leitungen

### 4.10.4.1 Übersicht Verlegemethoden

Aufgrund der bewährten Technik und langen Lebensdauer sind Kunststoffverbundmantelrohre (KMR) das am meisten eingesetzte Rohrsystem bei erdverlegten Fernwärmeleitungen.

Wie oben bereits erwähnt, wird durch Richtungswechsel der Rohrleitungen ein natürlicher Dehnungsausgleich mittels Winkelbogen (L-Bogen), doppelter Winkelbogen (Z-Bogen) und U-Bogen realisiert. Angenommen die Ausladelänge  $L_A$  (Schenkellänge) von den in Bild 4.53 dargestellten Arten der Dehnungsausgleichung sei bei allen drei Typen identisch, so zeigt der L-Bogen die kleinste und der U-Bogen die grösste Flexibilität zur Dehnungsaufnahme.

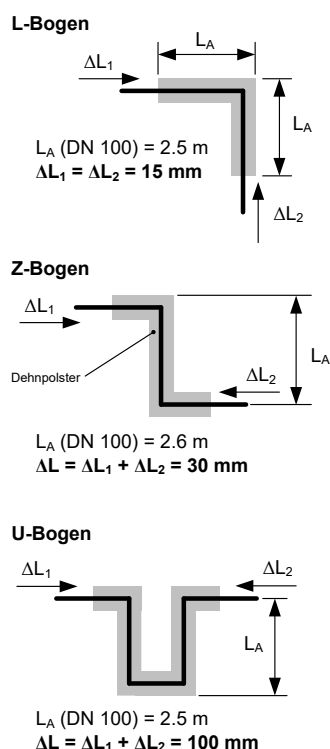


Bild 4.53 Beispielhafter Vergleich der maximal möglichen Dehnungsaufnahme bei identischen Ausladelängen  $L_A$  (Schenkellängen) gemäss Brugg Pipesystems (Premant DN 100).

Bei einer identischen Ausladelänge  $L_A$  von 2.5 m bzw. 2.6 m beträgt die maximal kompensierbare Rohrausdehnung  $\Delta L$  bei der Verlegung eines L-Bogens (ohne Fixpunkte) rund 15 mm, bei einem Z-Bogen lassen sich insgesamt 30 mm kompensieren ( $\Delta L_1 + \Delta L_2$ ) und bei einem U-Bogen lassen sich insgesamt 100 mm kompensieren ( $\Delta L_1 + \Delta L_2$ ). Damit zeigt ein U-Bogen zur Dehnungskompensation bei KMR-Leitungen die höchste Flexibilität.

Für die Beurteilung der Dehnschenkel und notwendigen Dehnpolsterlängen wird auf die im AGFW-Arbeitsblatt FW 401 [121] erstellten Ausführungen und Diagramme (Teil 10 und 11) sowie auf die herstellereigenen Angaben verwiesen.

Weiter zu beachten ist, dass bei KMR das Mediumrohr, das Dämmmaterial und das Mantelrohr eine fest miteinander verbundene Einheit bilden, das heisst, die Rohre dehnen sich als Ganzes. Dies hat zur Folge, dass durch die Überdeckung die Dehnung behindert wird. Die Behinderung der Dehnung führt zu einer Druckspannung der Stahlrohre, welche die zulässige Spannung von 190 N/mm<sup>2</sup> nicht überschreiten darf. Um dies zu gewährleisten, werden Verlegemethoden wie die Kaltverlegung Methode 1, Kaltverlegung Methode 2 oder Verlegung mit thermischer Vorspannung angewandt (Übersicht in Tabelle 4.21).

Tabelle 4.21 Übersicht, Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verlegemethoden für erdverlegte KMR-Leitungen.

| Verlegung               | Vorteil                                                                                                                                                | Nachteil                                                                                                                                                           |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kaltverlegung Methode 1 | Kaltverlegung<br>geringe Axialspannungen aus Wärmedehnung<br>Rohrgraben kann sofort verfüllt werden                                                    | maximale zulässige Betriebstemperatur $\leq 85^\circ\text{C}$                                                                                                      |
|                         | Konventionell<br>maximal zulässige Axialspannung wird nicht überschritten<br>Rohrgraben kann sofort wieder verfüllt werden                             | zul. Verlegelänge ist durch die Anordnung der notwendigen Dehnschenkel (L, Z, U) einzuhalten                                                                       |
| Kaltverlegung Methode 2 | Betriebliche Selbstvorspannung<br>Rohrgraben kann sofort verfüllt werden<br>Einsparung von Dehnungsschenkeln<br>eventuell auch im Gleitbereich möglich | extrem grosse Dehnungsbewegungen<br>Ausknickgefahr<br>Axialspannungen übersteigen die Streckgrenze des Materials<br>Nachtägliche Anbohrarbeitszweige nicht möglich |
| Thermische Vorspannung  | Begrenzung der Axialspannung<br>beliebige Verlegelänge<br>Geringe Axiale Dehnung<br>Einsparung von Dehnungsschenkel                                    | Rohrgraben muss bis zur Fertigstellung der Vorspannung offen gehalten werden.                                                                                      |

### 4.10.4.2 Kaltverlegung Methode 1

Mit dieser Methode wird die von den Herstellern vorgegebene maximale Verlegelänge nicht überschritten. Spätestens bei Erreichen dieser Länge wird ein Dehnungsbogen installiert, um die Dehnungen aufzunehmen. Etwa in der Mitte zwischen zwei Bogen entsteht somit ein natürlicher Fixpunkt (NFP), ab welchem sich die Leitungen in beide Richtungen ausdehnen (Bild 4.54). Die maximale Verlegelänge ist abhängig von der Auslegungstemperatur, der Rohrdimension sowie der Überdeckung.

**Hinweis:** Bei einer maximalen Betriebstemperatur von 85°C wird die zulässige Spannung von 190 N/mm<sup>2</sup> nie erreicht. Infolgedessen entfällt eine Beschränkung der Verlegelänge. Allerdings darf die statische Auslegung auch nicht höher als 85°C sein.

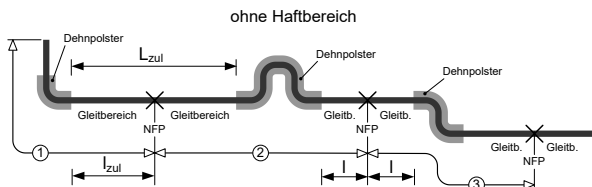


Bild 4.54 Beispiel Trasse mit natürlichen Festpunkten (NFP) und Dehnpolstern an Kompensationselementen nach AGFW-Merkblatt FW 401 [121] Teil 10

Die Kaltverlegung Methode 1 hat den Nachteil, dass relativ viele Formstücke in Form von Bögen verbaut werden müssen, was die Verlegung teuer macht. Andererseits sind Gehrungsnähte (3°-Knicke) und der nachträgliche Einbau von T-Stücken sowie Anbohrungen statisch unbedenklich.

Anwendung: Gebiete mit vielen Gefälls- oder Richtungsänderungen, Erschliessungsleitungen (Zweigleitungen), Hausanschlüsse.

#### 4.10.4.3 Kaltverlegung Methode 2

Hier handelt es sich um eine Kaltverlegung ohne Berücksichtigung der vorgegebenen maximalen Verlegelänge der Hersteller. Das Verfahren wird auch als ‚Betriebliche Selbstvorspannung‘ bezeichnet.

Mit der Inbetriebnahme wird die zulässige Streckgrenze von 235 N/mm<sup>2</sup> überschritten und die Rohre werden plastisch gestaucht. Dies hat einerseits zur Folge, dass grosse Dehnschenkel und Dehnpolsterstärken benötigt werden. Andererseits müssen die T-Abgänge verstärkt ausgeführt werden und Gehrungsnähte (3°-Knicke) sowie der nachträgliche Einbau von T-Stücken sowie Anbohrungen sind unzulässig.

Den oben erwähnten Nachteilen steht eine kostengünstigere Verlegung im Vergleich zur Kaltverlegung Methode 1 gegenüber.

Anwendung: Transportleitungen ausserhalb Siedlungs- respektive Versorgungsgebiet, Gebiete mit «endgültigen» Strukturen (zum Beispiel grosse Überbautungen, Genossenschaftssiedlungen), Hausanschlüsse etc.

#### 4.10.4.4 Thermische Vorspannung

Werden die Leitungen einer thermischen Vorspannung unterzogen, entfällt eine Beschränkung der Verlegelänge. Die zulässige Spannung wird nicht überschritten. In der Regel wird die fertig verlegte Leitung auf die Vorspanntemperatur  $T_{Vor}$  erwärmt. Die Vorspanntemperatur  $T_{Vor}$  entspricht der Verlegetemperatur  $T_{Ver}$  abzüglich der Hälfte der rohrrstatischen Auslegungstemperatur  $\Delta T_{RS}$  und berechnet sich wie folgt:

$$\Delta T_{Vor} = T_{Ver} + \frac{\Delta T_{RS}}{2} = T_{Ver} + \frac{T_{Aus} - T_{Ver}}{2} = \frac{T_{Aus} + T_{Ver}}{2}$$

Sobald die Leitung erwärmt ist und sich somit ausgedehnt hat, wird die Leitung eingesandet und der Graben verfüllt. Erst nach der Grabenverfüllung darf die Leitung wieder abgekühlt werden. Der Gleitbereich der Rohre ist relativ kurz und folglich auch die Dehnschenkel- und Dehnpolsterlängen (Bild 4.55).

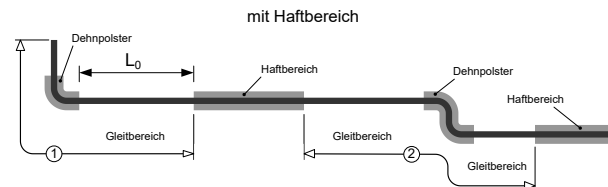


Bild 4.55 Beispiel Trasse mit Gleit- und Haftbereich und Dehnpolstern an Kompensationsbereichen nach AGFW-Merkblatt FW 401 [121] Teil 10.

Die thermische Vorspannung erfordert lange Bauetappen (> 100 m) und wirkt sich somit auf die Bauzeit aus. Gegenüber der Kaltverlegung ist der Leitungsbau aber kostengünstiger. Gehrungsnähte (3°-Knicke) und nachträgliche T-Stücke und Anbohrungen sind statisch unproblematisch.

Anwendung: Transportleitungen, Siedlungsgebiete mit wenigen Gefälls- oder Richtungsänderungen, Erschliessungsleitungen.

#### 4.10.4.5 Doppelrohre, Mehrfachrohre

Bei vorgefertigten und vorisolierten Mehrfachrohren oder Doppelrohren sind die Medienrohre an Bogen- und Endstellen miteinander fest verbunden. Dazwischen werden statisch nicht bedeutende Abstandhalter zwischen den Medienrohren eingesetzt. Aus rohrrstatischen Gründen hat dies zur Folge, dass die maximale Temperaturspreizung zwischen den einzelnen Medienrohren auf maximal 100 K begrenzt ist. Insbesondere beim Hochfahren aus ausgekühlten Anlagen muss diese maximale Temperaturspreizung berücksichtigt werden.

#### 4.10.5 Frei verlegte Leitungen

##### 4.10.5.1 Grundlagen

Frei verlegte Leitungen bezeichnen Leitungen in Kellern, Einstellhallen Energieleitungstunneln (ELT), Freileitungen im Gelände, Leitungen in Betonkanälen oder Stahlmantelrohre, welche statisch betrachtet ebenfalls frei verlegt sind.

Im Gegensatz zu erdverlegten Leitungen werden frei verlegte Leitungen in ihrer Längenausdehnung nur marginal durch Reibungsverluste der Rohrlager behindert. Die Ausdehnung  $\Delta L$  kann theoretisch beliebig gross sein, wenn die entsprechenden Massnahmen zur Dehnungsaufnahme vorhanden sind. Allerdings werden diese Massnahmen bei Dimensionen ab DN 100 sowie bei hohen Temperaturen zunehmend schwieriger zu handhaben. Zu beachten ist auch, dass sich die Leitungen in alle Richtungen bewegen können.

Für die Aufnahme der Längenausdehnung wird durch Richtungswechsel der Rohrleitungen ein natürlicher Dehnungsausgleich ermöglicht. Bei freiverlegten Rohrleitungen werden Dehnschenkel ebenfalls als Winkelbogen (L-Bogen), doppelter Winkelbogen (Z-Bogen) und U-Bogen realisiert (Bild 4.56).

Die Länge der Ausladelänge  $L_A$  ist gemäss [166] nicht nur von der Ausdehnung  $\Delta L$  bzw. der Hauptrohrlänge  $L$

abhängig, sondern nimmt auch mit zunehmender Rohrdimension da beziehungsweise der rohrstatischen Auslegungstemperatur  $\Delta T_{RS}$  zu. Das heisst: Je grösser die Ausdehnung  $\Delta L$  und Rohrdimension da ist, umso grösser werden die benötigten Dehnschenkel bzw. umso länger wird die Ausladelänge  $L_A$ .

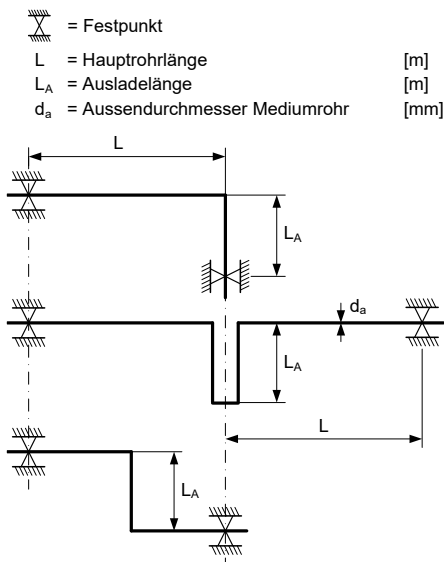


Bild 4.56 Typische Formen von Dehnschenkel frei verlegter Rohre (Darstellung nach [166]).

Bei frei verlegten Rohren kann für die überschlägige Berechnung der Ausladelänge  $L_A$  folgende Gleichung nach [166] verwendet werden:

$$L_A \approx \frac{\Delta T_{RS}}{64} \sqrt{L d_a}$$

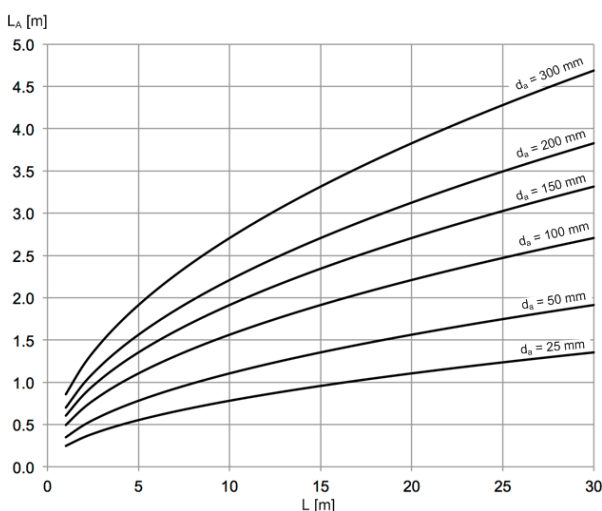


Bild 4.57 Dehnschenkelängen bei warmgehenden ferritischen und austenitischen Rohrleitungsstählen bei frei-, gebäude- oder kanalverlegten Rohrsystemen normiert auf einen maximalen Temperaturunterschied von 100°C (berechnet nach [166]).

Das Diagramm in Bild 4.57 gibt einen Anhaltspunkt zur Gestaltung der Dehnungsausgleicher für die oben aufgeführte Gleichung zur Bestimmung der Ausladelänge  $L_A$  bei frei-, gebäude- oder kanalverlegten Systemen

normiert auf einen maximalen Temperaturunterschied von 100°C. Die Ausladelänge  $L_A$  des Dehnschenkels kann anhand des Diagramms in Bild 4.57 für andere Temperaturen proportional umgerechnet werden.

Alternativen zum natürlichem Dehnungsausgleich für frei verlegte Systeme sind Lateral-, Axial- und Gelenk-Kompensatoren, die durch flexible Balgkomponenten eine gezielte Verformung aufnehmen können. Das AGFW-Merkblatt FW 411 [175] bietet Auslegungsgrundlagen für frei-, gebäude-, und kanalverlegte Systeme. Enthalten sind Tabellen und Diagramme zur statischen Auslegung bis zu einem Durchmesser DN 80. Für grössere Nennweiten muss der Nachweis für die Beanspruchung durch Wärmedehnung, durch das Eigengewicht und für die Belastung der Auflager, sowie der Nachweis für Festpunkte, Lager, Bögen, T-Abgänge, Anbohrungen, Dehnschenkel, Stützweiten erbracht werden. Grundlagen für die statische Berechnung liefern SN EN13941 [171], SN EN 13480 [173] und AD-2000 [174].

#### 4.10.5.2 Abstützung

Rohre werden zur Abstützung mit Rohrschellen versehen, welche mit der Decke, der Wand oder dem Boden verbunden und verankert werden. Je grösser die Rohrdimension, umso weniger Abstützungen werden benötigt. Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Typen von Rohrhalterungen, welche bei frei verlegten Systemen eingesetzt werden.

- **Festpunkte (Fixpunkte):** Für die Rohre ist keinerlei Bewegung in eine Richtung möglich. Die Festpunkte können bei grossen Dimensionen massive Ausmasse annehmen. Oft sind Spezialanfertigungen zu erstellen.
- **Gleitlager:** Die Rohre sind in der Lage, sich in Längsrichtung zu bewegen. Zusätzlich bleibt ein kleiner Spielraum für Querverschiebungen sowie nach oben/unten. Dieser Lagertyp kommt am häufigsten zum Einsatz.
- **Querdehnlager (Kreuzgleiter):** Die Rohre sind in der Lage, sich in Längs- und Querrichtung zu bewegen. Zusätzlich bleibt ein kleiner Spielraum für Verschiebungen sowie nach oben/unten. Dieser Lagertyp kommt im Bereich von Dehnschenkeln, wenn die Ausdehnung von zwei Seiten aufgenommen werden muss, zum Einsatz.
- **Führungslager:** Diese Lager sind spezielle Gleitlager, die ausschliesslich in Längsrichtung eine Bewegung zulassen. Notwendig sind Führungslager ausschliesslich beim Einsatz von Kompensatoren.

Im AGFW-Merkblatt FW 411 [175] wird eine Auswahl und Anordnung von Rohrleitungshalterungen von Stahlmediumrohren mit einer Wärmedämmung aus Faserdämmstoff beschrieben. Aufgeführt ist auch die geeignete Positionierung von Gleitlager im Bereich der Dehnungsausgleicher. Für erd- und freiverlegte Stahlmantelrohre gilt das AGFW-Merkblatt FW 410 [169].

Bei der Festlegung der Rohrleitungsunterstützungen sind aus verfahrenstechnischen Gründen der Durch-

biegung bereits enge Grenzen gesetzt und die durch das Eigengewicht resultierenden Rohrleitungsbeanspruchungen sind in der Regel gering. Für die festigkeitsmässige Beurteilung kann dafür ein vereinfachtes Nachweisverfahren, welches als Stützweitenkontrolle bezeichnet wird, angewendet werden. Wegen des Eigengewichts spielt es auch eine Rolle, ob die Leitungen mit Wasser oder Gas gefüllt sind oder ob sie isoliert sind. Für Stahlrohre mit Durchmesser von 50 mm bis 500 mm, einer Dichte des Durchflussmediums von  $1000 \text{ kg/m}^3$  und einem konstanten Wanddickenverhältnis von  $d_i/s \approx 30$  ergibt sich für die Stützweiten folgender Zusammenhang:

$$L \approx f \cdot d_i^{2/3}$$

$f = 0.3$  für leeres und ungedämmtes Rohr

$f = 0.23$  für gefülltes und ungedämmtes Rohr

$f = 0.2$  für gefülltes und etwas gedämmtes Rohr

Die Gleichung ist in Bild 4.58 dargestellt. Ab DN 500 bleibt die Stützweite zur Begrenzung der Spannung an der Auflagestelle konstant.

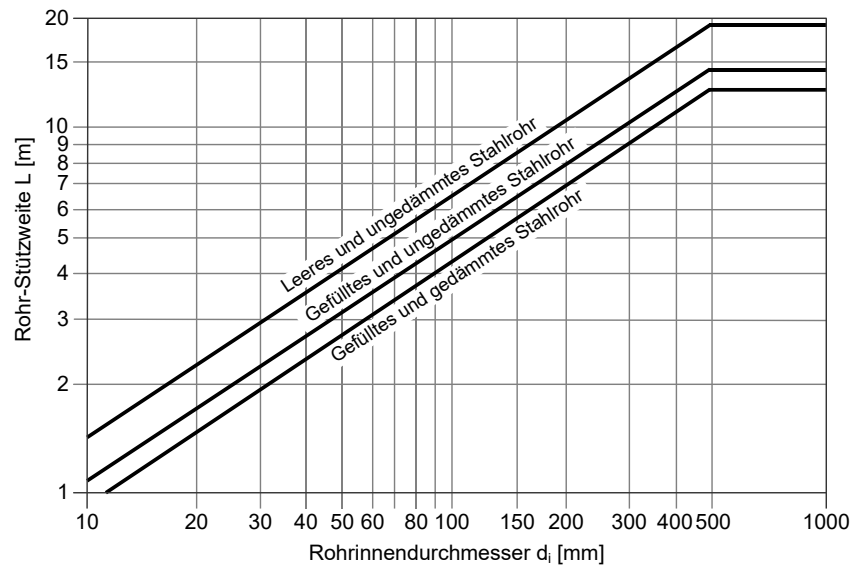


Bild 4.58 Richtwerte für die max. zulässige Rohr-Stützweite  $L$  in Abhängigkeit von der Leitungsführungsform und dem Stahlrohrinnendurchmesser  $d_i$  (Rohrleitungen im Gebäude nach [166]).

#### 4.10.5.3 Verlegung mit Vorspannung

Bei frei verlegten Rohren (innen wie auch aussen) empfiehlt es sich, Rohre ab DN 100 vorzuspannen. Zwischen DN 50 und DN 80 kann eine Vorspannung von Vorteil sein. Noch kleinere Dimensionen sind in der Regel genügend elastisch, so dass die Dehnungen problemlos aufgenommen werden können. Bei der Vorspannung von frei verlegten Rohren handelt es sich ausnahmslos um eine Kaltvorspannung, das heisst, dass die Rohrlängen zwischen den Dehnbereichen um das Vorspannmass gekürzt werden (Bild 4.59). Das Vorspannmass entspricht in der Regel der halben Längendeckung bei einer Temperaturdifferenz zwischen der Verlegetemperatur  $T_{Ver}$  und der Auslegetemperatur  $T_{Aus}$ .

Mit einer Kaltvorspannung lassen sich die Ausladelängen von Dehnschenkeln somit verkleinern. Die Verbindung der beiden Dehnschenkel bzw. das Verschweissen geschieht durch eine mechanische Vorspannung. Dabei wird ein Dehnschenkel soweit an den gekürzten Schenkel gepresst, bis der Spalt kompensiert ist und die beiden Enden miteinander verschweisst werden können.

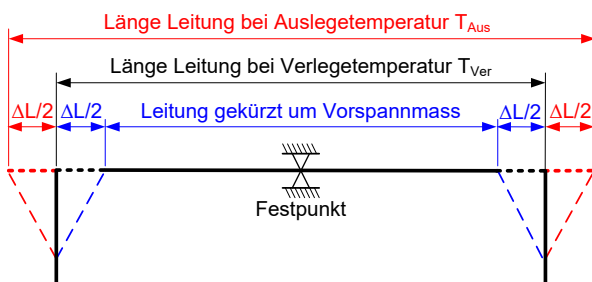


Bild 4.59 Schematische Darstellung der Kaltvorspannung bei Freileitungen im Bereich der Dehnschenkel (Vereinfachte Darstellung der Dehnung nur eines Dehnschenkels).

Reichen diese Massnahmen aufgrund der knappen räumlichen Verhältnisse nicht aus, um die Dehnungen aufzunehmen, kann mit dem Einsatz von Kompensatoren Abhilfe geschaffen werden, wobei auch diese Systeme vorgespannt werden.

**Hinweis:** Auf eine detaillierte Beschreibung von Kompensator-Systemen wird an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet. Da diese oft im Heisswasser- oder Dampfbereich eingesetzt werden, wird auf die Arbeitsblätter der AGFW FW 401 [121], FW 411 [175] und auf Spezialliteratur verwiesen.

#### 4.10.5.4 Kunststoffleitungen

Da Kunststoffrohre eine viel höhere Elastizität als Stahlrohre besitzen, sind sie selbstkompensierend, das heisst die Dehnung wird durch die Rohre selbst aufgefangen, indem sich der Durchmesser erweitert. Obwohl der Ausdehnungskoeffizient von PE rund 20 mal höher ist als von Stahl, muss die Ausdehnung verhindert werden. Bei erdverlegten Rohren ist dies aufgrund des Erddrucks problemlos möglich. Auf Dehnungskissen kann vollständig verzichtet werden. Bei frei verlegten PMR wird durch Festpunkte vor Bögen die Längsdehnung verhindert (Bild 4.60). Die Lager zwischen den Festpunkten dienen nur der Fixierung der Rohre. Gleitlager und Kompensatoren kommen bei Kunststoffrohren nicht zum Einsatz.

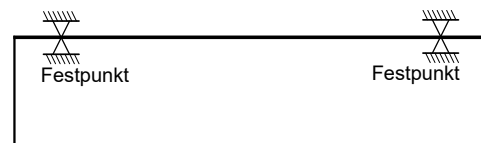


Bild 4.60 Anordnung der Festpunkte bei PMR vor Bögen bzw. Richtungsänderungen.

## 4.11 Empfehlungen zur Dimensionierung der Rohrleitungen

### 4.11.1 Grundlegende Entscheidungskriterien

Die Dimensionierung der Rohrleitungen erfolgt in der Regel auf Basis des maximal notwendigen Leistungsbedarfs. Der grösste Leistungsbedarf fällt normalerweise während der Heizsaison bei sehr kalten Aussentemperaturen an und ist teilweise von saisonalen Schwankungen abhängig wie zum Beispiel in touristischen Orten in den Bergen zwischen Weihnachten und Neujahr. Weiter ist, soweit möglich, die zeitliche Entwicklung des Versorgungsgebietes zu berücksichtigen, da das Versorgungsgebiet sich über die Zeit verändert und entwickelt.

Diese Aufgabe stellt sich sehr früh im Planungsprozess und ist aufgrund der zu diesem Zeitpunkt noch bestehenden Unsicherheiten und Ungenauigkeiten besonders anspruchsvoll. Sie erfordert sorgfältige, strategisch ausgerichtete und langfristige Entscheidungen.

Dabei gelten folgende Empfehlungen:

Dabei sind insbesondere folgende Entscheidungsgrundlagen aufzubereiten:

- Leistungsbedarf im Endausbau.
- Temperaturspreizung im Betrieb.
- Entwicklung Versorgungsgebiet und Berücksichtigung von Ausbaureserven.
- Abschätzen des Sanierungspotenzials im jetzigen und zukünftigen Versorgungsgebiet.
- Standort(e) der Einspeisung
- Grober Leitungsplan der Transport-, Haupt- und Zweigleitungen.

Für alle beteiligten Entscheidungsträger ist eine koordinierte und politisch verbindliche Energiestrategie auf kommunaler Ebene von grossem Nutzen (Stichwort: räumliche Energieplanung, siehe Kapitel 1.2.2).

Sobald die wichtigsten Entscheidungsgrundlagen vorliegen, kann die Dimensionierung der Rohrleitungen auf Basis des spezifischen Druckverlustes pro Meter Leitungslänge (in Pa/m) vorgenommen werden.

- **Auslegung einzelner Teilstränge:**  
**250 bis 300 Pa/m**

Gilt als Entscheidungskriterium, es sollte derjenige Nenndurchmesser gewählt werden, bei dem der maximale spezifische Druckabfall unterschritten wird. Je nach Situation und Stelle im Netz sind im Auslegefall auch leicht grössere spezifische Druckverluste vertretbar, da der maximale Leistungsbedarf nur bei einer geringen Anzahl von Betriebsstunden abgerufen wird. Der Rest vom Jahr sind die Leitungen immer „überdimensioniert“.

- **Kontrollgrösse eines längeren Leistungsabschnittes:**  
**150 bis 200 Pa/m**

Wegen den unsteten Nennweiten-Abstufungen, ergeben sich in einem längeren Leitungsabschnitt mit sich ändernden Leitungsquerschnitten automatisch tiefere spezifische Druckverluste (z. B. Leitung von der Zentrale bis zum Schlechtpunkt).

- Die **Rohrrauheit  $k$**  hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Dimensionierung der Rohrleitungen. Typischerweise verwenden Hersteller und Lieferanten von Rohrsystemen Rohrrauheiten von 0,04 bis 0,05 mm. Nach [165] wird eine **maximale hydraulische Rohrrauheit von 0,01 mm** zur Berechnung des Druckverlustes empfohlen.

**Hinweis:** Kontrollieren sie auch die Einstellungen in Netzberechnungs-Software, die haben Default-Einstellungen, welche teilweise erheblich grösser sind.

Für die Rohrsysteme KMR, KMR-Duo, MMR, MMR-Duo PMR und PMR-Duo sind im Bild 10.1 Richtwerte für mögliche Übertragungsleistungen bei unterschiedlichen Temperaturspreizungen von 15 K, 30 K und 45 K bei einem spezifischen Druckverlust von 300 Pa/m zu finden.

### 4.11.2 Vorgehen

Zunächst ist ein grober **Leistungsplan** zu erstellen, der das (vollständige) thermische Netz schematisch und möglichst massstäblich darstellt. Dieser Leistungsplan bildet die Grundlage für die anschliessende Auslegung der Leitungen. Die Leitungen werden dabei gegliedert nach:

- Transportleitung(en)
- Hauptleitung(en)
- Zweigleitungen
- Hausanschlussleitungen

Der Leistungsplan wird anschliessend in **Teilstrecken** eingeteilt. Eine Teilstrecke ist definiert als ein Leitungsabschnitt ohne Abgänge (zum Beispiel T-Stück oder Hosenrohr) und ohne Nennweitenänderung. Eine Teilstrecke kann aber diverse Richtungsänderungen, Dehnungsbögen, Höhenunterschiede und Armaturen beinhalten. Für die Berechnung und Auslegung werden den Teilstrecken unter anderem folgende wichtige Attribute zugewiesen:

- Nummerierung.
- Übertragungsleistung der Teilstrecke im Auslegefall in kW.
- Länge der Teilstrecke in Trassenmeter.
- Einzelwiderstände der Teilstrecke (Armaturen, Bögen etc.).
- Höhenunterschiede von Anfangs- und Endknoten.

Unabhängig von der Berechnungsmethode werden für die **Dimensionierung** der Teilstrecken folgende Berechnungen durchgeführt:

1. Berechnung der Durchflüsse in den Teilstrecken aus Übertragungsleistung und Temperaturdifferenz im Auslegefall.
2. Erste Abschätzung der Rohrdurchmesser auf Basis der Übertragungsleistung und Temperaturdifferenz gemäss Bild 10.1.
3. Bestimmung der Summe der Einzelwiderstände in den Teilstrecken. Falls die Summe der Zeta-Werte der Einzelwiderstände noch nicht bekannt ist, können diese in der Grössenordnung von 5 % bis 10 % auf die Rohrlänge aufgerechnet werden.
4. Berechnung der spezifischen Druckverluste der Teilstrecken.
5. Iteratives optimieren der Nennweiten der Teilstrecken auf einen spezifischen Druckverlust von 250 bis 300 Pa/m.
6. Berechnung der ungünstigsten Strecke mit dem höchsten Druckverlust im Auslegefall, dem sogenannten Schlechtpunkt.
7. Nachrechnung des gesamten Wärmenetzes und Erstellen eines Druckschaubildes für den Schlechtpunkt im Auslegefall. Im Endausbau und unter vordefinierten Randbedingungen darf der Gesamtdruck im Netz, der Überlagerung vom statischen und dynamischen Druck, den maximal zulässigen Betriebsdruck (MOP) nicht überschreiten.
8. Weitere Optimierung der Nennweiten und Randbedingungen oder Abschluss der Auslegung.

### 4.11.3 Berechnungsmethoden

Die Berechnung des Druckverlustes und daraus die Dimensionierung der Rohrleitungen abzuleiten, kann auf unterschiedliche Arten erfolgen.

Für einzelne Leitungsabschnitte oder kleinere Netze und zur Kontrolle kann dies mit Hilfe von Tabellen, Tafeln und Formularen zur Rohrnetzberechnung **von Hand** erfolgen. Dazu werden folgende Informationen benötigt:

- R-Wert, Durchfluss, Staudruck (dynamischer Druck) für unterschiedliche Rohrdurchmesser.
- Zeta-Werte für unterschiedliche Einbauten.

Wie oben erwähnt, wird die Verwendung einer hydraulischen Rohrrauheit von maximal 0,01 mm empfohlen. Im Anhang Kapitel 10.2 ist eine R-Wert-Tafel mit einer hydraulischen Rohrrauheit von max. 0,01 mm zu finden.

Je nach Grösse des Netzes und möglichem Ausbaupotenzial empfiehlt sich relativ früh im Projekt eine **rechnerunterstützte Entwicklung und Auslegung** des Netzes.

Es gibt reine Druckverlust-Berechnungsprogramme, wie zum Beispiel das frei verfügbare Rohr- und Kanalnetzberechnungstool auf EXCEL-Basis vom Kompetenzzentrum Gebäudetechnik und Energie der Hochschule Luzern Technik & Architektur ([Link](#)).

Einen Schritt weiter gehen **professionelle Berechnungstools** bei der Digitalisierung, indem sogenannte **digitale Zwillinge** des Netzes erstellt werden. Je nach Software und Anbieter bieten solche Programme neben der klassischen Druckverlustberechnung weitaus umfangreichere Berechnungen und Auswertungen an. Die Entwicklung solcher Tools, welche in der frühen Entwicklungs- und Planungsphase bis hin zur Betriebsoptimierung und operativen Lastmanagement eingesetzt werden, ist im vollen Gange. Die Tabelle 4.22 gibt eine nicht abschliessende Übersicht zu aktuell erhältlichen Tools und deren groben Einsatzbereich.

Tabelle 4.22 Übersicht Software-Tools für thermische Netze (alphabetisch geordnet, Liste ist nicht abschliessend).

| Tool              | Typ                                 | Hersteller / Entwickler           | Einsatzbereich                                                                                    | Vorteile                                                                                   | Nachteile                                                                 |
|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| AD Net Heat       | Kommerzielle Software               | Fraunhofer ITWM                   | Dynamische, orts aufgelöste thermo-hydraulische Simulation und Optimierung von thermischen Netzen | Echtzeitoptimierung, detaillierte Modellierung, praxisnahe Anwendungen                     | Lizenzkosten, Einarbeitungszeit erforderlich                              |
| Comsof Heat       | Kommerzielle Software               | IQGeo                             | GIS-gestützte Planung und Auslegung von thermischen Netzen                                        | Automatisierte Szenarioanalyse, Integration von GIS-Daten, unterstützt Net Zero-Ziele      | Lizenzkosten, spezifische GIS-Kenntnisse erforderlich                     |
| DistrictLab       | Kommerzielle Software               | DistrictLab SA                    | Thermo-hydraulische Auslegung und Optimierung von thermischen Netzen                              | Umfassende Funktionen für Planung und Betrieb, unterstützt digitale Zwillinge              | Lizenzkosten, Einarbeitungszeit erforderlich                              |
| Fluidit Heat      | Kommerzielle Software               | Fluidit Oy                        | Dynamische Simulation und Optimierung von thermischen Netzen                                      | Unterstützung von Niedertemperaturnetzen, digitale Zwillinge, intuitive Benutzeroberfläche | Lizenzkosten, Einarbeitungszeit erforderlich                              |
| Fluidity          | Open-Source CFD                     | Imperial College London           | Detaillierte, dynamische Simulation thermischer Netze                                             | Extrem flexibel, hochdetailliert, für Forschung geeignet                                   | Hoher Aufwand, CFD-Vorkenntnisse nötig, keine Standard-Planungsfunktionen |
| Leanheat® Network | Kommerzielle Software               | Danfoss                           | Thermo-hydraulische Modellierung zur Planung und Betriebsoptimierung von thermischen Netzen       | Reduzierung von Energieverlusten, Unterstützung bei CapEx- und OpEx-Optimierung            | Lizenzkosten, spezifische Systemkenntnisse erforderlich                   |
| nPro              | Online-Tool                         | nPro Energy GmbH                  | Planung & Simulation thermischer Netze inkl. Verlusten                                            | Schnell, intuitiv, cloudbasiert                                                            | Eingeschränkter Funktionsumfang, keine CFD-Details                        |
| Roka-GS           | Kommerzielle Software               | RZVN Wehr GmbH                    | Hydraulische Berechnung und Auslegung thermischer Netze                                           | Praxisbewährt, umfassend für Netzberechnung                                                | Lizenzkosten, wenig grafische Auswertungen                                |
| ROKA³             | Kommerzielle Software               | RZVN Wehr GmbH                    | Netzberechnung für Gas-, Wasser- und thermische Netze                                             | Intuitive Bedienung, schnelle Berechnungen, Unterstützung von Standardlastprofilen         | Lizenzkosten, weniger grafische Auswertungen                              |
| Sir 3S            | Kommerzielle Software               | 3S Consult GmbH                   | Planung, Simulation und Optimierung von Wärme-/Kältenetzen                                        | Stark im Bereich Szenarien und Optimierungen                                               | Teils komplexe Bedienung, Lizenzkosten                                    |
| STANET            | Kommerzielle Software               | Fischer-Uhrig Engineering GmbH    | Thermo-hydraulische Berechnung & Auslegung thermischer Netze                                      | Praxisbewährt, intuitive Bedienung, leistungsfähig, Import GIS Daten                       | Lizenzkosten, Schulung von Vorteil                                        |
| Sympheny          | Kommerzielle Software, Cloudbasiert | Urban Sympheny AG (EMPA Spin-off) | GIS-basierte Energie- und Wärmeversorgungsplanung für Areale und Städte                           | Szenarioanalyse, Integration von erneuerbaren Energien und Speichern, cloudbasiert         | Lizenzkosten, primär für Areal- und Stadtplanung                          |
| THENA             | Excel-basiertes Tool                | Verenum AG                        | Grobplanung und Wirtschaftlichkeitsabschätzungen                                                  | Schnell, transparent, leicht zugänglich                                                    | Eher für Vorstudien und kleine Netze, keine detaillierte Simulation       |
| THERMOS           | Open-Source (GIS-basiert)           | EU-Projekt                        | Netzplanung & Vorstudien, Potenzialanalysen                                                       | Kostenfrei, einfache Bedienung, GIS-Integration                                            | Begrenzte Detailschärfe, keine dynamische Simulation                      |
| topGrid           | Online-Tool                         | HSLU                              | Gebietsanalyse, Potenzialabschätzung, Vorstudien                                                  | Webbasiert, speziell für Gemeinden, intuitive Bedienung                                    | Keine Detailplanung oder dynamische Simulation                            |
| Urbio             | Kommerzielle Software, Cloudbasiert | Urbio AG                          | Kommunale Wärmeplanung, Energiesystemmodellierung, Potenzialanalysen                              | Sehr benutzerfreundlich, schnelle Berechnung alternativer Szenarien, stark visuell         | Lizenzkosten, starker Fokus auf frühe Planungsphasen                      |
| Wärmepläne        | Kommerzielle Software               | greenventry GmbH                  | Erstellung digitaler Wärmepläne für Kommunen und Versorgungsgebiete mit digitalen Zwillingen      | Unterstützung bei kommunaler Wärmeplanung, Integration erneuerbarer Energien               | Lizenzkosten, primär auf kommunale Anwendung fokussiert                   |

## 4.12 Übergeordnete Entscheidungskriterien im Leitungsbau

Der Leitungsbau für thermische Netze ist ein komplexes Zusammenspiel technischer, rechtlicher und organisatorischer Aspekte. Eine vorausschauende Planung und Abstimmung aller Beteiligten ist entscheidend für Kosten, Qualität und Termintreue. Im Folgenden werden zentrale Entscheidungskriterien und Rahmenbedingungen erläutert.

### **Genehmigung, Konzession, Austausch mit Behörden**

Bereits früh im Projekt ist der enge Austausch mit den zuständigen Behörden auf Gemeinde-, Kantons- und Bundesebene notwendig. Themen wie Konzessionen für öffentliche Flächen, Bau- und Grabungsbewilligungen oder Umweltauflagen sind abzuklären. Eine klare Zuständigkeitsregelung und frühzeitige Kommunikation vermeiden Verzögerungen und Nachforderungen.

### **Privatstrassen, Privatgrund, Durchleitungsrechte, Dienstbarkeiten**

Leitungsführungen über Privatgrund erfordern vertraglich geregelte Durchleitungsrechte oder Dienstbarkeiten. Eigentümer sind frühzeitig einzubeziehen, um Einsprüche zu vermeiden respektive sind diese leider immer mehr einzukalkulieren. Bei Privatstrassen ist zudem die Tragfähigkeit und Zugänglichkeit während der Bauphase zu prüfen.

### **Kenntnis der Umgebung**

Eine genaue Kenntnis der örtlichen Gegebenheiten ist unerlässlich. Altlasten, archäologische Fundstellen oder bestehende Werkleitungen (Strom, Wasser, Gas, Telekom) beeinflussen die Planung und Bauweise erheblich. Auch der Zustand der Asphaltbeläge und deren Restlebensdauer spielen eine Rolle für den Wiederaufbau und die Kostenschätzung.

### **Koordination mit anderen Projekten, Abstimmung der Gewerke**

Die Koordinierung und parallele Planung mit anderen Infrastrukturprojekten (z. B. Strassenbau, Kanalisation, Glasfaser) ermöglicht Synergien und reduziert Eingriffe in den Strassenraum. Eine enge Abstimmung zwischen Tiefbau, Leitungsbau und Oberflächenbau verhindert Konflikte auf der Baustelle und erhöht die Effizienz.

### **Vermessung**

Aktuelle Vermessungsgrundlagen (amtliche Vermessung, AV oder Geoportale) sind die Basis für eine präzise Trassierung. Bestehende Leitungskataster helfen, Konflikte zu erkennen und die neue Leitung optimal zu platzieren. Nach Bauabschluss ist die Nachführung der Bestandsdaten im Leitungskataster sicherzustellen.

### **Verkehrskonzept für die Bauzeit**

Bauarbeiten im öffentlichen Raum erfordern ein temporäres Verkehrskonzept. Dieses umfasst Umleitungen,

Signalisation, Fussgängerführungen, Blaublichtorganisation und Sicherheitsmassnahmen. Die Anforderungen von Anwohnern, Gewerbe und Rettungsdiensten sind dabei zu berücksichtigen.

### **Planung des Leitungsbaus nach Normen und Regeln**

Die Ausführung muss den geltenden Normen und Richtlinien (z. B. SVGW, EN, AGFW, SIA) entsprechen. Wichtige Punkte sind die Wahl der Verlegeart, statische Nachweise, Wärmedämmung, Qualitätssicherung (z. B. Röntgenprüfung von Schweißnähten oder Druckprobe) und der angestrebte Ausführungsstandard. Je nach Strategie können auch Vorinvestitionen für zukünftige Netzverdichtungen sinnvoll sein.

### **Planung des Grabens und Baustellenkonzepts**

Die Grabenplanung berücksichtigt Geometrie (V-Graben, gespriesst), Platzbedarf für Rohrstränge und Aushubmaterial sowie die Zugänglichkeit für Maschinen. Ein klar definiertes Baustellenkonzept mit Materiallogistik und Sicherheitsvorgaben erleichtert einen reibungslosen Bauablauf.

### **Terminplan und Baustelleneinrichtung**

Ein detaillierter Terminplan strukturiert die einzelnen Arbeitsschritte von der Bauvorbereitung bis zur Inbetriebnahme. Auch Baustelleneinrichtung, Lagerflächen und Zufahrten sind zu planen, um Stillstände und Wartezeiten zu vermeiden.

### **Spezialtiefbau und Tiefbauwerke**

In anspruchsvollen Geländesituationen oder bei Kreuzungen mit bestehenden Infrastrukturen sind Spezialverfahren wie Pressvortrieb oder Mikrotunnelbau einzusetzen. Ebenso sind Bauwerke wie Schächte, Übergabestationen oder Schutzrohre sorgfältig zu dimensionieren und zu integrieren.

### **Grabenverfüllung und Instandstellung**

Nach der Leitungsverlegung erfolgt die Verfüllung in definierten Schichten – meist mit Sandbettung, darüber verdichtetem Aushubmaterial. Der Wiederaufbau der Oberfläche (Belag, Grünflächen) erfolgt gemäss Vorgaben des Eigentümers beziehungsweise der Gemeinde. Eine fachgerechte Instandstellung ist entscheidend für Akzeptanz und Nachhaltigkeit.

### **Marketing, Anwohnerinformation, Lärmemissionen**

Ein transparentes Informationskonzept gegenüber Anwohnern, Gewerbe und Öffentlichkeit schafft Vertrauen. Baustellenkommunikation, Beschilderung und Lärmschutzmassnahmen tragen zur Akzeptanz bei. Besonders bei innerstädtischen Projekten ist eine frühzeitige und offene Kommunikation entscheidend.

## 5 Wärmeübergabe

In diesem Kapitel wird die Anbindung an ein thermisches Netz behandelt. Grundsätzlich kann jedes Gebäude oder Kunde an ein thermisches Netz angeschlossen werden, sofern eine geeignete Installation vorhanden ist oder erstellt wird.

Es werden Themen wie Begriffe, Anschlussvarianten, Hydraulik, Wärmeliefervertrag, Anforderungen an die Sekundärseite, Übergabestationen mit deren Komponenten und Funktionen sowie Standard-Schaltungen.

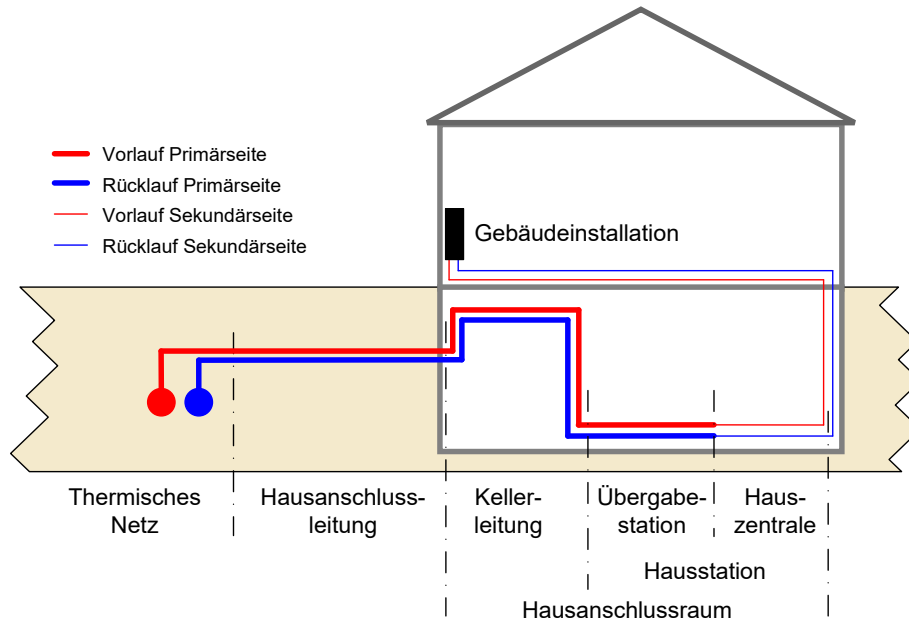


Bild 5.1 Übersicht und Begriffe zum Hausanschluss an ein thermisches Netz.

### 5.1 Begriffe

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe sowie deren Zweck und Funktionsweise erläutert. Das Bild 5.1 zeigt die wichtigsten Begriffe zur Wärmeübergabe in Anlehnung an die DIN 4747 [176], der VDI 2036 [177] und AGFW-Dokumenten [178].

#### 5.1.1 Hausanschlussleitung

Die Hausanschlussleitung verbindet das thermische Netz mit der Übergabestation und gehört in der Regel zu den Betriebsanlagen des Wärmeversorgers. Auslegung und Ausführung erfolgen durch den Wärmeversorger. Die Leitungsführung bis zur Übergabestation muss zwischen den Beteiligten abgestimmt werden. Die im Gebäude geführte Hausanschlussleitung vom Durchbruch ins Gebäude bis zur Übergabestation (auch Kellerleitung) ist direkt hinter dem Hauseintritt mit einer Absperrarmatur ausgerüstet. Mauerdurchführungen respektive Gebäudeeinführungen werden zusätzlich im Kapitel 4.5.3.1 beschrieben. Zudem ist in dem Zusammenhang speziell auch die Rohrstatik zu beachten (z. B. Fixpunkte bei Gebäudeeintritten). Hinweise dazu im Kapitel 4.10.4 und 4.10.5.

#### 5.1.2 Hausanschlussraum

In einem Hausanschlussraum werden die erforderlichen Anschluss- und Betriebseinrichtungen eingebaut. Lage und Abmessungen sind frühzeitig mit dem Wärmeversorger abzustimmen. Bezüglich der Anforderungen der Wärmedämmung ist die Lage des Hausan-

schlussraumes innerhalb oder ausserhalb der thermischen Gebäudehülle ausschlaggebend (ehemals Dämmperimeter). Innerhalb der thermischen Gebäudehülle wird zudem zwischen aktiv beheizten und unbeheizten Räumen unterschieden (vgl. dazu [179]).

#### 5.1.3 Hausstation

Die Hausstation besteht aus der Übergabestation und der Hauszentrale. Die Eigentums-, Verantwortlichkeits- und Zuständigkeitsgrenze zwischen Wärmeversorger und Kunde liegt in der Regel in der Hausstation. Die exakte Abgrenzung ist vertraglich zu definieren und abhängig von der Anschlussart (direkt oder indirekt).

Bei kleineren und mittleren Anschlussleistungen werden Übergabestation und Hauszentrale oft als bauliche Einheiten ausgeführt, was die Abgrenzung physisch erschwert. Bei grösseren Anlagen handelt es sich dagegen vielfach um getrennte Baugruppen, wo die Abgrenzung einfacher ist. Auf die Unterscheidung unterschiedlicher Kategorien wird im Kapitel 5.4 eingegangen.

Aus Sicht des Wärmeversorgers ist zu empfehlen, dass die Übergabestation und die Hauszentrale selbst geplant oder in Auftrag gegeben wird. Damit kann gewährleistet werden, dass die Übergabestationen eine einheitliche und kompatible Ausrüstung aufweisen. Wann immer möglich ist eine Datenverbindung von der Zentrale zu den Übergabestationen zu etablieren, um die Fakturierung, Störungserfassung, Service und Unterhalt sowie Anlagenoptimierung zu vereinfachen beziehungsweise zu gewährleisten.

### 5.1.4 Übergabestation

Die Übergabestation dient dazu, die Wärme bzw. das Wärmeträgermedium bestimmungsgemäss bezüglich Druck, Temperatur und Volumenstrom an die Hauszentrale zu übergeben. In der DIN 4747 [176] ist die Übergabestation als Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung (Kellerleitung) und der Hauszentrale definiert.

Die Anforderungen an die Übergabestation werden durch das Anwendungsprofil des Kunden und durch die Technischen Anschlussvorschriften (TAV) des Wärmeversorgers vorgegeben.

### 5.1.5 Hauszentrale

Die Hauszentrale ist das Bindeglied zwischen der Übergabestation und der Gebäudeinstallation. Sie dient der korrekten Wärmeversorgung der Gebäudeinstallation bezüglich Druck, Temperatur und Volumenstrom.

Bei der Gestaltung der Hauszentrale ist zu unterscheiden zwischen direktem (Bild 5.2) und indirektem Anschluss (Bild 5.3). Beim direkten Anschluss durchströmt das Wärmeträgermedium die Gebäudeinstallation des Kunden. Beim indirekten Anschluss ist das Wärmeträgermedium durch einen Wärmeübertrager hydraulisch von der Gebäudeinstallation des Kunden getrennt.

Die Anschlussart wird in der Regel vom Wärmeversorger vorgegeben und in den TAV festgehalten.

### 5.1.6 Gebäudeinstallation

Die Gebäudeinstallation hat die Aufgabe, die Wärme in der gewünschten Form (Temperaturniveau und Menge) zur Verfügung zu stellen und umfasst im Wesentlichen die Wärmeverteilung, Warmwassererwärmung und Lüftung (Verteilerbalken, Pumpen, Ventilatoren, Ventile, Armaturen, Leitungen, Heizflächen etc.). Die Gebäudeinstallation ist üblicherweise im Eigentum des Kunden und befindet sich bei einem indirekten Anschluss auf der Sekundärseite des thermischen Netzes. Der Kunde ist für deren Einrichtung, Betrieb und Instandhaltung verantwortlich. Um eine effiziente und wirtschaftliche Energieversorgung zu gewährleisten, werden in den Technischen Anschlussvorschriften (TAV) entsprechende Anforderungen an die Gebäudeinstallation gestellt. Aus Sicht des Wärmeversorgers ist es daher wichtig, dass bei der Planung der Kundenanschlüsse Angaben über die vorhandene oder geplante Gebäudeinstallation der Kunden erfasst werden und kontrolliert wird, dass die Anforderungen aus den TAV eingehalten respektive Abweichungen festgehalten werden.

## 5.2 Hydraulik

### 5.2.1 Grundsaltungen

Praktisch alle Schaltungen in der Gebäudetechnik basieren auf folgenden hydraulischen Grundsaltungen:

- Beimischschaltung
- Umlenkschaltung
- Einspritzschaltung
- Drosselschaltung

Nachfolgend wird auf die Beimischschaltung, die Einspritzschaltung mit Durchgangsventil und die Drosselschaltung eingegangen (Tabelle 5.1). Das sind die am häufigsten eingesetzten Schaltungen in der Gebäudetechnik. Die Einspritzschaltung mit Durchgangsventil und die Drosselschaltung werden als Grundsaltungen für den primärseitigen Anschluss an ein thermisches Netz eingesetzt.

#### 5.2.1.1 Beimischschaltung

Heizgruppen auf der Sekundärseite (druckarmer Verteiler) werden bevorzugt als Beimischschaltung ausgeführt. Dabei wird das Rücklaufwasser mit dem Vorlaufwasser auf die gewünschte Vorlauftemperatur der Heizgruppe gemischt. Die gewünschte Vorlauftemperatur der Heizgruppe wird mit der Heizkurve definiert und ist vielfach abhängig von der Aussentemperatur.

Beim Einsatz von Thermostatventilen wird der Massenstrom im Wärmeabgabekreislauf variabel, deshalb sind zwingend drehzahlgeregelte Umwälzpumpe einzusetzen.

Ist die vom Fernwärmelieferanten gelieferte primäre Vorlauftemperatur bei Auslegebedingungen höher als die geforderte sekundäre Vorlauftemperatur in der Heizgruppe (z. B. Fussbodenheizung), muss bei der Beimischschaltung auf der Sekundärseite eventuell ein Fix-Bypass eingebaut werden. Als Faustregel ist ein Fix-Bypass notwendig, wenn das folgende Temperaturverhältnis (Vorlauf Verteilung – Rücklauf Heizkreis)/(Vorlauf Heizkreis – Rücklauf Heizkreis) grösser 2.5 ist.

$$\frac{\text{Vorlauftemperatur}_{\text{primär}} - \text{Rücklauftemperatur}_{\text{sekundär}}}{\text{Vorlauftemperatur}_{\text{sekundär}} - \text{Rücklauftemperatur}_{\text{sekundär}}} \geq 2.5$$

Durch das stetige Beimischen des abgekühlten Rücklaufwassers via Bypass sinkt die Vorlauftemperatur und damit steht dem Stellorgan der komplette Hub für die Regulierung zur Verfügung. Dadurch wird die Regulierfähigkeit des Stellorgans optimal ausgenutzt.

#### 5.2.1.2 Einspritzschaltung mit Durchgangsventil

Bei differenzdruckbehafteten Verteilern wird durch die Pumpe im Erzeugerkreis (z. B. Kesselpumpe oder Pumpe im Primärkreislauf eines thermischen Netzes) dem Verbraucherkreis eine Druckdifferenz zur Verfügung gestellt. Je nach Stellung des Durchgangsventils wird mehr oder weniger Vorlaufwasser der Kundenan-

lage eingespritzt. Somit entsteht im Verbraucherkreis eine Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss und im Erzeugerkreis eine Mengenregelung mit variablem Durchfluss. Aus diesem Grund ist zwingend eine drehzahlgeregelte Netzpumpe einzusetzen.

Bei direkten Anschlüssen an ein thermisches Netz wird daher vorzugsweise eine Einspritzschaltung mit Durchgangsventil eingesetzt. Dadurch kann im Teillastbetrieb eine tiefe Rücklauftemperatur erreicht werden.

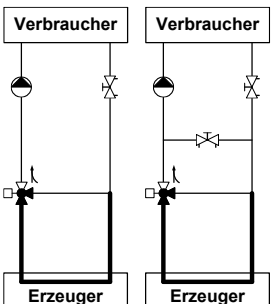
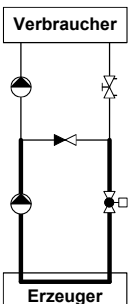
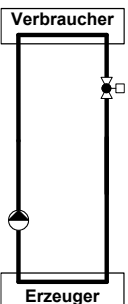
Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Warmwassererwärmung, damit kann bei hartem Wasser ein Verkalken der Sekundärseite des Wärmeübertragers durch eine zu hohe primärseitige Vorlauftemperatur vermieden werden.

#### 5.2.1.3 Drosselschaltung

Die Drosselschaltung ist wie die Einspritzschaltung eine differenzdruckbehaftete hydraulische Schaltung und wird bevorzugt bei indirekten Anschlüssen an ein thermisches Netz auf der Primärseite eingesetzt.

Im Gegensatz zur Einspritzschaltung mit Durchgangsventil ergibt sich im Verbraucherkreis eine Mengenregelung mit variablem Durchfluss. Aus diesem Grund ist eine drehzahlgeregelte Netzpumpe einzusetzen.

Tabelle 5.1 Beimischschaltung, Einspritzschaltung mit Durchgangsventil und Drosselschaltung.

|               | Beimischschaltung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Einspritzschaltung mit Durchgangsventil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Drosselschaltung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Eigenschaften | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefe Rücklauftemperatur, auch bei kleiner Last (gut geeignet bei kondensierendem Wärmeerzeuger)</li> <li>• Konstanter Massenstrom mit variabler Vorlauftemperatur im Verbraucherkreis, sofern keine Massenstromregler (z.B. Thermostatventile) bei der Wärmeabgabe eingesetzt werden</li> <li>• Variabler Massenstrom über dem Erzeugerkreis (Pumpe reguliert).</li> <li>• Gleichmässige Temperaturverteilung über dem Verbraucherkreis</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefe Rücklauftemperatur</li> <li>• Konstanter Massenstrom mit variabler Vorlauftemperatur im Verbraucherkreis, sofern keine Massenstromregler (z.B. Thermostatventile) bei der Wärmeabgabe eingesetzt werden</li> <li>• Variabler Massenstrom über dem Erzeugerkreis (Pumpe reguliert)</li> <li>• Gleichmässige Temperaturverteilung über dem Verbraucherkreis</li> <li>• Bei Einspritzschaltungen mit Durchgangsstellorgan muss immer eine Hauptpumpe berücksichtigt werden.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefe Rücklauftemperatur</li> <li>• Variabler Massenstrom über dem Verbraucher und dem Erzeugerkreis</li> <li>• Langsame Strömungsgeschwindigkeiten bei Teillast</li> <li>• Gleichmässige Temperaturverteilung über dem Verbraucherkreis</li> <li>• Bei Drosselschaltungen mit Durchgangsstellorgan muss immer eine Hauptpumpe berücksichtigt werden</li> </ul>                                              |
| Einsatzgebiet | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen</li> <li>• Anlagen mit Niedertemperatur-Wärmeerzeugern (kondensierende Wärmeerzeugung; Brennwertkessel) oder Wärmepumpen</li> <li>• Optimale Lösung bei einzelner Verbrauchergruppe (einfache, günstige Lösung)</li> </ul>                                                                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fernwärmeanschlüsse (direkt / indirekt)</li> <li>• Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen</li> <li>• Anlagen mit Niedertemperatur-Wärmeerzeugern (kondensierende Wärmeerzeugung; Brennwertkessel) oder Wärmepumpen</li> <li>• Brauchwarmwassererwärmung mit max. Temperaturbegrenzung bei hartem Wasser oder max. Rücklauftemperaturbegrenzung</li> <li>• Luftherhitzer (Heizregister) mit Einfriergefahr</li> </ul>                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fernwärmeanschlüsse (indirekt)</li> <li>• Wärmespeicher</li> <li>• Zonen-Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen</li> <li>• Einzelraumregelung (z.B. über Thermostatventile)</li> <li>• Kühlregister in grossen Systemen</li> <li>• Luftherhitzer (Heizregister) ohne Frostgefahr</li> <li>• Anlagen mit Niedertemperatur-Wärmeerzeugern (kondensierende Wärmeerzeugung; Brennwertkessel)</li> </ul> |
| Vorteile      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefe Rücklauftemperaturen</li> <li>• Gute Regelbarkeit beim Einsatz auf drucklosen oder druckarmen Verteilern</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefe Rücklauftemperaturen</li> <li>• Gute Regelbarkeit beim Einsatz auf druckbehafteten Verteilern</li> <li>• Mehrere (parallel geschaltete) Heizkreise beeinflussen sich wenig</li> <li>• Bei mehreren Verbrauchern höhere Regelstabilität als bei Beimischschaltungen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefe Rücklauftemperaturen</li> <li>• Einfache Einzelraumregelung über Thermostatventile</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Nachteile     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• primärseitig kein Differenzdruck erlaubt (druckarmer Verteiler)</li> <li>• Gegenseitige Beeinflussung bei mehreren Heizkreisen</li> <li>• Bei mehreren Gruppen darf die maximale Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss nicht grösser als 20 % der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe im Auslegetpunkt sein.</li> </ul>                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz von min. zwei Umwälzpumpen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfriergefahr bei Luftherhitzer (Register)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## 5.2.2 Anschlussvarianten

Die Wärmeübergabe kann nach Kapitel 5.2.2 indirekt über einen Wärmeübertrager oder direkt erfolgen. Häufig wird eine indirekte Wärmeübergabe bevorzugt.

Damit eine möglichst tiefe Rücklauftemperatur erreicht wird, sind aus Sicht des Wärmeversorgers entsprechende Anforderungen an die Sekundärseite einzuhalten und werden im Kapitel 5.7 detailliert beschrieben. Die Anforderungen an die Ausführung der Kundenanlage (Primär- und Sekundärseite) stellt der Wärmeversorger in den zum Liefervertrag gehörenden Technischen Anschlussvorschriften (TAV). Darin wird zum Beispiel festgehalten, ob der Anschluss an das thermische Netz mit einem direkten oder indirekten Hausanschluss zu erfolgen hat.

Die Steuerung beziehungsweise Regelung der Kundenanschlüsse durch Einzelregler ist für kleinere Netze in der Regel die einfachste und kostengünstigste Lösung. Bei mittleren und grösseren Netzen ist jedoch eine zentralisierte Überwachungsmöglichkeit (z. B. Übergeordnetes Leitsystem) in Betracht zu ziehen. Mit einer zentralen Überwachung können Bedarfsspitzen, Lastanforderungen, Fehler in der Parametrierung der einzelnen Regler oder auch Optimierungspotenziale erkannt werden. Durch die zentrale Erfassung der einzelnen Wärmezähler und Messdaten-Übertragung vereinfacht sich auch die Fakturierung und das Ablesen der Zählerstände vor Ort erübrigt sich.

### 5.2.2.1 Direkter Anschluss

Beim direkten Anschluss wird die Gebäudeinstallation vom Wärmeträgermedium aus dem thermischen Netz durchströmt (Bild 5.2). Folgendes ist zu beachten:

- Ein direkter Anschluss ist grundsätzlich nur möglich, wenn der Ruhedruck und der Rücklaufdruck des thermischen Netzes kleiner sind als der zulässige Nenndruck der Gebäudeinstallation.
- Ein direkter Anschluss birgt aus Sicht des Wärmeversorgers gewisse Risiken. Wie zum Beispiel erhöhter Betriebsaufwand zur Sicherstellung der Wasserqualität oder Haftungsansprüche durch Schäden an (alten) Gebäudeinstallationen.
- Der Aufbau einer Druckhaltung beim Kunden erübrigt sich, da dies durch den Wärmeversorger gewährleistet wird.
- Liegt der maximale Netzvorlaufdruck unter dem für die Gebäudeinstallation zulässigen Nenndruck, so kann grundsätzlich auf eine Druckabsicherung verzichtet werden. Empfehlenswert ist jedoch, eine Druckreduzierung mit Absicherung zu installieren.
- Das Umlaufwasser wird durch den Wärmeversorger eingefüllt und nachgespiesen. Auch die Wasserqualität obliegt dem Wärmeversorger. Die Wasserqualität muss allerdings bei der Materialwahl für die Hauszentrale und Gebäudeinstallation berücksichtigt werden.
- Eine Einspritzschaltung ermöglicht mit geringem Aufwand eine exakte Einstellung der Temperaturanforderungen für die Gebäudeinstallation.
- Wenn die maximale Netzvorlauftemperatur unter der maximal zulässigen Vorlauftemperatur der Gebäudeinstallation liegt, dann kann auf eine (zusätzliche) Temperaturabsicherung verzichtet werden.

### 5.2.2.2 Indirekter Anschluss

Beim indirekten Anschluss durchströmt das Wärmeträgermedium aus dem thermischen Netz das Wärmeabgabesystem im Gebäude nicht, sondern ist durch einen Wärmeübertrager hydraulisch von der Gebäudeinstallation getrennt (Bild 5.3). Diese Massnahme ist erforderlich, wenn die Parameter wie Druck und Temperatur im thermischen Netz für Gebäude und Gebäudeinstallationen nicht geeignet sind. Zudem hat es den Vorteil, dass nur die primärseitige Installation, im Besitze des Wärmeversorgers, mit dem Umlaufwasser in Berührung kommen und die Wasserqualität einfacher zu kontrollieren ist.

Beim indirekten Anschluss liegen somit zwei getrennte hydraulische Kreise vor. Der vom Wärmeträgermedium durchströmte Teil des thermischen Netzes wird als Primärkreis (Primärseite) und der vom Heizmedium durchströmte Teil in den Gebäuden wird als Sekundärkreis (Sekundärseite) bezeichnet. Für den Wärmeversorger sowie für den Kunden hat dies folgende Konsequenzen:

- Das Druckniveau und die Druckstufe der Anlagenkomponenten der Gebäudeinstallation können praktisch frei bestimmt werden. Dadurch ist es möglich, die Gebäudeinstallation in geringerer Druckstufe und damit unter Umständen auch preiswerter auszuführen, was in vielen Fällen die etwas aufwändigere Hausstation rechtfertigt.
- Sekundärseitig sind Sicherheitsinstallationen notwendig (Expansionsanlage, Sicherheitsventil etc.).
- Es können auch Altanlagen, bei denen Druckstufe oder Alterungszustand zweifelhaft erscheinen, ohne Risiko für den Wärmelieferanten angeschlossen werden.
- Die Wahl der Werkstoffe und Verbindungselemente auf der Sekundärseite ist unabhängig von der Wasserqualität im thermischen Netz, solange die Anforderungen an den Wärmeübertrager und die TAV eingehalten werden.
- Bei der Auslegung der primärseitigen Anlagenteile müssen die Anforderungen der TAV eingehalten werden.

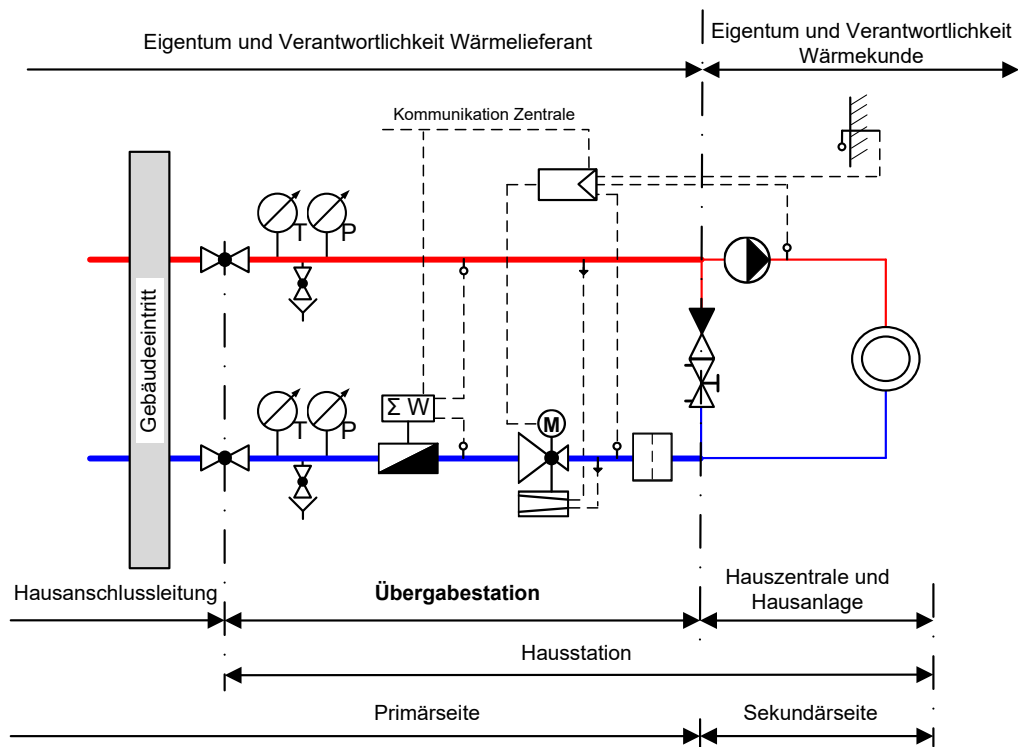


Bild 5.2 Hausanschluss mit direkter Wärmeübergabe inkl. empfohlener Grenze zwischen Eigentum und Verantwortlichkeit.

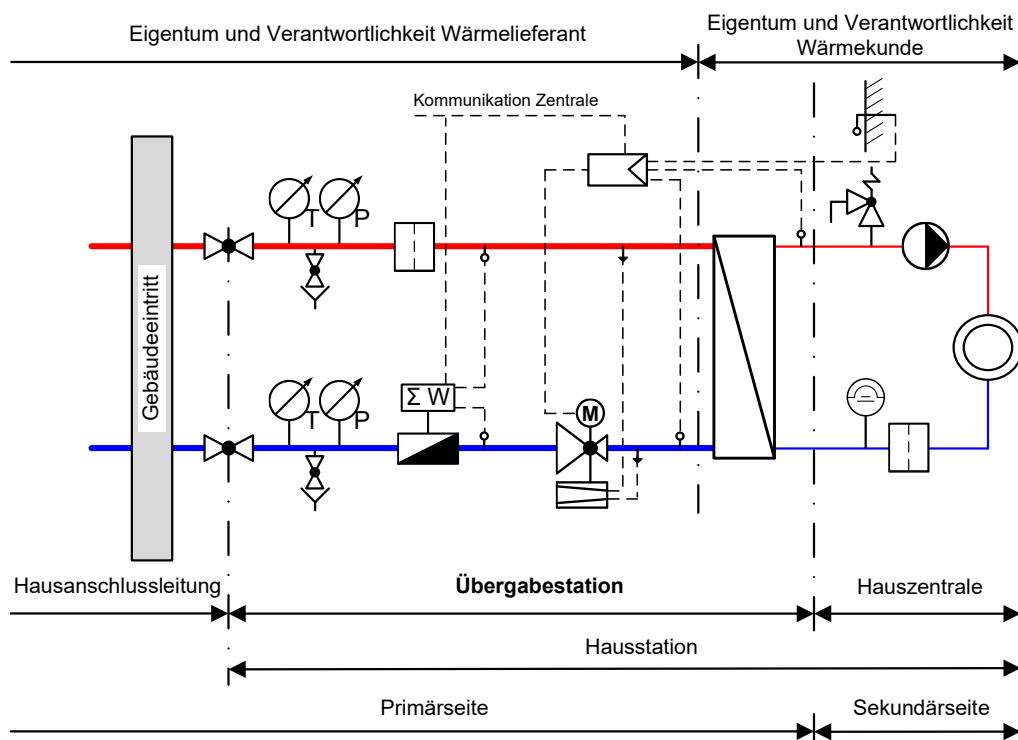


Bild 5.3 Hausanschluss mit indirekter Wärmeübergabe inkl. empfohlener Grenze zwischen Eigentum und Verantwortlichkeit..

### 5.2.3 Regelventil

In allen Grundschaltungen werden Regelventile in unterschiedlichen Bauformen eingesetzt:

- Durchgangsventile mit einem Eingang und einem Ausgang.
- Dreiwegeventile mit zwei Eingängen und einem Ausgang (Mischventile) oder einem Eingang und zwei Ausgängen (Verteilventile, eher selten eingesetzt).

Zur Bestimmung des Druckverlustes von Regelventilen und zur Auslegung der Hydraulik muss zuerst der Durchflusskennwert  $K_{VS}$ - und  $K_V$ -Wert bestimmt werden.

Bei Regelventilen und allgemein bei regelbaren Armaturen wird der Druckverlust nicht mit Einzelwiderständen, wie bei normalen Armaturen oder Rohreinbauten, sondern mit dem sogenannten  $K_{VS}$ -Wert berechnet. Die Hersteller der Regelventile geben daher zu jedem Regelventil einen  $K_{VS}$ -Wert an. Der entspricht einem Volumenstrom in  $\text{m}^3/\text{h}$  zwischen Ein- und Ausgang des vollständig offenen Regelventils bei 1 bar Druckverlust ( $\Delta p_{V100} = 1 \text{ bar}$ ). Dieser Zusammenhang gilt für kaltes Wasser bei einer Temperatur zwischen  $5^\circ\text{C}$  bis  $30^\circ\text{C}$ . Mit steigender Temperatur nimmt die Dichte von Wasser ab, Wasser bei  $100^\circ\text{C}$  hat eine um rund 4 % geringere Dichte als bei  $20^\circ\text{C}$ , dies muss bei hohen Wassertemperaturen berücksichtigt werden.

Über den  $K_{VS}$ -Wert kann für den Auslegefall bei vollständig geöffnetem Regelventil der Druckverlust bestimmt werden und im Umkehrschluss kann daraus das Regelventil korrekt ausgelegt werden.

$$K_{VS} = \frac{\dot{V}_{\max}}{\sqrt{\Delta p_{V100}}}$$

$$\Delta p_{V100} = \left( \frac{\dot{V}_{\max}}{K_{VS}} \right)^2$$

max entspricht dem maximalen Volumenstrom im Auslegefall

Wenn das Ventil bei einem bestimmten Hub steht (Hub zwischen 0 % – 100 %), bezeichnet der  $K_V$ -Wert eines Ventils den Volumenstrom in  $\text{m}^3/\text{h}$ , der sich bei einem Druckunterschied zwischen Ein- und Ausgang eines Ventils von 1 bar einstellt (Teillastfall).

$$K_V = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta p}}$$

Das hydraulische Verhalten der Regelventile wird durch die sogenannte Grundkennlinie (Hub in Funktion des Durchflusses) beschrieben. Sowohl Durchgangs- als auch Dreiwegeventile werden üblicherweise mit zwei unterschiedlichen Grundkennlinien angeboten:

- Lineare Grundkennlinie: gleiche Hubänderungen haben gleiche Durchflussänderungen zur Folge
- Gleichprozentige Grundkennlinie: gleiche Hubänderungen ergeben eine prozentual gleich grosse Änderung des aktuellen Durchflusses.

In Bild 5.4 ist eine lineare und eine gleichprozentige Grundkennlinie für ein Regelventil dargestellt. Bei offe-

nem Ventil (d.h. maximalen Hub  $H_{100}$ ) wird der grösste  $K_V$ -Wert erreicht, der als  $K_{VS}$ -Wert bezeichnet wird. Beim Öffnen des Ventils (kein Hub) ergibt sich ein Mengensprung von ungefähr 1 % bis 5 % von  $K_{VS}$ . Ventile sollten daher knapp ausgelegt sein, damit nicht in diesem Bereich geregelt werden muss.

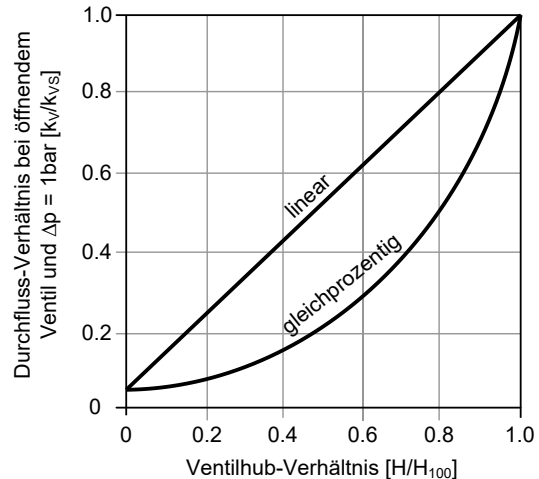


Bild 5.4 Grundkennlinie von Regelventilen (lineare und gleichprozentige Kennlinie).

Bei einer linearen Grundkennlinie ergeben sich bei gleichen Änderungen des Ventilhubes gleiche Änderungen des  $K_V$ -Wertes. Bei einer gleichprozentigen Grundkennlinie ergeben sich bei gleichen Änderungen des Ventilhubes gleiche prozentuale Änderungen des jeweiligen  $K_V$ -Wertes.

Bei der Auslegung der Ventile spielt neben der Ventilautorität auch das Übertragungsverhalten allfälliger Wärmeübertrager im Regelkreis eine Rolle, welches durch den Wärmeübertrager-Kennwert  $a$  ( $a$ -Wert) ausgedrückt wird. Da die Berechnung des  $a$ -Wertes relativ aufwändig ist, wird diesem üblicherweise durch die geeignete Wahl der Grundkennlinie des Regelventils Rechnung getragen. Diese Vereinfachung ist in der Regel zulässig, solange gleichzeitig eine Ventilautorität von  $\geq 0,5$  eingehalten wird. Damit gilt folgende vereinfachte Regel zur Wahl der Grundkennlinie:

- Regelkreis ohne Wärmeübertrager (z. B. Vorlauf-temperaturregelung) = Regelventil mit linearer oder gleichprozentiger Grundkennlinie (siehe Bild 5.4).
- Regelkreis mit Wärmeübertrager (z. B. Lufterhitzer/-kühler) mit gleichprozentiger Grundkennlinie (siehe Bild 5.4).

### 5.2.4 Ventilautorität

Wenn ein Ventil in eine hydraulische Schaltung eingebaut wird, verhält es sich nicht mehr entsprechend der Grundkennlinie, weil die Druckdifferenz über dem Ventil zu einem variablen Teil des Gesamtdruckgefälles der Anlage wird. Dies hat zur Folge, dass die Grundkennlinie mehr oder weniger deformiert wird. Mit zunehmender Deformation werden die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Regelung immer mehr beeinträchtigt. Im Extremfall wird der Regelkreis instabil und beginnt zu schwingen. Als Mass für die Deformation der Grundkennlinie wird die Ventilautorität herangezogen, die wie folgt definiert ist:

Die **Ventilautorität** ist das Verhältnis zwischen der Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des geöffneten Ventils bei Nenndurchfluss  $\Delta p_{V100}$  und der maximal auftretenden Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des geschlossenen Ventils, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt  $\Delta p_{V0}$ .

Dabei spielt der Druckabfall über demjenigen Teil der Schaltung eine wichtige Rolle, dessen variabler Durchfluss durch das Ventil beeinflusst wird (in Tabelle 5.1 fett hervorgehoben).

Bei den Schaltungen mit **Dreibegeventilen** treten keine Probleme auf, solange folgendes gilt:

$$P_V = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{V100} + \Delta p_{var100}} \geq 0.5$$

Bei 100 % Durchfluss muss der Druckabfall über dem offenen Dreibegeventil ( $\Delta p_{V100}$ ) gleich gross oder grösser sein als der Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss ( $\Delta p_{var100}$ ):  $\Delta p_{V100} \geq \Delta p_{var100}$ .

Bei Schaltungen mit **Durchgangsventilen** treten keine Probleme auf, solange folgendes gilt:

$$P_V = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{V0}} \geq 0.3$$

Eine Ventilautorität  $P_V \geq 0,5$  gilt streng genommen auch hier als Zielwert, bei Durchgangsventilen muss jedoch oft der Grenzwert  $P_V \geq 0,3$  gewählt werden. Der Druckabfall über dem offenen Durchgangsventil bei 100 % Durchfluss ( $\Delta p_{V100}$ ) muss mindestens 30 % der maximal auftretenden Druckdifferenz (oder mindestens 3000 Pa betragen) über dem geschlossenen Ventil sein, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt ( $\Delta p_{V0}$ ):

$$\Delta p_{V100} \geq 0.3 \Delta p_{V0}$$

Beziehungsweise mindestens 5...20 kPa, je nach Anwendung:

- Druckloser Verteiler: 3 kPa
- Druckarmer Verteiler (1 Gruppe): 5...20 kPa
- Druckarmer Verteiler (2+ Gruppen): 20...50 kPa
- Einspritz- und Drosselschaltung: 10...20 kPa

Da sich der notwendige Druckabfall  $\Delta p_{V100}$  somit aus  $\Delta p_{V0}$  ergibt, reduziert sich das Problem auf die Frage, was als maximal auftretende Druckdifferenz über dem geschlossenen Ventil  $\Delta p_{V0}$  eingesetzt werden soll. Im ungünstigsten Fall (ungeregelte Pumpe) ist dies die maximale Förderhöhe der Pumpe bei nulldurchfluss, also ein sehr hoher Wert, speziell bei Pumpen mit steilen Kennlinien. Wesentlich tiefere Werte ergeben sich, wenn folgendes beachtet wird:

- Denjenigen Betriebspunkt exakt definieren, der als ungünstigster Fall für die maximal auftretende Druckdifferenz angenommen wird. (Auch kumulativ zu den übrigen Möglichkeiten).
- Fernleitungspumpe mit Konstant- oder Proportionaldruckregelung einsetzen. Dies ergibt eine vollständig flache respektive eine nach hinten geneigte Pumpenkennlinie (siehe Kapitel 3.5).
- Messort für die Differenzdruckregelung der Fernleitungspumpe im Wärmenetz anstatt über der Pumpe vorsehen (siehe Kapitel 3.5).
- Automatische Druckdifferenzregler beim Kunden einbauen. Der Sollwert solcher Regler lässt sich in der Regel zwischen 10 bis 100 kPa einstellen. Damit können zwar problemlos vernünftige Regelventilauslegungen realisiert werden, aber es sind auch grössere Anschlussdruckdifferenzen notwendig (siehe Kapitel 5.2.5.2).
- Sogenannte Kombiventile (druckunabhängige Regelventile) einbauen. Bei dieser Bauart sind Druckdifferenzregler ohne Hilfsenergie und Regelventil in einem Gehäuse realisiert. Die Druckdifferenzmessung für die hydraulische Regulierung des Ventils erfolgt hier direkt über dem Regelventil (siehe Kapitel 5.2.5.3).

#### Hinweis:

Oft werden mehrere Gruppen als Beimischschaltung druckdifferenzarm angeschlossen. Das heisst, jede Gruppenpumpe holt sich das Wasser über das Ventil und die Strecke mit variablem Durchfluss selbst. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage: «Wie gross darf die Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss maximal sein?» Wenn nämlich diese Druckdifferenz allzu gross wird, beeinflussen sich die einzelnen Gruppen (Pumpen) gegenseitig. Um dies zu verhindern gilt es, zusätzlich zur Regel über die Ventilautorität, die nachfolgende Regel einzuhalten:

Wenn mehrere Gruppen druckdifferenzarm als Beimischschaltung angeschlossen werden, dann darf die maximale Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss nicht grösser als 20 % der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe im Auslegepunkt sein.

## 5.2.5 Systeme bei variablen Netzen

Energieeffiziente hydraulische Systeme sind so geplant und gebaut, dass viele Teilstrecken mit einem variablen Massenstrom durchströmt werden. Dies bedeutet, dass der geförderte Massenstrom auf die Betriebsverhältnisse reagiert und in der Folge auch die Umwälzpumpe die Drehzahl anpasst. In diesem Kapitel wird das Verhalten des hydraulischen Systems erläutert, wenn bei Verbrauchern die Regelventile öffnen und schliessen.

In hydraulischen Systemen können die Druckverhältnisse zwischen einzelnen Verbrauchern und Strängen stark schwanken, je nachdem, welchen Leistungsbedarf die einzelnen Verbraucher benötigen. Es ist daher notwendig, in den einzelnen Anlagenabschnitten gleichmässige Druckverhältnisse herzustellen, unabhängig vom Bedarf der einzelnen Verbraucher. Im Primärkreislauf eines thermischen Netzes ist die Unterstation ein Beispiel für einen derartigen Verbraucher. Beispiele im Sekundärkreislauf sind Steigstränge, Heizkörper, Deckenkühlflächen, Fussbodenheizungsverteiler, Fancoils, Induktionsgeräte oder Lufterhitzer.

Details sind in [180] ausgeführt und daraus nachfolgend zusammengefasst.

### 5.2.5.1 Statischer hydraulischer Abgleich

Beim statischen hydraulischen Abgleich besteht eine Aufgabenteilung zwischen:

- dem **Reguliertventil** mit einer klar regeltechnisch ausgerichteten Aufgabe und
- dem **Abgleichventil** mit einer klar hydraulischen Aufgabe des statischen Abgleichs.

Das statische Abgleichventil (Strangreguliertventil) dient zur manuellen Einregulierung von hydraulischen Systemen. Die Ventile verfügen über eine integrierte Voreinstellfunktion zur präzisen Bestimmung der Durchflussmenge und haben dabei feste Voreinstellungen. Die Merkmale des statischen Abgleichs sind:

- Der statische hydraulische Abgleich verursacht im Teillastbetrieb in Kälte- und Wärmeversorgungen Unter- und Überversorgung der Verbraucher.
- Im Teillastbereich beeinflussen die unterschiedlichen Massenströme die Rücklauftemperaturen auf den Wärmeerzeuger.
- Es kann durch hohe Überversorgung ein Ansteigen (grosser Massenstrom, kleines  $\Delta T$ ) und durch Unterversorgung (kleiner Massenstrom, grosses  $\Delta T$ ) ein Abfallen der Rücklauftemperatur zur Folge haben.
- Je nach hydraulischer Einbindung des Wärmeerzeugers kann dies einen Einfluss auf den Wirkungsgrad oder die Vorlauftemperatur haben.
- Die Netze können im Teillastfall ausgeglichener gestaltet werden, wenn die Pumpen auf Druck = konstant reguliert werden. Diese Massnahme geht jedoch zu Lasten der Energieeffizienz und des Strombedarfs für die Umwälzpumpe.

Wegen den grundlegenden Nachteilen ist die Art von Hydraulik mit statischem Abgleich und Regulierung nicht mehr zeitgemäss, weder für thermische Netze noch für die interne Wärmeverteilung.

### 5.2.5.2 Hydraulischer Abgleich mit automatischen Differenzdruckregler

Heutzutage werden in Wärmenetzen oft automatische Druckdifferenzregler eingebaut. Der Sollwert solcher Regler lässt sich in der Regel zwischen 10 bis 100 kPa einstellen. Damit können problemlos vernünftige Regelventilauslegungen realisiert werden, aber es sind auch grössere Anschlussdruckdifferenzen notwendig. Für die Auslegung der Druckdifferenzregler und Regelventile ist aber entscheidend, wie gross die Druckdifferenzschwankungen im Wärmenetz sind. Entscheidend dafür ist die Distanz zum massgebenden, in der Regel dem weitest entfernten Kunden. Daraus ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Der Einsatz von Druckdifferenzregler ohne Hilfsenergie ist sinnvoll, wenn bei jedem Kunde klar definierte Druckverhältnisse herrschen sollen.
- Wärmeübertrager am ungünstigsten gelegenen Kunde auf einen möglichst kleinen Druckabfall auslegen. Druckabfall über dem Regelventil entsprechend einer Ventilautorität 0,3...0,5 auslegen.
- Maximal mögliche Druckdifferenz über dem fast geschlossenen Druckdifferenzregler, der gerade zu öffnen beginnt, realistisch berechnen:
  - Bei kleinen Wärmenetzen den theoretisch möglichen Höchstwert zur Berechnung der Ventilautorität verwenden und eine genügend hohe Ventilautorität  $\geq 0,2$  bis  $0,3$  realisieren.
  - Bei grossen Wärmenetzen, bei denen die vielen angeschlossenen Kunden zusammen eine mehr oder weniger gleichmässige witterungsabhängige Last ergeben, kann mit einem tieferen Wert für die maximal auftretende Druckdifferenz gerechnet werden (z.B. 50 %) oder eine entsprechend schlechtere Ventilautorität (z.B.  $\geq 0,1$  bis  $0,15$ ) akzeptiert werden.
- Bei näher gelegenen Kunden genügend Druckabfall über dem geöffneten Druckdifferenzregler vorsehen (Auslegefall), weil dort immer eine genügend grosse Anschlussdruckdifferenz zur Verfügung steht.
- Bei Anlagen mit Druckdifferenzmessung im Netz oder Pumpen mit Proportionaldruckregelung kann es bei kleiner Last der Gesamtanlage vorkommen, dass Kunden am Anfang des Netzes plötzlich zu wenig Druckdifferenz für den Vollastfall haben. Hier ist es sinnvoll, die Ventilautorität nicht unnötig hoch zu wählen.

Beim hydraulischen Abgleich mit einem automatischen Differenzdruckregler besteht folgende Aufgabenteilung:

- dem **Reguliertventil** mit einer klar regeltechnisch ausgerichteten Aufgabe und
- einem **dynamischen Abgleichventil** mit einer klar hydraulischen Aufgabe des hydraulischen Abgleichs in jedem Betriebsfall.

- mit jedem automatischen Differenzdruckventil wird der **Druck über dem Verbraucher** und dem Regelventil in jedem Betriebsfall (Teillastbetrieb) **konstant** gehalten.

Automatische Differenzdruckregler sichern somit einen konstant einstellbaren Differenzdruck über einen Anlagenabschnitt. Automatische Differenzdruckregler begrenzen den Differenzdruck nicht nur unter Auslegebedingungen, sondern auch bei Teillast.

Durch die Regelung des Drucks im Teillastfall lassen sich Durchflussgeräusche in Armaturen vermeiden. Die Regelung des Differenzdrucks erlaubt den nachfolgenden Regelarmaturen, zum Beispiel Thermostatventile, eine höhere Ventilautorität und somit eine präzisere und stabilere Temperaturregulierung sowie Energie zu sparen.

Die wichtigsten Merkmale des hydraulischen Abgleichs mit automatischen Differenzdruckregler sind:

- Der Abgleich verursacht praktisch keine Unter- und Überversorgung.
- Der automatische Differenzdruckregler übernimmt den hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb und reagiert auf die Massenstromveränderungen.
- Die Regulierung der Wärmeübertrager oder Gruppen bei Wärmeabgabesystemen muss weniger auf die hydraulische Veränderung reagieren und regulieren stabiler und energieeffizienter.
- Die unterschiedlichen Massenströme haben einen geringen Einfluss auf die Rücklauftemperaturen und somit auf den Wärmeerzeuger.
- Der Wirkungsgrad oder die Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger wird nicht durch unkorrekten hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb beeinflusst.
- Der Pumpenregelkennlinie ist grosse Bedeutung zu schenken, damit im Teillastverhalten die Verbraucher mit grossem Kälte- und Wärmebedarf nicht einem zu geringen Druck ausgesetzt und damit unterversorgt werden.

### 5.2.5.3 Hydraulischer Abgleich mit differenzdruckunabhängigem Regelventil (Kombiventil)

Kombiventile haben den Vorteil, dass Druckdifferenzregler und Regelventil preisgünstig in einem einzigen Gehäuse untergebracht sind. Ansonsten gelten die obigen Ausführungen zum automatischen Druckdifferenzregler mit dem Unterschied, dass die Druckdifferenzmessung direkt über dem Regelventil erfolgt. Damit ist die Ventilautorität des Regelventils nur vom P-Band des Druckdifferenzreglers abhängig. Der gesamte Druckabfall über dem Kombiventil setzt sich somit wie folgt zusammen:

$$\Delta p_{\text{Kombiventil}} = \Delta p_{\text{Regelventil}} + \Delta p_{\text{Druckdifferenzregler}}$$

Die Druckdifferenz über dem Regelventil ist durch den Hersteller fest vorgegeben (z. B. 20 kPa), und der Druckabfall über dem Druckdifferenzregler ist durch dessen  $K_{vs}$ -Wert gegeben. Auch hier gilt, dass bezüg-

lich des Druckdifferenzreglers eine minimale Ventilautorität eingehalten werden muss.

Mit dem hydraulischen Abgleich mit differenzdruckunabhängigen Regelventilen (Kombiventil) wird nicht mehr zwischen der Aufgabenteilung des Regelventils und einem Abgleichventil betrachtet. In diesem System sind die regelungstechnischen und hydraulischen Funktionen in einem dynamischen Ventil integriert. Mit dem Kombiventil wird der Druck über dem Verbraucher und dem Regelventil in jedem Betriebsfall (Teillastbetrieb) mit einem Ventil konstant gehalten.

Der Differenzdruckregler hält einen konstanten Differenzdruck über dem Regelventil. Das Regelventil weist dabei eine lineare Charakteristik auf und verfügt über eine Voreinstellung des  $K_V$ -Wertes in Form einer maximalen Begrenzung des Ventilhubes.

Wie oben beschrieben wird die Druckdifferenz über das Regelventil konstant gehalten. Der Druckverlust über dem Regelventil ist demnach im Auslegefall und in allen Teillastfällen konstant. In der Folge kann von einer konstanten Ventilautorität  $PV = 1.0$  ausgegangen werden. Der Druckabfall über den variablen Teil der Teilstrecke ist nicht relevant, weil der Druckabfall über das Regelventil konstant gehalten wird.

Die wichtigsten Merkmale des hydraulischen Abgleichs mit Kombiventilen sind:

- Der Abgleich verursacht praktisch keine Unter- und Überversorgung der Verbraucher.
- Das differenzdruckunabhängige Regelventil übernimmt den hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb und reagiert auf die Massenstromänderungen.
- Die Regulierung der Wärmeübertrager oder Gruppen bei Wärmeabgabesystemen muss nicht auf die hydraulische Veränderung reagieren und regulieren stabiler und energieeffizienter.
- Die unterschiedlichen Massenströme haben keinen negativen Einfluss auf die Rücklauftemperaturen und somit auf den Wärmeerzeuger.
- Der Wirkungsgrad oder die Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger wird nicht durch unkorrekten hydraulischen Abgleich im Teillastbetrieb beeinflusst.
- Der Pumpenregelkennlinie ist grosse Bedeutung zu schenken, damit im Teillastverhalten die Verbraucher mit grossem Kälte- und Wärmebedarf nicht einem zu geringen Druck ausgesetzt und damit unterversorgt werden.
- Die technischen Daten von Geräten aller Hersteller sollten von einem neutralen Messinstitut verifiziert und veröffentlicht sein.

#### 5.2.5.4 Hydraulischer Abgleich mit elektronisch druckunabhängigem Regelventil

Elektronisch druckunabhängige Ventile besitzen keinen integrierten Differenzdruckregler. Anstelle dessen wird der effektive Durchfluss in Echtzeit gemessen. Abweichungen zwischen Soll- und Istwert können so detektiert werden und durch entsprechende Veränderung der Ventilöffnung ausgeglichen werden.

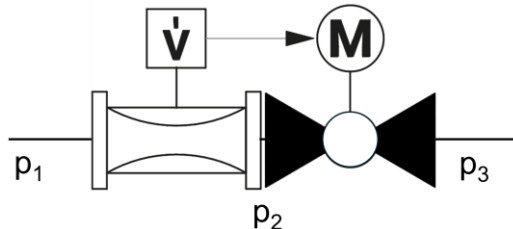


Bild 5.5 Symbol eines elektronisch druckunabhängigen Regelventils.

Ein Durchflussmesser nach dem Prinzip der Ultraschallzeitmessung misst permanent die effektiv im System fließende Wassermenge. Eine Abweichung zwischen dem gewünschten Sollwert und dem effektiven Istwert wird von der in der Ventiltriebseinheit integrierten Logik erkannt. Allfällige Abweichungen werden durch Widerstandsänderung ausgeglichen, durch öffnen oder schliessen am Regelventil (Regelkugelhahn).

Bei elektronisch druckunabhängigen Regelventilen wird der Differenzdruck zwischen  $p_2 - p_3$  nicht konstant gehalten. Durch die entsprechende Anpassung des  $K_v$ -Wertes werden Druckschwankungen ausgeglichen. Die bei den mechanisch druckunabhängigen Regelventilen (Kombiventile) gemachten Überlegungen bezüglich Ventilautorität gelten auch für die elektronisch druckunabhängigen Regelventile.

Vorteile:

- **Geringerer minimal benötigter Differenzdruck:** Aufgrund des Wegfalls des mechanischen Differenzdruckreglers ist der Druckabfall typischerweise geringer. Der notwendige Differenzdruck für einen druckunabhängigen Betrieb nimmt bei Teillast nochmals weiter ab, während der Wert bei einer mechanischen Lösung konstant bleibt.
- **Durchflusswert:** Der gemessene Durchflusswert steht als Auslesewert in Echtzeit zur Verfügung und kann entsprechend im Leitsystem visualisiert werden.
- **Pumpenoptimierung:** Dank der Rückmeldung der Ventilöffnungsposition in einem System, kann für jeden Lastfall der optimale Betriebspunkt der Pumpe gewählt werden.
- **Einfaches Spülen des Systems:** Keine Engstellen verhindern die Ablagerung von Verschmutzungen und ermöglichen dank des freien Querschnitts das einfache Spülen des Systems.
- **Einzigartige Möglichkeiten:** Mit der zusätzlichen Messung der Vor- und Rücklauftemperatur können auch die Leistungsaufnahme und die Energiemenge bestimmt werden.

#### 5.2.5.5 Vergleich der Systeme zum hydraulischen Abgleich

##### Über- oder Unterversorgung

Die Systeme mit automatischem Differenzdruckregler, Kombiventil oder elektronisch druckunabhängigen Regelventile ergeben praktisch keine Unter- oder Überversorgung durch den Massenstrom. Somit unterscheidet sich die Temperaturdifferenz und als Folge auch die Rücklauftemperatur im Teillastbetrieb nicht vom Sollwert. Die Wärmeerzeuger können ohne Energieeffizienzverlust betrieben werden.

##### Pumpendruck

Die Systeme mit automatischem Differenzdruckregler oder Kombiventil benötigen in etwa die gleichen Förderdrücke und elektrische Leistungsaufnahme der Pumpen. Somit können beide Systeme mit etwa den gleichen energieeffizienten Pumpen ausgerüstet werden. Noch vorteilhafter sind elektronisch druckunabhängige Regelventile, welche praktisch keine Querschnittsverengungen aufweisen und somit deutlich geringere Differenzdrücke aufweisen. Systeme mit statischem Abgleich brauchen viel höhere Pumpenleistungen und damit höhere Stromaufnahme. Unsachgemäße hydraulische Auslegung führt deshalb zu hohem Stromverbrauch.

##### Pumpenregelkennlinie

Systeme mit automatischem Differenzdruckregler, Kombiventil oder elektronisch druckunabhängigen Regelventile können in der Regel mit proportional geregelten Pumpenregelkennlinien betrieben werden, wobei dem Minimalförderdruck im Teillastbereich bei allen Verbrauchern genügend Beachtung geschenkt werden muss.

Systeme mit statischem Abgleich können in der Regel mit konstant geregelten Pumpenregelkennlinien betrieben werden (Tabelle 5.2). Dadurch kann eine Unterversorgung bei den Verbrauchern zwar vermieden werden. Dieses hydraulische System sollte in modernen variablen Massenstromsystemen jedoch nicht eingesetzt werden.

Tabelle 5.2 Pumpenregelkennlinien bei den verschiedenen Regel- und hydraulischen Abgleichssystemen.

| Hydraulischer Abgleich                     | Pumpenregelkennlinie |
|--------------------------------------------|----------------------|
| statischer Abgleich                        | konstant             |
| automatischer Differenzdruckregler         | proportional*        |
| Kombiventil                                | proportional*        |
| Elektronisch druckunabhängiges Regelventil | proportional*        |

\*Minimalförderdruck im Teillastfall beachten

### Volumenstrombedarf bei Teillast

Die Systeme Kombiventil oder elektronisch druckunabhängigen Regelventil benötigen im Teillastbetrieb einen kleineren Volumenstrom als automatische Differenzdruckregler. Somit kann aufgrund des reduziert notwendigen Volumenstroms elektrische Pumpenergie eingespart werden.

Systeme mit statischem Abgleich sind hydraulisch ineffizient und in modernen variablen Massenstromsystemen nicht weiter einzusetzen.

Für hydraulische Systeme, in denen Armaturen mit einer minimal notwendigen Druckdifferenz eingebaut sind, ist zu klären, ob diese Druckdifferenzen auch im Teillastbetrieb einzuhalten sind. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Pumpenregelkennlinie.

Teilsysteme einer Gesamtanlage können auch im Teillastbetrieb der Gesamtanlage nahe dem Auslegepunkt arbeiten und somit fast den Auslegevolumenstrom benötigen. Somit kann bei zu tiefer Pumpenregelkennlinie bei allen hydraulischen Systemen eine Unterversorgung eintreten.

Der Wahl der Pumpenregelkennlinie und deren Parametrierung muss in variablen hydraulischen Systemen erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

## 5.3 Warmwassererwärmung

### 5.3.1 Allgemein

Die Erwärmung von Trinkwasser mit einem thermischen Netz ist ganzjährig möglich, sofern das Netz das ganze Jahr mit der für die Warmwassererwärmung notwendigen Temperatur betrieben wird. Bei der Umsetzung von Warmwasserversorgungsanlagen mit Trinkwasser in Gebäuden sind die Normen SIA 385/1 [181] und SIA 385/2 [182] anzuwenden. Daneben sind Richtlinien und Empfehlungen von swisstec und SVGW zu berücksichtigen. Hilfreich bei der Planung von Warmwasserversorgungsanlagen sind auch Grundlagenwerke wie zum Beispiel *Gebäudetechnik – Systeme integral planen* [61].

Bei der Warmwassererwärmung durch ein thermisches Netz sind zusätzlich folgende Punkte zu beachten:

- Vorgaben der Technischen Anschlussvorschriften (TAV) des Energieversorgers.
- Zur Verfügung stehende primäre Vorlauftemperaturen (bei gleitender oder gleitend-konstanter Betriebsweise).
- Einhalten einer maximal zulässigen primären Rücklauftemperatur in allen Betriebszuständen.

Das System der Warmwassererwärmung ist daher auf die minimale primärseitige Vorlauftemperatur (Übergangszeit und Sommer) und auf eine möglichst tiefe primärseitige Rücklauftemperatur respektive auf die maximale primärseitige Rücklauftemperatur auszulegen. Dies betrifft insbesondere die Dimensionierung des

Wärmeübertragers (Grädigkeit bei der Warmwassererwärmung), die Regelung, die hydraulische Einbindung und die Art und Weise der Warmwassererwärmung.

Folgendes ist gemäss SIA 385/1 [181] bei der Auslegung und Planung der Warmwasserversorgung und Warmwassererwärmung grundlegend zu beachten (vgl. [183]):

1. **An jeder Entnahmestelle muss die Temperatur des entnommenen Warmwassers nach der siebenfachen Ausstosszeit bei voll geöffneten, ganz auf warm eingestellter Entnahmearmatur, mindestens 50°C erreicht werden.**
2. Die Anlage muss so geplant und gebaut werden, dass **in allen Zirkulationssträngen 55°C (52°C) erreicht werden kann**. Das bedeutet, dass im Zirkulationsrücklauf nicht konstant mindestens 55°C (52°C) erreicht werden müssen. Die Anlage muss lediglich dazu fähig sein und das System muss so eingestellt sein, dass an der Zapfstelle 50°C erreicht werden (siehe Punkt 1).
3. Bei der Inbetriebnahme ist dies nachzuweisen.

Es wird empfohlen, den Sanitärplaner bei der Umsetzung miteinzubeziehen.

Tabelle 5.3 Typologie der Warmwasserversorgungen (vgl. SIA 385/1 [181], Tabelle 1).

| Typ | Definition                                                                                                                                                         | Entsprechende Bezeichnung in CEN/TR 16355 |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| LS  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• warmgehaltene Trinkwasserleitungen sind vorhanden</li> <li>• Speicher enthält, auch nur teilweise, Trinkwasser</li> </ul> | C.4                                       |
| L0  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• warmgehaltene Trinkwasserleitungen sind vorhanden</li> <li>• kein Trinkwasser enthaltender Speicher</li> </ul>            | C.2                                       |
| 0S  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine warmgehaltene Trinkwasserleitung vorhanden</li> <li>• Speicher enthält, auch nur teilweise, Trinkwasser</li> </ul>  | C.3                                       |
| 00  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine warmgehaltene Trinkwasserleitung vorhanden</li> <li>• kein Trinkwasser enthaltender Speicher</li> </ul>             | C.1                                       |

### Warmwasserversorgungen mit warmgehaltenen Trinkwasserleitungen (Typ LS oder L0):

Die Warmwasserversorgung sollte so geplant und installiert werden, dass das Wasser in allen warmgehaltenen Trinkwasserleitungen eine Temperatur von mindestens 55°C aufweisen kann. Die benötigte Trinkwassertemperatur am Austritt des Speichers (Typ LS) bzw. des Wärmeübertragers (Typ L0) wird so anhand der berechneten Wärmeverluste ermittelt.

Erfolgt die Warmhaltung durch ein Zirkulationssystem, ist ein hydraulischer Abgleich der Stränge erforderlich, um die Temperatur in jedem einzelnen Teilstrang einzuhalten. Details zum Anschluss von Warmwasserverteilern und Ausstossleitungen sind der SIA 385/1 [181] zu entnehmen.

### **Warmwasserversorgungen ohne warmgehaltene Trinkwasser-Verteilungen (Typ 0S oder 00):**

Bei einem Trinkwasserspeicher (Typ 0S) sollte am Austritt des Speichers die Temperatur von mindestens 55°C eingehalten werden können. Details zu angeschlossenen Warmwasserverteilern sind der SIA 385/1 [181] zu entnehmen.

Ohne Trinkwasserspeicher (Durchflusswassererwärmer, Typ 00) sollte beim sekundären Austritt des Wärmeübertragers die Temperatur von mindestens 52°C während den Entnahmen eingehalten werden können (Anschlüsse mit Wärmesiphons gemäss SIA 385/1 [181]). Wenn der Wärmeübertrager wärmegeklämt wird (für kürzere Ausstosszeiten), sollte bei seinem sekundären Austritt die Temperatur von mindestens 52°C jederzeit eingehalten werden können.

### **5.3.2 Varianten der Warmwassererwärmung**

Es gibt für die Warmwassererwärmung grundsätzlich drei verschiedene Varianten, welche direkt am thermischen Netz (primärseitig) oder indirekt (sekundärseitig) über einen Wärmeübertrager angeschlossen werden können:

- Durchflusswassererwärmer (Frischwasserstation)
- Speicherwassererwärmer (mit internem Wärmeübertrager)
- Warmwasserspeicher mit externem Wärmeübertrager.

Die **Durchflusswassererwärmer** oder sogenannte Frischwasserstationen sind sehr platzsparend, wenn kein Wärmespeicher (Bereitschaftsspeicher) eingesetzt wird. Der Wärmeübertrager muss entsprechend ausgelegt werden, um den Spitzenbedarf abdecken zu können. Durch einen vorgeschalteten Wärmespeicher können der relativ hohe Leistungsbedarf und die dadurch hervorgerufene Lastspitze gedämpft werden.

Vorteile bieten Frischwasserstationen auch bei der Legionellenprophylaxe. Für eine Frischwasserstation ist ein geeigneter elektronischer Regler und ein direkter Temperaturfühler im Medium (ohne Tauchhülse) erforderlich. Die Zirkulation wird bei Warmwasserbezug permanent wieder auf den Sollwert (z. B. 60°C) erwärmt. Die Zirkulation wird in die Kaltwasserleitung vor dem Wärmeübertrager eingebunden. Bei Sondersystemen mit zwei Wärmeübertragern (Vorwärmer und Nachwärmer) wird die Zirkulation zwischen die Wärmeübertrager eingebunden.

Mit einem Wärmespeicher kann zusätzlich die Möglichkeit der Rücklaufumschaltung in die mittlere Hälfte des Wärmespeichers vorgesehen werden. Das verbessert die Rücklauftemperatur insbesondere bei der Zirkulationsnachheizung.

Die **Speicherwassererwärmer mit internem Wärmeübertrager (Heizregister)** sind eine kostengünstige Lösung zur Versorgung von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern sowie Bürogebäuden mit Warmwasserbedarf. Bei sehr hartem Wasser kann dieses Prinzip auch

zur Erwärmung grösserer Warmwassermengen (z. B. in Mehrfamilienhäusern) angewendet werden. Für die Warmwassererwärmung wird als Wärmeübertrager in der Regel ein Rohrregister im Wärmespeicher verwendet. Die Wärmeübertragung erfolgt direkt im Wärmespeicher mit dem Rohrregister. Eine besonders effektive Speicherart für die Warmwassererwärmung sind Doppelmantelspeicher. Aufgrund der grösseren Wärmeübertragerfläche und gegenüber Rohrregistern zeichnen sich diese Wärmespeicher durch hohe Wärmeübertragungsleistungen und kurze Aufheizzeiten aus.

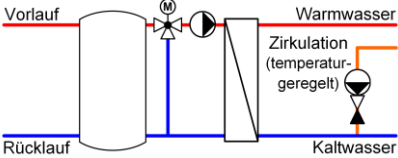
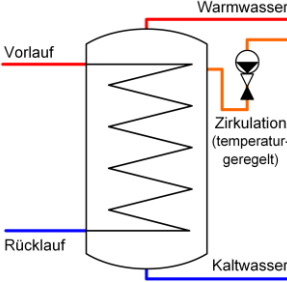
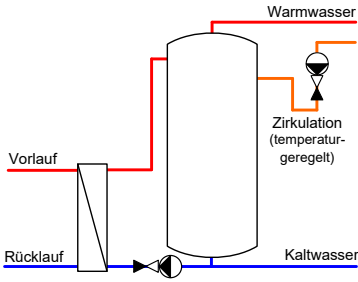
Nachteilig sind die ansteigenden Rücklauftemperaturen während des Ladevorgangs und die Wärmeverluste des Wärmespeichers. Tiefe Rücklauftemperaturen können folgendermassen erreicht werden:

- Den Wärmespeicher grosszügig dimensionieren und den Temperaturfühler für das Aus-Signal oberhalb des Heizregisters positionieren.
- Gross bemessenes Heizregister oder Doppelregister, welches über den ganzen Speicher verläuft (oben nach unten).
- Mit drehzahlgeregelten Ladepumpen, welche gegen Ende der Speicherladung den Volumenstrom reduzieren, womit tiefe Rücklauftemperaturen erreicht werden können.
- Die Zirkulation über einen kleinen externen Wärmeübertrager anschliessen.

Die **Warmwasserspeicher mit externem Wärmeübertrager (Speicherladesystem)** sind eine Kombination von Durchfluss- und Speichersystem. Die Warmwassererwärmung erfolgt mittels externem Wärmeübertrager. Der Wärmeübertrager lädt einen Wärmespeicher mit erwärmtem Trinkwasser. Wenn der Temperaturfühler (Ein) im Wärmespeicher unter den Sollwert sinkt, wird das System beladen. Dabei fördert die Speicherladepumpe das kalte Wasser aus dem tiefsten Punkt des Wärmespeichers in den Wärmeübertrager. Dort wird das Wasser auf die vorgegebene Speicherladetemperatur erwärmt. Das erwärmte Trinkwasser wird oben im Wärmespeicher eingepumpt und schichtet den Wärmespeicher somit von oben nach, bis der Temperaturfühler (Aus) seinen Sollwert erreicht hat. Bei hartem Trinkwasser wird die primäre Ladetemperatur des Wärmeübertragers auf 65°C bis 70°C begrenzt, so dass Verkalkungsausscheidungen im Wärmeübertrager minimiert werden. Dazu wird die Vorlauftemperatur mittels Rücklaufbeimischung geregelt.

Mit einem zusätzlichen in Serie geschalteten Wärmeübertrager zur Vorwärmung des Trinkwassers kann die primäre Rücklauftemperatur weiter abgesenkt werden. Dies bietet sich als Möglichkeit für alle drei oben genannten Varianten der Warmwassererwärmung an.

Tabelle 5.4 Varianten zur Warmwassererwärmung.

|                               | Durchflusswassererwärmer<br>(Frischwasserstation)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Speicherwassererwärmer<br>(mit internem Wärmeübertrager)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Warmwasserspeicher mit externem<br>Wärmeübertrager                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                |
| Beschreibung                  | <p>Beim Durchflusswassererwärmer wird das Warmwasser direkt zum Bedarfszeitpunkt über einen Platten-Wärmeübertrager erwärmt.</p> <p>Zur Reduktion der Lastspitzen wird ein vorgeschalteter Wärmespeicher empfohlen.</p> <p>Zusätzliche Möglichkeit der Rücklaufumschaltung in die mittlere Hälfte des Wärmespeichers (nicht eingezeichnet), zur Verbesserung der Rücklauftemperatur bei Zirkulationsnachheizung.</p> <p>Ein-/Aus-Fühler vorsehen.</p> | <p>Wassererwärmer in Form eines Behälters mit eingebauten Heizflächen, in denen das Trinkwasser erwärmt und gespeichert wird.</p> <p>Lastspitzen werden über den Wärmespeicher abgedeckt.</p> <p>Ein-/Aus-Fühler vorsehen</p> <p>Lademenge bei Volumen grösser 500 Liter variabel fahren.</p> <p>Auf grosses Register mit Schleife im Sumpf achten.</p> <p>Einbindung der Zirkulation auch über einen kleinen externen Wärmeübertrager möglich.</p> | <p>Diese Variante stellt eine Kombination von Durchfluss- und Speicherprinzip dar. Die Speicherladung erfolgt über einen externen Wärmeübertrager und Ladepumpe.</p> <p>Lastspitzen werden über den Wärmespeicher abgedeckt.</p> <p>Ein-/Aus-Fühler vorsehen.</p> |
| Vorteil                       | <p>Tiefe Rücklauftemperatur</p> <p>Geringer Platzbedarf (ohne Wärmespeicher)</p> <p>Verminderte Legionellenproblematik.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>Hohe Zapfmenge möglich</p> <p>Weniger empfindlich gegen Verschmutzung</p> <p>Geringe Anforderungen an die Regelung (gilt nicht bei variabler Lademenge im Heizregister).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                     | <p>Tiefe Rücklauftemperatur</p> <p>Hohe Zapfmenge möglich</p> <p>Kleine konstante Ladeleistung (Reduzierung des Anschlusswertes)</p> <p>Hoher Nutzungsgrad des Wärmespeichers.</p>                                                                                |
| Nachteil                      | <p>Hohe Anschlussleistung erforderlich (mit vorgeschaltetem Wärmespeicher vernachlässigbar)</p> <p>Benötigt eine gute Regelung</p> <p>Wärmeverluste mit vorgeschaltetem Wärmespeicher</p> <p>Empfindlich bei hohem Kalkgehalt und Verunreinigung im Trinkwasser.</p>                                                                                                                                                                                  | <p>Ansteigende Rücklauftemperatur während des Ladevorganges</p> <p>Wärmeverluste des Wärmespeichers</p> <p>Abnehmende Aufheizleistung während des Ladevorganges</p> <p>Nicht ideal für die Einbindung einer Zirkulationsleitung.</p>                                                                                                                                                                                                                | <p>Benötigt eine zusätzliche Regelung</p> <p>Wärmeverluste des Wärmespeichers</p> <p>Empfindlich bei hohem Kalkgehalt und Verunreinigung im Trinkwasser.</p>                                                                                                      |
| Mögliche Rücklauftemperaturen | < 30 °C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 45 °C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | < 35 °C                                                                                                                                                                                                                                                           |

### 5.3.3 Vorrang der Warmwassererwärmung

Je nach Gebäudetyp und Nutzungsart ist bei der Bestimmung der Anschlussleistung die Art der Warmwassererwärmung zu beachten. Vor allem wenn die Warmwassererwärmung über eine sogenannte Boilervorrangschaltung gemacht wird, ist der Leistungsbedarf für die Warmwassererwärmung nicht additiv zu berücksichtigen. Folgende drei Möglichkeiten der Vorrangschaltung sind zu unterscheiden:

- Kein Vorrang der Warmwassererwärmung
- Absoluter Vorrang der Warmwassererwärmung
- Reduzierter Heizbetrieb bei der Warmwassererwärmung.

Dabei sind die folgende Merkmale zu beachten:

**Ohne Vorrang** der Warmwassererwärmung werden die Warmwassererwärmung und der Heizkreis parallel betrieben. Primärseitig geregelte Heizkreise werden mit der gleichen Vorlauftemperatur betrieben wie die Warmwassererwärmung. Heizkreise mit tiefen Vorlauftemperaturen z. B. Fussbodenheizungen benötigen eine separate Heizkreisregulierung. Die erforderliche Anschlussleistung summiert sich aus dem Leistungsbedarf für Raumwärme im Auslegefall und dem Leistungsbedarf für die Warmwassererwärmung. Diese Variante wird bei Eigenheimen mit geringer Heizlast, bei Objekten mit durchgehendem 100 %-igen Betrieb der Heizung oder bei sehr schlecht wärmegeprägten Gebäuden eingesetzt.

Beim **absoluten Vorrang** der Warmwassererwärmung wird während der Warmwassererwärmung der Heizkreis abgeschaltet. Im Bedarfsfall wird bei einer zu langen Warmwassererwärmung diese für einen kurzen Zeitraum unterbrochen, um den Heizkreis zu versorgen. Es wird damit sichergestellt, dass der Heizkreis nicht zu stark auskühlt. Die Anschlussleistung ergibt sich aus der höheren Leistung (Leistungsbedarf für Raumwärme oder Warmwassererwärmung). Diese Art der Vorrangschaltung wird am häufigsten bei Eigenheimen angewendet. Nicht geeignet, wenn Lüftungsgruppen vorhanden sind.

Beim **reduzierten Heizkreisbetrieb** bei der Warmwassererwärmung wird der Heizkreis, nach Ablauf einer Zeitspanne und anstehender Regelabweichung im Warmwassererwärmungskreis, auf das Temperaturniveau der Nichtnutzungszeiten abgesenkt oder der Sollwert des Heizkreises wird minütlich bis auf 5°C reduziert. Es muss mindestens der Heizkreis mit einem Regelventil ausgerüstet sein.

### 5.3.4 Legionellen

Legionellen sind stäbchenförmige Bakterien und kommen natürlicherweise im Wasser vor. Legionellen können beim Menschen die Krankheit Legionellose verursachen. Die Krankheitsbilder reichen von milden grippeartigen Symptomen bis hin zu schweren Lungenentzündungen. Die Infektion erfolgt über die Atemwege, etwa wenn jemand legionellenhaltige Aerosole einatmet. Legionellenhaltiges Wasser zu trinken ist hingegen nicht gefährlich, weil die Magensäure die Bakterien abtötet (Gebäudetechnik – Systeme integral planen [61]). Wertvolle Informationen zu Legionellen und Legionellose sowie Empfehlungen für Präventionsmassnahmen enthalten die BAG/BLV-Empfehlungen [184].

Legionellen kommen natürlicherweise in Gewässern und feuchten Milieus vor, aber meist in geringen Mengen. In wasserführenden Anlagen hingegen finden sie oft günstige Bedingungen, denn sie vermehren sich vorwiegend im Biofilm bei Temperaturen von 25°C bis 45°C (Bild 5.6). Deshalb wird in der SIA 385/1 [181] an allen Entnahmestellen eine Mindesttemperatur von 50°C nach der siebenfachen Ausstosszeit verlangt. In den warmgehaltenen Leitungen (Zirkulationskreise und in Leitungen mit Warmhaltebändern) muss eine Mindesttemperatur von 55°C aufrechterhalten werden. Bei einem warmgehaltenen Verteilsystem wird in der SIA 385/1 [181] keine Speichertemperatur definiert. Diese muss dann je nach Wärmeverlusten der warmgehaltenen Leitungen bestimmt werden. Falls keine warmgehaltene Verteilung vorhanden ist, definiert die SIA-Norm eine Speichertemperatur von 55°C am Austritt des Warmwasserspeichers (siehe Kapitel 5.3.1).

Als Infektionsquellen kommen alle wasserführenden Anlagen infrage, bei denen sich Aerosole bilden können. Zu den wichtigsten Infektionsquellen im Trinkwasserbereich gehören:

- Grundsätzlich alle Entnahmestelle, besonders solche mit Aerosolbildung wie Duschen.
- Verdunstungskühltürme.
- Whirlpoolanlagen.
- Apparate zur direkten Raumluftbefeuchtung.

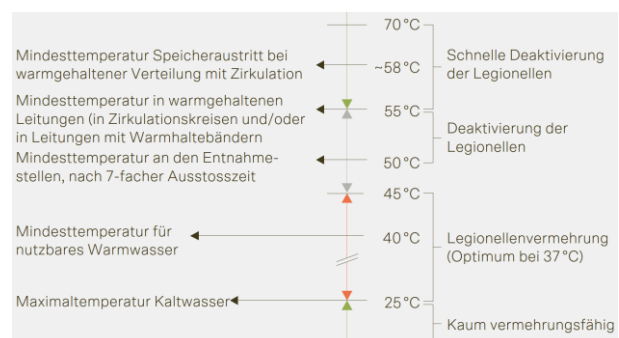


Bild 5.6 Einfluss der Warmwassertemperatur auf Legionellen und entsprechende Empfehlungen an die Auslegungstemperaturen gemäss SIA 385/1 [181] aus Gebäudetechnik – Systeme integral planen [61].

## 5.4 Übergabestation

### 5.4.1 Allgemein

Eine Übergabestation in einem thermischen Netz ist eine technische Anlage, die Wärme oder Kälte von einem Verteilnetz auf ein Gebäude, ein Areal oder ein anderes Netz abgibt oder übernimmt. Diese Anlage besteht typischerweise aus folgenden (wichtigsten) Komponenten: Wärmeübertrager, Energiezähler, Regelventil, Pumpen, Sensoren sowie Regel- und Steuerungstechnik.

Unabhängig davon, auf welchem Temperaturniveau oder für welchen Zweck eine Übergabestation ausgelegt wird, aus hydraulischer oder physikalischer Sicht sind alle gleich zu betrachten, vorausgesetzt es findet kein Phasenwechsel in der Übergabestation statt. Ob es sich um einen klassischen Fernwärmeanschluss (Hochtemperaturnetz) oder um einen Anschluss auf tiefem Temperaturniveau zum Heizen und Kühlen handelt (Niedertemperaturnetz, Anergienetz, Kältenetz etc.), hat jedoch direkten Einfluss auf die Auslegung einzelner Komponenten, auf die Materialisierung und auf die Komplexität der Einbindung. Je nach Anschlussleistung und Zweck stehen standardisierte Lösungen zur Verfügung. Bei grösseren Anschlussleistungen und erhöhter Komplexität, wie zum Beispiel mit Kombination von Wärme- und Kältebedarf, bei denen zusätzliche Wärmepumpen und/oder Kältemaschinen eingebunden werden, ist in der Regel ein anlagenspezifisches Engineering notwendig, um eine effiziente und gut funktionierende Übertragung sicherzustellen.

Für eine effiziente und sichere Versorgung gewährleisten Übergabestationen folgende wichtige Aufgaben:

- Messung der bezogenen Wärme- und/oder Kältemenge
- Regulierung des maximalen Leistungsbezugs
- Regulierung von Temperatur, Volumenstrom und Druck gemäss den Anforderungen der angeschlossenen Systeme (primär- und sekundärseitig)
- Hydraulische Trennung des Primärnetzes vom Sekundärnetz (bei einem indirekten Anschluss).

In den nachfolgenden Kapiteln werden praktisch ausschliesslich Übergabestationen für den «klassischen» Fernwärmeanschluss betrachtet, da diese das Gros der eingesetzten Anlagen in der Schweiz ausmachen. Neben den oben aufgeführten Kombinationen für den Wärme- und Kältebedarf wird ebenfalls nicht speziell auf Übergabestationen mit Phasenwechsel (Dampf) eingegangen.

Dennoch lassen sich viele der nachfolgenden Empfehlungen und Ausführungen auf andere Anwendungen übertragen. Je nach Situation, Zweck und Anlagenspezifikation gibt es Unterschiede in der Ausführung. Dies trifft zum Beispiel bei der Materialisierung zu, wenn statt Wasser ein Ethanol-Wasser-Gemisch eingesetzt wird oder bei der Kälteanwendung rostfreie Stahlrohre verwendet und gegen Kondensat anders gedämmt werden als klassische Fernwärmeleitungen.

### 5.4.2 Übersicht

«Klassische» Fernwärme-Übergabestationen gibt es in unterschiedlichen Kategorien. Die Bezeichnungen der einzelnen Produkte und der angebotene Leistungsbezug ist bei den einzelnen Herstellern und Lieferanten sehr unterschiedlich und teilweise unübersichtlich sowie schwer vergleichbar.

Im Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [185] wurden die Übergabestationen in drei grundlegende Kategorien eingeteilt:

- Standard Übergabestation
- Individuelle Übergabestation
- Sonderanfertigungen

Mit dieser Kategorisierung wird ein Grossteil der Anwendungsmöglichkeiten von Übergabestationen abgedeckt. Diese Einteilung hilft grob abzuschätzen, welche Produktkategorie in einem konkreten Fall einzusetzen ist. Allen Kategorien ist gemein, dass sie für eine indirekte oder direkte Anbindung ans thermische Netz konzipiert werden können.

Die massgebenden Randbedingungen werden grundsätzlich vom Anforderungsprofil des Kunden und den Bestimmungen in den Technischen Anschlussvorschriften vorgegeben.

In der Regel werden alle notwendigen Komponenten inklusive Elektroinstallation vormontiert, getestet und betriebsfertig ausgeliefert. Die Übergabestation muss vor Ort noch an die Versorgungsleitungen des thermischen Netzes und der Gebäudeinstallation angeschlossen werden. Die Stromversorgung erfolgt in der Regel über einen CEE-Stecker. Nur bei sehr grossen Anschlussleistungen oder bei sehr kleinen Einbringmassen werden die Übergabestationen vor Ort aufgebaut.

### 5.4.3 Standard Übergabestation

Als «Standard Übergabestation» werden an dieser Stelle Übergabestationen bezeichnet, die von Herstellern weitgehend standardisiert «ab Stange» angeboten und nicht von vornherein individuell auf Kundenwunsch angefertigt werden. Der Begriff umfasst viele in der Praxis verwendeten Produktbezeichnungen wie *Kompaktstation*, *Seriengerät*, *Grundmodul*, *Basic-Modul*, *Kompakt*, *Nano-Modul*, *EFH*, *giro* oder *TransTherm*.

Der Begriff *Kompaktstation* hat sich umgangssprachlich für Übergabestationen im kleinen Leistungsbereich etabliert, es muss jedoch erwähnt werden, dass auch grosse Übergabestationen möglichst kompakt gefertigt und ausgeführt werden und nicht per se nur für kleine Übertragungsleistungen gelten.

Eine Besonderheit der Standard Übergabestationen ist, dass sie von Planenden, Wärmeversorger, Installationsfirmen oder Kunden eigenständig bestellt und von der Lieferfirma auf Basis der Anforderungen (Temperatur, Druck, Volumenstrom, Druckverlust, Material etc.) konfiguriert und gefertigt werden.

Der Leistungsbereich von Standard Übergabestationen kann je nach Produktportfolio und wenn keine beson-

deren Anforderungen vorliegen, bis zu mehreren hundert kW betragen.

Im Leistungsbereich bis rund 150 kW werden Standard-Übergabestationen zum Teil inklusive der Hausstation in einem Gehäuse oder auf einem Gestell zur Wandmontage angeboten.

Im Leistungsbereich ab rund 150 kW werden sie vielfach auf Standrahmen und wenn notwendig in mehreren Baugruppen aufgebaut.

#### 5.4.4 Individuelle Übergabestation

Als individuelle Übergabestation werden Übergabestationen bezeichnet, die kundenspezifisch gefertigt werden und dort zum Einsatz kommen, wo eine Standard-Übergabestation die Anforderungen nicht abdecken kann. Individuell gefertigte Übergabestationen decken den gesamten Leistungsbereich ab und können praktisch alle erdenklichen Technischen Anschlussbedin-

gungen erfüllen. Der Übergang von Standard zu individuellen Übergabestationen ist je nach Hersteller und Lieferant unterschiedlich und daher fließend.

Vielfach erfolgt die Ausführung bodenstehend auf Stahlrahmen. Für den Transport und die Einbringung wird sie modular in Baugruppen gefertigt.

#### 5.4.5 Sonderanfertigungen

Sonderanfertigungen sind Lösungen, welche eher selten vorkommen und je nach Hersteller und Lieferant unterschiedlich gehandhabt werden. Es gibt Hersteller und Lieferanten, die auf Spezialanwendungen spezialisiert sind, während andere hauptsächlich Standard-Übergabestationen ausführen. Daher ist auch in dieser Kategorie je nach Hersteller und Lieferant der Übergang fließend.

Mögliche Sonderanfertigungen sind in der Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 5.5 Sonderanfertigungen.

| Anforderung                     | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dreileiter-Anschluss            | Ein Dreileiter-Anschluss bietet die Möglichkeit, die primären Rücklauftemperaturen im thermischen Netz zusätzlich zu senken.<br>Bedingung ist, dass eine Niedertemperaturanwendung aus dem Rücklauf einer Hochtemperaturanwendung versorgt werden kann.<br>Wenn die Temperatur aus dem Rücklauf nicht ausreicht, kann Vorlaufwasser zugemischt werden. Ein Dreileiter-Anschluss kann primär- oder sekundärseitig konzipiert werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Kaskadierte Warmwassererwärmung | Damit ist die Vorwärmung von Trinkwasser gemeint, welches z. B. über zwei in Serie geschaltete Wärmeübertrager erfolgen kann (z. B. bei der Nutzung von Abwärme aus Kälteanlagen zur Vorwärmung).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Strahlpumpen                    | Wärmeübergabestationen mit Strahlpumpen sind in der Schweiz nicht sehr verbreitet und werden als Sonderanfertigung betrachtet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Druckerhöhungsstationen         | Bei grossen thermischen Netzen kann es betrieblich und wirtschaftlich sinnvoll sein, in der Peripherie des Netzes eine Druckerhöhungsstation einzusetzen.<br>Damit kann einerseits der erforderliche Betriebsdruck reduziert werden und es können kleinere Netzpumpen eingesetzt werden. Zusätzlich kann je nach Situation auch eine höhere Nenndruckstufe vermieden werden.<br>Bei erhöhtem Leistungsbedarf (grösserem Volumenstrom) kommt die Druckerhöhungsstation zum Einsatz. Ab einem gewissen Teillastbetrieb ist die Druckerhöhungsstation nicht mehr in Betrieb.<br>Wenn es die Gegebenheiten zulassen, ist eine Druckerhöhungsstation eine Alternative zu einer Netztrennung, womit unnötige Exergieverluste vermieden werden können. Die Herausforderung liegt in der Regelung des Zu- und Wegschaltens der Anlage sowie die im Betrieb andere Differenzdruckregelung auf einen neuen Schlechtpunkt. |
| Netztrennung                    | Bei grossen geodätischen Höhenunterschieden sind zum Teil Netztrennungen wegen den statischen Druckverhältnisse notwendig. Der Betrieb ist aus technischer Sicht nicht komplex. Es bedarf jedoch einer guten Auslegung des Wärmeübertragers, damit eine kleine Grädigkeit (in allen Betriebspunkten) erreicht wird.<br>Neben den geodätischen Druckverhältnissen kann es auch bei einem grossen Unterschied zwischen Teil- und Vollast zu unzulässigen Druckverhältnissen im Netz kommen. Neben der oben beschriebenen Druckerhöhungsstation ist eine Netztrennung ebenfalls eine Möglichkeit dies zu lösen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Dampf                           | Fernwärmesysteme mit dem Wärmeträger Dampf sind in der Schweiz nicht sehr verbreitet. Entsprechende Übergabestationen werden als Sonderanfertigung betrachtet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

## 5.4.6 Minimalanforderungen Übergabestationen

### 5.4.6.1 Allgemein

Eine Übergabestation sollte bedienungs-, service- und wartungsfreundlich aufgebaut, den einschlägigen Normen und Richtlinien entsprechen und gemäss den Technischen Anschlussvorschriften des Wärmeversorgers ausgeführt sein.

In diesem Kapitel werden die Minimalanforderungen an eine indirekte Übergabestation beschrieben. Dazu werden die Ausrüstungskomponenten klar definiert sowie der Druckverlust und die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Übergabestation und die Anforderungen an die Dokumentation beschrieben. Richtpreise für Übergabestationen ab 10 kW bis 200 kW, welche die Minimalanforderungen erfüllen, sind im Anhang (Kapitel 12) zu finden.

Direkte Übergabestation kommen seltener zum Einsatz und nur da, wo es die besonderen Gegebenheiten zulassen (siehe dazu auch Kapitel 5.2.2.1).

### 5.4.6.2 Ausrüstung

Die folgenden Komponenten werden bei einer Übergabestation als minimale Ausrüstung empfohlen (Bild 5.7):

1. Absperrarmaturen im Vor- und Rücklauf
2. Sichtanzeige Temperatur (Thermometer) im Vor- und Rücklauf
3. Sichtanzeige Druck (Manometer) im Vor- und Rücklauf
4. Entlüftung im Vorlauf (oben) und Entleerung im Rücklauf (unten)
5. Schmutzfänger im Vorlauf vor dem Wärmeübertrager (primärseitig) sowie Schmutzfänger im Rücklauf vor dem Eintritt Wärmeübertrager (sekundärseitig)
6. Wärmeübertrager
7. Kombiventil inkl. Antrieb
8. Wärmezähler (Volumenmessteil, Temperaturmessung, Rechenwerk, Temperaturfühler im Vor- und Rücklauf)
9. Sicherheitsventil
10. Expansions- oder Ausdehnungsgefäss
11. Regelgerät für Vorlauftemperatur Sekundärseite
  - Temperaturfühler im Vorlauf sekundärseitig
  - Temperaturfühler im Rücklauf primärseitig
  - Temperaturfühler für Aussentemperatur (wenn witterungsgeführt, siehe Punkt 12)
  - Verbindung zum Kombiventil
12. Aussentemperaturfühler.

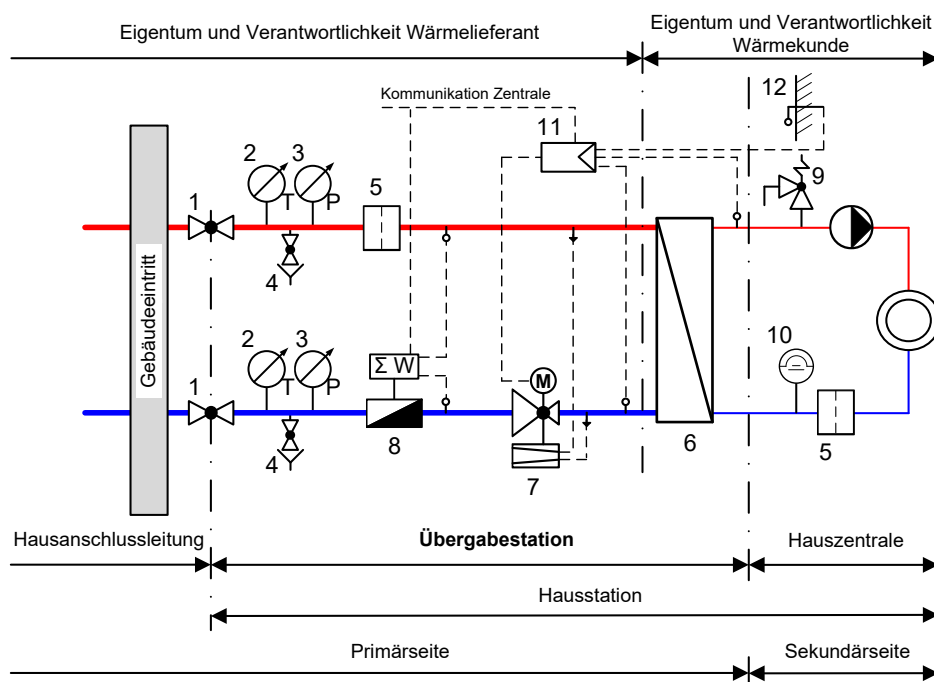


Bild 5.7 Minimalanforderung einer Übergabestation mit indirekter Wärmeübergabe inkl. empfohlener Grenze zwischen Eigentum und Verantwortlichkeit.

### 5.4.6.3 Druckverlust Übergabestation

Der Druckverlust der Übergabestation setzt sich aus Druckverlusten folgender Komponenten zusammen, von der Absperrarmatur im Vorlauf bis zur Absperrarmatur im Rücklauf:

- Schmutzfänger
- Wärmeübertrager
- Kombiventil
- Wärmezähler
- Gerade Leitungen und Bögen.

Der Druckverlust einer Übergabestation liegt im Bereich zwischen 50 kPa bis 100 kPa (0.5 bar bis 1.0 bar) und ist in der Tabelle 5.6 in Abhängigkeit der einzelnen Komponenten aufgeführt.

Tabelle 5.6 Zusammensetzung des Druckverlustes einer Übergabestation

| Komponente      | Druckverlustbereich in kPa |              |
|-----------------|----------------------------|--------------|
|                 | untere Grenze              | obere Grenze |
| Schmutzfänger   | 2                          | 5            |
| Wärmeübertrager | 10                         | 25           |
| Kombiventil     | 30                         | 45           |
| Wärmezähler     | 5                          | 20           |
| Leitungen       | 3                          | 5            |
| <b>Total</b>    | <b>50</b>                  | <b>100</b>   |

### 5.4.6.4 Maximale Strömungsgeschwindigkeit

Um störende Geräusche zu vermeiden sowie die Funktion und Langlebigkeit zu gewährleisten, sind in Hausanschlussleitungen bis zur Absperrarmatur nach der Hauseinführung maximale Strömungsgeschwindigkeiten in m/s respektive spezifische Druckverluste in Pa/m nach Tabelle 5.7 zu berücksichtigen. Zu berücksichtigen sind dabei auch längere Leitungsabschnitte (z. B. Kellerleitungen) im Gebäude bis zur Übergabestation.

Tabelle 5.7 Maximale Strömungsgeschwindigkeiten und spezifische Druckverluste in Hausanschlussleitungen.

| Nennweite | Hausanschlussleitung (primärseitig) |         |
|-----------|-------------------------------------|---------|
|           | m/s                                 | Pa/m    |
| DN 20     | 0.5                                 | ca. 145 |
| DN 25     | 0.6                                 | ca. 170 |
| DN 32     | 0.8                                 | ca. 200 |
| DN 40     | 1.0                                 | ca. 250 |
| DN 50     | 1.2                                 | ca. 260 |
| DN > 50   | 1.2                                 | < 200   |

### 5.4.6.5 Dokumentation

Um einen sicheren Betrieb und Unterhalt der Übergabestation zu gewährleisten, ist eine vollständige Dokumentation zu verfassen und mit Aktualisierungen zu unterhalten. Gemäss AGFW FW 509 - Anforderungen an Hausstationen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze [186] wird für die Dokumentation ein Aufbau in fünf Teilen mit folgenden Inhalten empfohlen:

#### Allgemeiner Teil:

- Firmenname und vollständige Anschrift des Herstellers sowie Kontaktperson
- Bezeichnung der Hausstation entsprechend der Angabe auf der Hausstation selbst (analog zum Typenschild) inkl. Seriennummer.

#### Montageanleitung:

- Masszeichnung mit Angabe der Aussen-, Montage- und Anschlussmasse
- Gewicht
- Befestigungsmittel
- Stückliste verwendeter Bauteile
- Prinzipschema Hydraulik
- Schaltschema Elektrik (Verdrahtungspläne, ggf. Schaltschrankpläne)
- Montage- und Inbetriebnahme-Ablauf
- Erforderliche Funktionsprüfung
- Warnhinweise und Verbote.

#### Bedienungsanleitung:

- Eine allgemeine Beschreibung der Hausstation mit Funktionsbeschreibung
- Erforderliche und zulässige Umgebungsbedingungen
- Datenblatt mit Angaben über den zulässigen Leistungsbereich, zulässige Medien, maximal zulässige Drücke und maximal zulässige Temperaturen
- Betriebsbedingungen
- Beschreibung bestimmungsgemässer Verwendung
- Verhalten bei Störungen, Defekten und Havarien
- Warnhinweise und Verbote
- Angabe zu Restrisiken.

#### Wartungsanleitung:

- Angaben zu Sicht- und Funktionsprüfung
- Beschreibung der erforderlichen Wartungsarbeiten
- Liste der Verschleisssteile
- Anleitung zum Öffnen und Schliessen von Besichtigungsöffnungen.

**Sonstige Unterlagen:**

- Teilezeichnungen der eingesetzten Komponenten für die Ersatzteilkhaltung
- CE-Konformitätserklärungen inkl. Gefahrenanalyse der Komponenten
- Konformitätserklärung der Baugruppe
- Nachweise und Ergebnisse der werksinternen und externen Prüfungen (Kopien).
- Angaben zu den Werkstoffen (ggf. Materialzeugnisse z. B. Rohre und Flansche)
- Angewendete Vorschriften, Gesetze, Normen.

Es muss sichergestellt werden, dass die Dokumentation an Veränderungen der technischen Anlagen im Rahmen des Unterhalts (Austausch von Baugruppen oder Anlagenteilen) sowie wiederkehrenden Prüfungen (z. B. Eichung der Wärmezähler) angepasst und aktuell gehalten wird. Das ist eine grundlegende Aufgabe des Wärmelieferanten.

Die Dokumentation ist zugänglich zu halten und der Inhalt ist an speziellen Schulungen an das Betriebspersonal etc. zu vermitteln. Neben der Dokumentation in schriftlicher Form ist auch der Kennzeichnung der Anlagenteile Sorge zu tragen. Die angebrachte Anlagenkennzeichnung sollte der Bezeichnung in der Dokumentation entsprechen.

**5.4.7 Komponenten und Funktionen**

In diesem Kapitel werden die Komponenten und technischen Grundlagen einer Hausstation (Übergabestation und Hauszentrale) beschrieben. Bei Anlagen im Einsatzbereich  $> 110^{\circ}\text{C}$  ist für die festigkeitsmässige Auslegung und Konformitätserklärung zudem die Druckgeräteverordnung zu beachten [87].

Die wichtigsten Anforderungen werden vom Wärmelieferanten in den technischen Anschlussvorschriften (TAV) festgehalten.

**5.4.7.1 Allgemein**

Die verschiedenen Komponenten müssen mit der CE-Kennzeichnung versehen sein (falls Kennzeichnungspflicht anwendbar). Sie müssen den entsprechenden Normen, Richtlinien und Vorschriften entsprechen. Die Hersteller und Lieferanten müssen nachweisen können, dass die verschiedenen Komponenten einfach zu warten und ersetzen sind und den erwarteten Leistungen entsprechen. Ersatzteile sollten für mindestens fünf Jahre nach der Lieferung verfügbar sein und die Lebensdauer der verschiedenen Komponenten darf unter normalen Bedingungen nicht weniger als zehn Jahre betragen. Die Dimensionierung muss entsprechend den Anforderungen des Betreibers und des Kunden erfolgen (vgl. [187]).

**5.4.7.2 Ausrüstung Hausanschlussraum**

Die Gestaltung des Hausanschlussraumes ist gemäss den in der Tabelle 5.8 aufgeführten Anforderungen auszuführen. Planungsgrundlagen sind in der DIN 18012 [188] festgehalten.

Die DIN 18012 fordert in Gebäuden mit mehr als vier Wohneinheiten einen eigenen Hausanschlussraum. Dies ist auf technischer Ebene auch auf die Schweiz übertragbar. Um die Technik vor unbefugten Zugriffen zu schützen, empfiehlt sich allerdings bereits bei drei Wohneinheiten ein Hausanschlussraum. Gleiches gilt für die Kombination aus Wohnen und Gewerbe (vgl. [189]). In Ein- und Zweifamilienhäusern kann auf einen separaten Hausanschlussraum verzichtet werden.

Die Hausanschlussräume sind über das Gemeinschaftseigentum zugänglich und liegen in der Regel an der Aussenwand. Die Anlagen sind vor Frost, mechanischer Beeinflussung und Kondensationswasser zu schützen (vgl. [189]).

Tabelle 5.8 Anforderungen an den Hausanschlussraum.

| Anforderung     | Beschreibung                                                                                                    |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lage            | Ideal ist eine Lage nahe an der Eintrittsstelle der Hausanschlussleitung.                                       |
| Zugang          | Der Raum sollte abschliessbar aber jederzeit zugänglich sein.                                                   |
| Dimensionen     | Durchgangshöhe Türe 2.00 m<br>Raumhöhe mindestens 2.10 m<br>Länge mindestens 2.00 m<br>Breite mindestens 1.50 m |
| Lärmemission    | Nicht in der Nähe von lärmsensiblen Räumen (z. B. Schlafzimmern)                                                |
| Lüftung         | Ausreichende Be- und Entlüftung                                                                                 |
| Raumtemperatur  | Maximal $30^{\circ}\text{C}$ (bei Warmwasser maximal $25^{\circ}\text{C}$ )                                     |
| Beleuchtung     | Installations-, Wartungs- und Reparaturarbeiten benötigen eine ausreichende Beleuchtung                         |
| Stromanschluss  | Elektrischer Anschluss gemäss Spezifikation Hersteller/Lieferant oder TAV                                       |
| Entwässerung    | Ausreichend dimensionierter Entwässerungskanal mit Absperrvorrichtung gegen Rückstau                            |
| Wasseranschluss | Von Vorteil ist eine Trinkwasserzapfstelle in der Nähe.                                                         |

**5.4.7.3 Wärmeübertrager**

Die Ausführung der Wärmeübertragung sollte prinzipiell im Gegenstromprinzip erfolgen. Alle wichtigen Auslegungskriterien und Anforderungen sind in den Technischen Anschlussvorschriften festzuhalten (Nenndruckstufe, Auslegungstemperatur, Grädigkeiten, Material, Wasserqualität etc.).

Die Hersteller müssen die Leistungsdaten des Wärmeübertragers angeben und auf Verlangen für jeden Typ von Wärmeübertrager eine Kopie des Prüfberichts vorlegen können. Wärmeübertrager müssen gemäss SN EN 1148 [190] geprüft und an die Auslegungstemperatur des thermischen Netzes angepasst werden.

Ob die Auslegungsdaten optimal gewählt wurden und ob der Wärmeübertrager später tatsächlich im gewünschten Bereich arbeitet, darum kümmert sich kaum

jemand. Deshalb lohnt es sich als Betreiber und/oder als Planer, sich grundsätzliche Überlegungen zur Auslegung von Wärmeübertragern und zu deren Abgleich zu machen.

Die **Übertragungsleistung eines Wärmeübertragers** ergibt sich wie folgt:

$$\dot{Q} = k A \Delta T_{\log}$$

$\dot{Q}$  = Übertragungsleistung in W

$k$  = Wärmedurchgangskoeffizient in  $W/(m^2 K)$

$A$  = Wärmeübertragungsfläche in  $m^2$

$\Delta T_{\log}$  = mittlere logarithmische Temperaturdifferenz in K

Der **Wärmedurchgangskoeffizient  $k$**  ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig:

- Aggregatzustand des Wärmeträgermediums (Gas, Dampf, Flüssigkeit)
- Stoffeigenschaften des Wärmeträgermediums (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Zähigkeit)
- Thermodynamische Zustandsgrößen des Wärmeträgermediums (Druck, Temperatur)
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Geometrische Form des Wärmeübertragers.

Diese Faktoren werden nur in Wärmeübertrager-Berechnungsprogrammen korrekt berücksichtigt, weshalb immer die Berechnung des Herstellers des Wärmeübertragers massgebend ist. Als Grössenordnung ergeben sich in etwa folgende Werte für Rohrbündel-Wärmeübertrager und Platten-Wärmeübertrager:

- Rohrbündel-Wärmeübertrager:  
400 bis 600  $W/(m^2 K)$
- Platten-Wärmeübertrager im Gegenstrom:  
800 bis 1'200  $W/(m^2 K)$

Die **mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\log}$**  beschreibt die effektiv treibende Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager. Sie berechnet sich aus den beiden Temperaturdifferenzen im Wärmeübertrager-Diagramm Bild 5.8 wie folgt:

$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right)}$$

$\Delta T_{\log}$  = mittlere logarithmische Temperaturdifferenz in K

$\Delta T_{\max}$  = grosse Temperaturdifferenz in K

$\Delta T_{\min}$  = kleine Temperaturdifferenz in K

Bei gleichen Temperaturdifferenzen (Division durch null) gilt:  $\Delta T_{\log} = \Delta T_{\max} = \Delta T_{\min}$

Grundsätzlich sind möglichst tiefe Vorlauftemperaturen (geringere Verluste, Vermeidung von Verkalkung bei der Warmwasserbereitung) und möglichst tiefe Rücklauftemperaturen (kleinere Förderleistung, bessere Nutzung des Speichers) erwünscht. Damit lassen sich aus den obigen Formeln einige grundsätzliche Erkenntnisse herleiten:

- Die Rücklauftemperatur wird möglichst tief, wenn die Differenz der Primärtemperatur und Sekundärtemperatur am kalten Ende des Wärmeübertragers möglichst klein ist.
- Die Vorlauftemperatur wird möglichst tief (Vermeidung Verkalkung bei BWB), wenn die Differenz der Primärtemperatur und Sekundärtemperatur am warmen Ende des Wärmeübertragers möglichst klein ist.
- Auf beiden Seiten des Wärmeübertragers wird also eine möglichst kleine Temperaturdifferenz (Vorlauf- und Rücklauf-Grädigkeit) angestrebt. Dies ergibt eine kleine logarithmische Temperaturdifferenz, und je kleiner diese ist, desto grösser muss grundsätzlich die Wärmeübertragerfläche bei gleichbleibender Übertragungsleistung sein.
- Die gewünschten Auslegewerte stellen sich nur ein, wenn Primär- und Sekundärdurchfluss des Wärmetauschers sorgfältig abgeglichen werden.

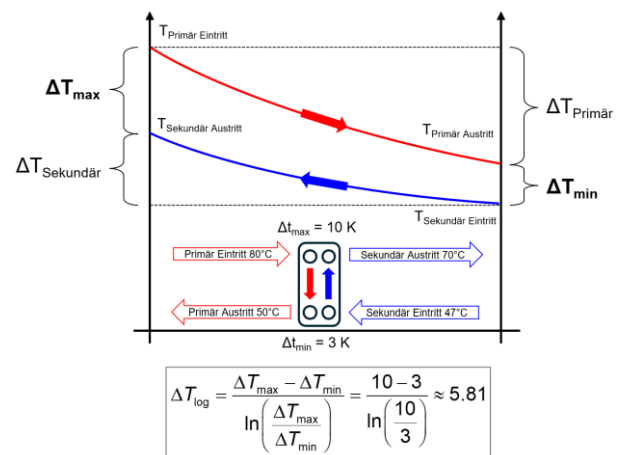


Bild 5.8 Wärmeübertrager-Diagramm für einen Platten-Wärmeübertrager im Gegenstrom-Prinzip mit Zahlenbeispiel zur Berechnung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz.

Eine **Rücklauf-Grädigkeit** von 3 K bei Auslegebedingungen (tiefste Aussentemperatur) sind als Auslegegrösse zu empfehlen und wirtschaftlich vertretbar. Im Teillastbereich wird dann oft eine Grädigkeit von  $\leq 3 K$  erreicht. Die Rücklauf-Grädigkeit ist der Temperaturunterschied zwischen dem primärseitigen Austritt und dem sekundärseitigen Eintritt beim Wärmeübertrager (siehe  $\Delta T_{\min}$  im Bild 5.8 auf der rechten Seite). Der Wärmeübertrager muss im Winter- und Sommerfall gemäss Randbedingungen und Anforderungen funktionieren, was anhand eines Datenblattes nachzuweisen ist. Im Teillastfall muss sichergestellt werden, dass die Strömung turbulent ist.

Bei einem Wärmeübertrager zur Warmwassererwärmung (z. B. aussenliegender Wärmeübertrager) wird eine Rücklauf-Grädigkeit von mindestens 10 K empfohlen.

Die **Vorlauf-Grädigkeit** ist in Abhängigkeit der Anforderung an die Vorlauftemperatur der Sekundärseite und der primären Vorlauftemperatur festzulegen (siehe  $\Delta T_{\max}$  im Bild 5.8 auf der linken Seite). Dabei ist auch

der Sommerfall zu beachten. Insbesondere wenn im Sommer immer mehr Wärmepumpen zum Einsatz kommen, ist auf eine geringe Vorlauf-Grädigkeit zu achten, damit aus Effizienzgründen die Wärmepumpen möglichst tiefe Vorlauftemperaturen fahren können.

Als Wärmeübertrager werden im Fernwärmebereich folgende **Ausführungen** am häufigsten eingesetzt:

- Platten-Wärmeübertrager (geschraubt, gelötet oder geschweisst)
- Rohrbündel-Wärmeübertrager.

#### Material

Beim Einsatz von buntmetallgelöteten Plattenwärmeübertrager sind zwingend Anforderungen an die Wasserqualität zu stellen (z. B. SWKI BT102-01 [159]). Auf verzinkte Stahlleitungen ist, wenn möglich zu verzichten, da der kupfergelötete Wärmeübertrager sonst durch Buntmetallkorrosion Schaden nehmen kann. Bei bestehenden Gebäuden, wenn die Wasserqualität und die Abwesenheit von verzinkten Stahlrohren nicht garantiert werden kann, sind buntmetallfreie Wärmeübertrager (Edelstahl gelötet) einzusetzen. Diese sind teuer und weisen in der Regel längere Lieferzeiten auf.

Grundsätzlich sind die Angaben des Herstellers und des Lieferanten des Wärmeübertragers zur Korrosionsbeständigkeit zu beachten. Die Anforderungen an die Wasserqualität sind in den Technischen Anschlussvorschriften festzuhalten.

#### Einbau

Die Wärmeübertrager müssen mechanisch spannungsfrei eingebaut werden und auf die Verbindungen zum Wärmeübertrager dürfen weder Axialkräfte noch Biegemomente übertragen werden.

#### 5.4.7.4 Regelventil

Die Auslegung und Dimensionierung von Regelventilen und deren Verhalten im hydraulischen System ist im Kapitel 5.2.3 ausführlich beschrieben.

Es ist grundsätzlich der Einsatz von Kombiventile zu empfehlen. Beim Kombiventil sind die regeltechnischen und hydraulischen Funktionen für den automatischen hydraulischen Abgleich in einem Ventil integriert. Mit dem Kombiventil wird der Druck über dem Verbraucher und dem Regelventil in jedem Betriebsfall (Teillastbetrieb) mit einem Ventil konstant gehalten.

Wie in Kapitel 5.2.5.3 beschrieben wird die Druckdifferenz über das Regelventil konstant gehalten. Der Druckverlust über dem Regelventil ist demnach im Auslegefall und in allen Teillastfällen konstant und durch den Hersteller fest vorgegeben (z. B. 30 kPa). In der Folge kann von einer konstanten Ventilautorität  $PV = 1.0$  ausgegangen werden. Der Druckabfall über den variablen Teil der Teilstrecke ist nicht relevant, weil der Druckabfall über das Regelventil konstant gehalten wird.

Für die Auslegung und Dimensionierung ist das Kombiventil im Regelbereich von minimalem Volumenstrom (Teillastbetrieb) und maximalem Volumenstrom (Vollastbetrieb) korrekt auszulegen. Zudem ist die maximal

mögliche Druckdifferenz über dem fast geschlossenen Druckdifferenzregler (Schliessdruck Kombiventil) zu beachten. Dazu sind folgende Punkte zu beachten:

- Bei kleinen Wärmenetzen oder bei Kunden nahe am Einspeisepunkt den theoretisch möglichen Höchstwert verwenden.
- Bei grossen Wärmenetzen mit vielen Kunden, bei denen eine mehr oder weniger gleichmässige witterungsabhängige Last zu erwarten ist (Gleichzeitigkeit), ist ein tieferer Wert für die maximal auftretende Druckdifferenz zu erwarten.

Durch die Möglichkeit der Volumenstrombegrenzung mit dem Kombiventil kann der im Wärmeliefervertrag vereinbarte maximale Volumenstrom eingestellt werden (Leistungsbegrenzung). Regelungstechnisch muss jedoch auch bei Ventilöffnung die erforderliche Mindestdurchflussmenge des Wärmezählers gewährleistet werden.

Optional kann das Kombiventil mit einer Sicherheitsfunktion ausgestattet sein, wodurch das Ventil im stromlosen Zustand schliesst. Die Schliessfunktion sollte wegen möglichen Druckschlägen langsam erfolgen.

#### 5.4.7.5 Regelungstechnik

Zur Regelung der **sekundärseitigen Vorlauftemperatur** wird primärseitig ein Kombiventil empfohlen. Die Regelung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur ist abhängig von den angeschlossenen Heizgruppen. Diese erfolgt vielfach aussentemperaturgeführt.

Vermehrt erfolgt die Regelung der Sekundärseite direkt durch den Wärmeversorger. Der Vorteil für den Wärmeversorger ist, dass er bei Kenntnissen des Kundenverhaltens zusammen mit Klimaprognosen ein dynamisches Lastmanagement mit Reduktion der Lastspitzen einführen und die Produktion und das Netz damit effizienter betreiben kann. Die technische Entwicklung ist diesbezüglich sehr fortgeschritten. Offene Fragen betreffen die Akzeptanz bei den Kunden und juristische Fragen wie z. B. Datenschutz.

Die maximal zulässige **primärseitige Rücklauftemperatur** ist gemäss Wärmeliefervertrag in jedem Betriebsfall einzuhalten. Zur Einhaltung wird eine Volumenstrombegrenzung empfohlen, welche auf der abonnierten Anschlussleistung und der maximal zulässigen Rücklauftemperatur basiert. Bei zu hoher primärseitiger Rücklauftemperatur kann alternativ die primärseitige Rücklauftemperatur anstelle der sekundärseitigen Vorlauftemperatur als Regelgrösse verwendet werden bis die maximal zulässige primärseitige Rücklauftemperatur unterschritten ist.

Die **Temperaturfühler** (Tauchtemperaturfühler in Tauchhülsen) zur Messung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur und der primärseitigen Rücklauftemperatur sind unmittelbar beim Austritt aus dem Wärmeübertrager anzuordnen. Anlegefühler sollten dafür nicht verwendet werden.

Im saisonalen oder im täglichen Verlauf variiert die **Raumtemperatur** infolge von externen und internen

Wärmeeintrag (Sonneneinstrahlung, Personen, Geräte, Beleuchtung etc.). Ein stabiles und komfortables Raumklima wird in der Regel durch Raumregler (z. B. Thermostatventile) sichergestellt. Kunden ohne Raumregler können jedoch nicht auf den saisonalen oder täglichen Verlauf reagieren und weisen vielfach eine zu hohe Raumtemperatur auf, welche unnötig und zu vermeiden ist. In den Technischen Anschlussvorschriften muss deshalb beim Anschluss an ein thermisches Netz Raumregler gefordert und nachgerüstet werden. Ausnahmen sind Wärmeabgabesysteme mit Vorlauftemperaturen kleiner 30 °C.

#### 5.4.7.6 Datenerfassung und Fernüberwachung

Wann immer möglich ist bei der Realisierung von Übergabestationen eine Datenverbindung zur Datenerfassung und Fernüberwachung des Netzbetreibers zu integrieren. Die Vorteile sind die Möglichkeit einer einfacheren, sichereren und effizienteren Fakturierung und einer zentralen Störungserfassung sowie die Möglichkeit, Kundenanlagen zu optimieren und auf Mängel hinweisen zu können (z. B. Abdriften der primären Rücklauftemperatur). Nachteilig sind die etwas höheren Investitionskosten, wobei diese sich im Rahmen halten und die Vorteile deutlich überwiegen.

#### 5.4.7.7 Wärmezähler

Für die Abrechnung von Brennstofflieferungen oder der von einem Kunden bezogenen Wärme ist der Einsatz von geeichten Wärmezählern notwendig. Die Wärmemessung erfordert eine Durchfluss- und eine Temperaturdifferenzmessung zwischen Vor- und Rücklauf. Die Genauigkeitsklasse eines Wärmezählers wird durch die Messgenauigkeit von Durchfluss und Temperaturdifferenz bestimmt.

Der Messbereich des Durchflusses ist durch den Arbeitsbereich zwischen Nenndurchfluss  $q_p$  und Minimaldurchfluss  $q_i$  gegeben. Das Verhältnis von Nenndurchfluss zu Minimaldurchfluss ist ein Mass für die Bandbreite des Durchflussbereichs, innerhalb dessen eine bestimmte Genauigkeit der Volumenstrommessung garantiert ist. Der Druckabfall bei Nenndurchfluss ist zu berücksichtigen. Und auch die Wasserqualität hat bei Langzeiteinsatz grossen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Der Druckabfall bei Nenndurchfluss ist zu beachten. Ein hoher Druckabfall vergrössert zwar den Arbeitsbereich, verschlechtert aber auch die Ventilautorität des Regelventils, das sich oft in der gleichen Durchflussstrecke befindet.

Für die Durchflussmessung werden folgende Messverfahren verwendet (siehe Tabelle 5.9):

- Mechanisch
- Magnetisch-induktiv
- Ultraschall
- Schwingstrahl

#### 5.4.7.7.1 Einbau von Wärmezählern

Zur Erreichung der erforderlichen Messgenauigkeit müssen folgende **allgemeine Hinweise** beachtet werden:

- Einhalten der Einbauvorschriften des Wärmezählerlieferanten (Ein- und Auslaufstrecke, Einbauanordnung horizontal/vertikal, Fühlereinbau etc.)
- Die Ein- und Auslaufstrecken variieren je nach Nennweite und Technologie. Als Richtwert beträgt die Einlaufstrecke 5 x DN und die Auslaufstrecke 3 x DN (siehe Bild 5.9).
- Der Temperaturfühler für den Rücklauf ist in Fliessrichtung nach dem Volumenmessteil anzuordnen.
- Das Volumenmessteil ist möglichst zwischen zwei Absperrvorrichtungen zu platzieren. Dies erleichtert Wartungsarbeiten und den Zählertausch.
- Auslegung auf eine Temperaturdifferenz > 20 K. Temperaturdifferenz im Betrieb mindestens 3 K.
- Gleichmässige Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt vor den Temperaturfühlern (notigenfalls Einbau eines statischen Mischers).
- Stabile Regelkreise (schwingende Regler können grosse Messfehler verursachen).
- Störungen durch Fehlzirkulationen werden minimiert, wenn die Temperaturdifferenzmessung auf der gleichen Ebene erfolgt wie die Durchflussmessung (Fehlzirkulation wird wenigstens korrekt gemessen).
- Betreiben des Wärmezählers nur im zulässigen Durchflussbereich  $q_p$  bis  $q_i$ .
- Bei minimaler Öffnung des Regelventils muss die Durchflussmenge der minimalen Durchflussmengen des Wärmezählers entsprechen.
- Vorteilhaft sind Kompaktwärmezähler, weil Störeinflüsse auf die kurze Signalübertragung vom Sensor zum Messumformer und zum Rechenwerk praktisch ausgeschlossen sind.
- Fachtechnisch einwandfreie Inbetriebnahme der Wärmezähler und wenn nötig systematische Störquellensuche durch Fachleute.
- Das Verlängern der Fühlerkabel ist nicht zulässig. Wärmezähler sind inkl. Fühlern kalibriert und geeicht.

#### Bei magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten:

- Im Wasser sollte kein Magnetit enthalten sein, da sich dieses auf den Messsonden absetzt und so die Messung beeinflusst (Reduktion des Durchflussmesswertes). Anforderungen an den Wärmelieferanten Magnetit in der Zentrale abzuscheiden.
- Bei bestehenden Anlagen kann mit einem Magnetschlammabscheider in Verbindung mit einem Entgasungsgerät die geforderte Wasserqualität erreicht werden.
- Bei Neuanlagen ist darauf zu achten, dass von Anfang an das Wasser ausreichend entgast und der Sauerstoffgehalt gegen Null reduziert wird.

- Beim Auftreten von grossen Messfehlern wird empfohlen, die Innenwände der Durchflussmesser zu reinigen (die Ursache der Verschmutzung wird damit allerdings nicht behoben).
- Um die optimale Strömungsgeschwindigkeit zu gewährleisten ist der Wärmezähler im Regelbereich von minimalem und maximalem Volumenstrom (Teillast- und Vollastbetrieb) korrekt auszuwerten
- Da über die Messsonden eine sehr geringe Spannung anliegt (einige Millivolt), ist das Messverfahren empfindlich auf elektrische Störfelder. Das ist vor allem bei Splitgeräten der Fall, wo der Sensor und der Messumformer durch störungsempfindliche Leitungen verbunden sind. Dies kann durch Verwendung von Kompaktdurchflussgebern entschärft werden.
- Nur abgeschirmte und verdrehte Kabel verwenden und die Nähe von starken Magnetfeldern von Elektromotoren oder Frequenzumrichtern meiden.

#### Bei Ultraschall-Durchflussmessgeräten:

- Verschmutzung der Umlenkspiegel bei kleiner Nennweite und Gaseinschlüsse im Wasser können Messungenauigkeiten verursachen.

- Die Vermeidung dieser Störeinflüsse erfordert eine hohe Wasserqualität sowie eine ausreichende Entgasung des Wassers, was Ablagerungen auf den Umlenkspiegeln verhindert.

#### Bei Schwingstrahl-Durchflussmessgeräten:

- Grundsätzlich unempfindlich gegen Verschmutzung, da nur ein Teilstrom mit erhöhter Fließgeschwindigkeit für die Messung notwendig ist.
- Beim horizontalen Einbau muss darauf geachtet werden, dass der Messkopf seitlich angebracht ist (nicht unten oder oben). Beim vertikalen Einbau sind keine besonderen Massnahmen zu beachten.

#### Bei mechanischen Durchflussmessgeräten:

- Einbau eines Schutzfilters vor dem Wassereintritt des Durchflusssensors, um Beschädigung oder Verstopfen des Flügel-/Turbinenrads zu vermeiden.
- Regelmässige Revision um Abnutzung als Fehlerquelle auszuschliessen.
- Durch sorgfältige Auslegung ist dafür zu sorgen, dass der Betriebsdurchfluss bei variablem Volumenstrom nicht oder nur in Ausnahmefällen unter den Minimaldurchfluss  $q_i$  fällt.

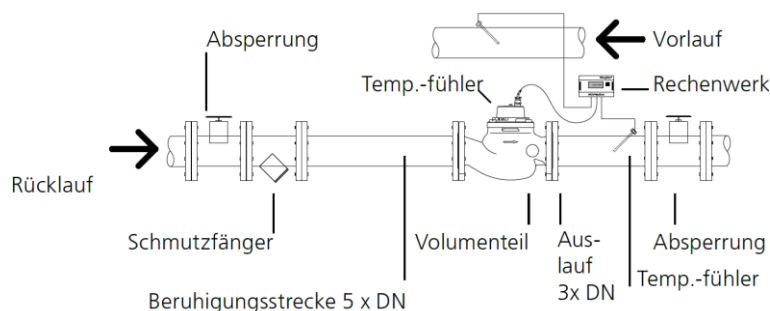


Bild 5.9 Installation Wärmezähler (Quelle: WDV-Molliné GmbH).

#### 5.4.7.7.2 Einhalten der Messbeständigkeit

Wärme- und Kältezähler sind gemäss Messmittelverordnung MessMV [191] und Verordnung des EJPD über Messgeräte für thermische Energie [192] auszuführen und in Verkehr zu bringen. Sie werden in der Regel vom Wärmelieferanten überwacht und unterhalten. Der Wärmelieferant führt ein Kontrollregister über die in seinem Versorgungsbereich verwendeten Messgeräte. Darin muss für jedes Messgerät folgendes ersichtlich sein:

- Wann und nach welchem Verfahren es in Verkehr gebracht wurde.
- Welches Verfahren zur Erhaltung der Messbeständigkeit vorgeschrieben ist.
- Wann das Verfahren zur Erhaltung der Messbeständigkeit das letzte Mal angewendet wurde.
- Wo sich das Messgerät im Einsatz befindet.

Wärme- und Kältezähler müssen vom Eidgenössischen Institut für Metrologie (METAS) oder von einer ermächtigten Eichstelle wie folgt nachgeeicht werden:

- Zähler mit beweglichen mechanischen Messteilen: alle sechs Jahre
- Andere: alle acht Jahre.

Das METAS kann die Fristen zur Nacheichung im Einzelfall verlängern oder verkürzen, wenn die messtechnischen Eigenschaften des Messmittels dies erlauben oder verlangen.

Wärme- und Kältezähler können auf Antrag der Verwenderin der Überwachung der Messdaten im Betrieb nach Anhang 7 Ziffer 3 der Messmittelverordnung MessMV [191] und nach den Anforderungen nach Anhang 2 der Verordnung des EJPD über Messgeräte für thermische Energie [192] unterstellt werden.

Wärme- und Kältezähler für die anteilmässige Verteilung der Energiekosten unterliegen keinem Verfahren zur Erhaltung der Messbeständigkeit.

Tabelle 5.9 Beurteilung der wichtigsten Durchflussmessverfahren.

|                                                                | MID <sup>1)</sup> | Ultraschall                    | Schwingstrahl | Mechanisch                      |
|----------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Verhältnis $q_p/q_i$                                           | 100-150           | 100-150                        | 25-100        | 25-100                          |
| Druckabfall bei Nenndurchfluss $q_p$ [kPa]                     | 7-15              | 7-20                           | 9-25          | 10-15                           |
| Messgenauigkeit                                                | hoch              | hoch                           | hoch          | mittel                          |
| Empfindlichkeit der Messgenauigkeit auf die Wasserqualität     | hoch              | klein bis mittel <sup>2)</sup> | klein         | klein                           |
| Abnützung/Serviceaufwand                                       | gering            | gering                         | gering        | hoch                            |
| Empfindlichkeit der Messgenauigkeit auf elektrische Störfelder | hoch              | gering                         | gering        | gering bis mässig <sup>3)</sup> |

<sup>1)</sup> Magnetisch-Induktives Durchflussmessgerät

<sup>2)</sup> Verschmutzung der Umlenkspiegel bei kleinen Nennweiten

<sup>3)</sup> bei induktivem Impulsgeber

#### 5.4.7.8 Druckabsicherung

Die Druckabsicherung beim **direkten Anschluss** kann ohne Druckminderung und -absicherung erfolgen, wenn der Maximaldruck im Netz  $p_{Nmax}$  kleiner oder gleich dem zulässigen Druck der Hausstation oder der Hausanlage  $p_{Hzul}$  ist. Andernfalls ist eine Druckminderung und eine Druckabsicherung DIN 4747 [176] erforderlich.

Beim **indirekten Anschluss** ist die Primärseite des Wärmeübertragers für den maximalen Netzdruck  $p_{Nmax}$  zu bemessen. Die Anordnungen der Sicherheitseinrichtungen gegen Überschreiten des sekundärseitigen Betriebsüberdrucks sind in Anlehnung an SN EN 12828 [193], SN EN 12953 [194] sowie SWKI HE301-01 [195] vorzunehmen. Hierzu ist jeder Wärmeübertrager sekundärseitig durch Sicherheitsventile gegen Überschreiten des zulässigen Betriebsdruckes abzusichern.

Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Anschluss von maximal drei Sicherheitsventilen je Wärmeübertrager.
- Senkrechter Einbau mit Steigleitung so kurz wie möglich, maximal 1 Meter.
- Leitungen ohne Absperrung, Schmutzfänger und Formstücke einbauen, die zur Verengung des Querschnittes führen.
- Anordnung an leicht zugänglicher Stelle.
- Anbringung eines Hinweisschilds.
- Separate Ausblasleitung mit Gefälle, Mündung frei und beobachtbar; Ableitung über Entwässerungssystem
- Sicherheitsventil muss bauteilgeprüft sein.

Sofern die Möglichkeit der Aufheizung im Wärmeübertrager durch die Sekundärseite besteht, sind auch Druckabsicherungsmassnahmen auf der Primärseite zu treffen. Jeder Wärmeübertrager muss mindestens mit einem Ausdehnungsgefäß verbunden sein.

#### 5.4.7.9 Temperaturabsicherung

Eine Temperaturabsicherung in der Hauszentrale ist abhängig von der höchstzulässigen Hausanlagentemperatur und der maximalen primären Vorlauftemperatur. In der DIN 4747 [176] sind dazu Anforderungen nach Tabelle 5.10 festgelegt.

Wird eine Warmwassererwärmungsanlage einer Unterstation oder einer Anlage für Raumwärme mit Vorlauftemperaturregelung und Temperaturabsicherung nachgeschaltet, so ist zur Auslegung der sicherheitstechnischen Ausrüstung zur Temperaturabsicherung der Warmwassererwärmung die primäre Betriebsmitteltemperatur und nicht die maximale primäre Vorlauftemperatur massgebend (Tabelle 5.11).

Werden nach Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11 Stellgeräte mit Sicherheitsfunktionen gefordert, können Regel-, Wächter- und Begrenzungsimpuls auf ein gemeinsames Stellgerät wirken, wenn es typisiert ist. Als typengeprüfte Stellgeräte können auch Volumenstromregler ohne Fremdenergie, die mit einem Stellantrieb mit Sicherheitsfunktion ausgerüstet sind, eingesetzt werden.

Der Einstellbereich der sicherheitstechnischen Ausrüstung darf die höchstzulässige Temperatur der Hausanlage um nicht mehr als 10%, begrenzt auf höchstens 5 K, überschreiten.

Das Stellgerät ist so anzuordnen, dass die Gefahr der Verdampfung oder des Leerlaufens der Hauszentrale bzw. der Hausanlage vermieden wird. Bei Warmwassererwärmungsanlagen soll das Stellgerät im Vorlauf angebracht sein.

Um die Temperatur möglichst schnell und unverfälscht zu messen, sollen die Temperatursensoren für den Regel-, Wächter- und Begrenzungsimpuls bei direktem Anschluss so installiert werden, dass die Mischtemperatur sicher erfasst werden kann.

Bei indirektem Anschluss sollen die Temperaturmessfühler möglichst im oder dicht am Wärmeübertrager angeordnet sein.

Tabelle 5.10 Sicherheitstechnische Ausrüstung zur Temperaturabsicherung von Hausstationen für Raumheizung und Raumlüftung nach DIN 4747 [176].

| Höchste Betriebs-<br>temperatur im<br>thermischen Netz<br>$T_{\text{BNmax}}$ | höchstzulässige<br>Hausanlagentem-<br>peratur<br>$T_{\text{BHmax}}$ | Vorlauftemperatur-<br>regelung | Sicherheitstechnische Ausrüstung<br>temperaturabhängiges RS |                                         | Sicherheitsfunktion <sup>a</sup> |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
|                                                                              |                                                                     |                                | Typ TR <sup>a</sup>                                         | Typ STW <sup>a</sup>                    |                                  |
|                                                                              |                                                                     |                                | typgeprüft                                                  |                                         |                                  |
|                                                                              |                                                                     | mit und ohne Hilfsenergie      |                                                             |                                         |                                  |
| $\leq 120^{\circ}\text{C}$                                                   | $\geq T_{\text{BNmax}}$                                             | erforderlich <sup>b</sup>      | nicht erforderlich                                          | nicht erforderlich                      | nicht erforderlich               |
|                                                                              | $< T_{\text{BNmax}}$                                                | erforderlich                   | nicht erforderlich                                          | erforderlich<br>max. $T_{\text{BHmax}}$ | erforderlich                     |
| $> 120^{\circ}\text{C}$<br>$\leq 140^{\circ}\text{C}$                        | $< T_{\text{BNmax}}$                                                | erforderlich                   | erforderlich <sup>c,d</sup>                                 | erforderlich<br>max. $T_{\text{BHmax}}$ | erforderlich                     |
| $> 140^{\circ}\text{C}$                                                      | $< T_{\text{BNmax}}$                                                | erforderlich                   | erforderlich <sup>c</sup>                                   | erforderlich<br>max. $T_{\text{BHmax}}$ | erforderlich                     |

a) Definition nach SN EN 14597 [196]

b) Nichterforderlich bei gleitender und gleitend-konstanter Netzfahrweise, dezentrale Temperaturregelung mit thermostatischen Heizkörperventilen ausreichend.

c) TR wirkt auf den Schliessimpuls des Stelleantriebes, nicht auf die Sicherheitsfunktion.

d) Nichterforderlich bei gleitender und gleitend-konstanter Netzfahrweise.

Tabelle 5.11 Sicherheitstechnische Ausrüstung zur Temperaturabsicherung von Hausstationen für Brauchwarmwassererwärmung nach DIN 4747 [176].

| Höchste Betriebs-<br>temperatur im<br>thermischen Netz<br>$T_{BNmax}$ | Höchste zulässige<br>Betriebstempera-<br>tur in der BWW-<br>Anlage<br>$T_{BHmax}$ | Warmwassertem-<br>peratur Regelung <sup>a</sup> | Sicherheitstechnische Ausrüstung<br>temperaturabhängiges RS |                                    | Sicherheitsfunktion <sup>b,c</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                       |                                                                                   |                                                 | Typ TR <sup>b</sup>                                         | Typ STW <sup>b</sup>               |                                    |
|                                                                       |                                                                                   |                                                 | typgeprüft                                                  |                                    |                                    |
|                                                                       |                                                                                   | mit und ohne Hilfsenergie                       |                                                             |                                    |                                    |
| $\leq 100^{\circ}\text{C}$                                            | $< T_{BNmax}$                                                                     | erforderlich                                    | erforderlich                                                | erforderlich<br>max. $T_{BHmax}^d$ | erforderlich                       |
|                                                                       | $> T_{BNmax}$                                                                     | erforderlich                                    | nicht erforderlich                                          | nicht erforderlich                 | nicht erforderlich                 |
| $> 100^{\circ}\text{C}$<br>$\leq 120^{\circ}\text{C}$                 | $> T_{BNmax}$                                                                     | erforderlich                                    | erforderlich                                                | nicht erforderlich                 | nicht erforderlich                 |
| $> 120^{\circ}\text{C}$                                               |                                                                                   | erforderlich                                    | erforderlich                                                | erforderlich<br>max. $T_{BHmax}^d$ | erforderlich                       |

a) Die Regelung der Warmwassertemperatur kann bereits durch die sicherheitstechnische Ausrüstung (RS-TR/RS-STW) gegeben sein.

b) Definition nach SN EN 14597 [196]

c) Sofern die Sicherheitsfunktion nach SN EN 14597 erforderlich ist, kann ein bereits für die Raumheizung vorhandenes Regelventil (primäre Heizungsseite) genutzt werden.

d) Einstellung entsprechend der Ausführung der BWW-Anlage, jedoch maximal auf  $80^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.4.7.10 Absperrarmaturen

Die primärseitigen Absperrarmaturen werden vom Wärmeversorger geliefert und befinden sich in dessen Eigentum. Die Absperrarmaturen werden in der Regel durch Schweissen, Löten oder Schrauben (Flansch) an die Fernwärmerohre angeschlossen. Bei der Herstellung der Schweiss- oder Lötverbindungen ist darauf zu achten, dass keine Schäden an der Armatur auftreten (Dichtung etc.).

Absperrarmaturen an der Übergabestation haben grundsätzlich den Anforderungen der TAV zu entsprechen, müssen leicht zugänglich und deutlich gekennzeichnet sein.

Bei Inbetriebnahme- oder Reparaturarbeiten sind Absperrarmaturen mit Handbetätigungshebel so zu sichern, dass die Armatur nicht versehentlich geöffnet werden kann, wenn eine Person oder ein Gegenstand dagegen fällt. Die Armatur sollte wenn möglich durch Bewegen des Hebels nach oben geöffnet werden.

#### 5.4.7.11 Entleerung und Entlüftung

Bei Montage, Inbetriebnahme oder Reparaturarbeiten von Übergabestationen müssen die Leitungen entleert beziehungsweise entlüftet werden können.

Als Entleerungs- und Entlüftungsarmaturen werden Ventile oder Hähne eingesetzt, welche sich zwischen zwei Absperrarmaturen befinden.

Die Entleerung befindet sich im Rücklauf (unten) vor der Absperrarmatur des Hausaustrittes und dient gleichzeitig auch zur Befüllung. Es empfiehlt sich, die Entleerungen mit genormten Schlauchanschlüssen zu versehen. Entleerungsstellen sollten als Schlammfang ausgebildet sein.

Bei Entleerungen in Abwasserkanäle beträgt die maximal zulässige Einleittemperatur 35°C. Deren Einhaltung ist durch Beimischen von kaltem Wasser zu erreichen. Während des Betriebs sind die Entleerungen durch Blindflansche, Stopfen oder Kappen zu sichern.

Die Entlüftung befindet sich im Vorlauf (oben) nach der Absperrarmatur des Hauseintrittes. Beim Füllen und Entleeren der Leitungen muss Luft entweichen beziehungsweise einströmen können. Dazu sind Entlüftungen an der höchsten Stelle anzubringen.

#### 5.4.7.12 Schmutzfänger

In Leitungen mit fließenden Medien können sich Verunreinigungen bilden oder hineingelangen. Diese können Anlagenkomponenten verschmutzen oder im schlimmsten Fall sogar verstopfen. Der Einsatz von Schmutzfängern ist daher bei Übergabestationen vorzusehen.

Schmutzfänger sollten im primärseitigen Vorlauf nach der Absperrarmatur und im sekundärseitigen Rücklauf vor dem Eintritt in den Wärmeübertrager eingebaut werden. Es werden grossflächige Schmutzfänger mit Tragfilter und optional Feinfilter mit folgenden Eigenschaften eingesetzt:

- Tragfilter: lichte Maschenweite 0.8 mm (in der Regel ausreichend)
- Feinfilter: lichte Maschenweite 0.25 mm (optional)

Die Reinigung der Filter muss möglich sein, ohne die Armatur zu demontieren. Der Schmutzfänger muss so positioniert werden, dass möglichst keine Gefahr von Wasserschäden an elektronischen Geräten während der Reinigung auftritt.

#### 5.4.7.13 Temperatur- und Druckanzeigen

Die Temperatur- und Druckanzeigen dienen zur Ableseung im Betrieb sowie bei Inbetriebnahme und Reparaturarbeiten zur korrekten Befüllung der Übergabestation.

Die Temperatur kann direkt an Thermometern oder mit Hilfe von Sensoren, die an Steuer- und/oder Überwachungseinrichtungen angeschlossen sind, abgelesen werden. Die Anzeige- und Messbereiche müssen mindestens die maximale Temperaturschwankung abdecken.

#### 5.4.7.14 Werkstoffe und Verbindungstechniken

Die Auswahl der Werkstoffe für die primärseitigen Bauelemente ist nach DIN 4747 [176] vorzunehmen und Abhängig vom eingesetzten Rohrsystem (siehe auch Kapitel 4.2.1).

Die verwendeten Verbindungselemente und Dichtungen müssen auf das eingesetzte Rohrsystem abge-

stimmt und für die Betriebsbedingungen bezüglich Druck, Temperatur und Wärmeträgermedium geeignet sein (flachdichtend). Nicht vorzusehen sind automatische Entlüftungen, Gummikompensatoren, konische Verbindungen und Hanf als Dichtungsmittel. Pressverbindungen bei KMR sind bereits im Kapitel 4.2.1.1 beschrieben, dabei ist zu beachten, dass das eingesetzte System auf der Primärseite nach AGFW 449 [122] zugelassen ist.

Die Rohrleitungen und Formstücke sind mit einem temperaturbeständigen Korrosionsschutzanstrich zu versehen und gegen Wärmeverluste zu dämmen (siehe nachfolgendes Kapitel 5.4.7.15).

Weiterführende Anforderungen und Abweichungen zur DIN 4747 sind in den jeweiligen Technischen Anschlussvorschriften aufzuführen.

#### 5.4.7.15 Wärmedämmung

Neue oder im Rahmen eines Umbaus neu erstellte Installationen (wie zum Beispiel Leitungen, Armaturen, Ventile, Pumpen und sonstige Einbauten) sind durchgehend gegen Wärmeverluste zu dämmen.

Für die minimalen Dämmstärken ausserhalb der thermischen Gebäudehülle sind die kantonalen Vorschriften zu beachten. Die Kantone richten sich dabei nach den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich MuKE n [38]. Gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) müssen erdverlegte Leitungen in der Schweiz maximale  $U_R$ -Werte (spezifische Wärmeverluste) einhalten. Aktuell gültig ist die MuKE n 2014 ([38]), ab 2030 soll die aktualisierte MuKE n 2025 ([117]) gültig sein. Die  $U_R$ -Werte bleiben unverändert, mit einer Präzisierung was Einzel- und Doppelrohre anbelangt. Diese sind in der Vollzugshilfe EN-103 zu Heizung und Warmwasser [197] beschrieben. Innerhalb der thermischen Gebäudehülle sind die Empfehlungen von suissetec im Merkblatt Technische Dämmung zu beachten [198].

Die Montage und Demontage des Wärmezählers und der zugehörigen Fühler muss ohne Verletzung der Wärmedämmung erfolgen können.

Die Wärmedämmung muss alterungsbeständig sein und darf im nassen Zustand keine korrodierende Wirkung auf die Anlagenteile ausüben. Sie muss bei Betriebstemperatur chemisch stabil und masshaltig sein.

Vor- und Rücklaufleitungen sind grundsätzlich getrennt und dehnungskonform zu dämmen. Die Wärmedehnung der Rohre darf die Wärmedämmung nicht beeinträchtigen. Wärmedämmungen sind sattgestossen und fugenversetzt anzubringen. Die Längs- und Stossfugen sind vollständig mit einem geeigneten Dichtstoff zu schliessen.

#### 5.4.7.16 Potentialausgleich

Ein Hauptpotentialausgleich im Gebäude ist zwingend erforderlich, es sind die geltenden Vorschriften zu beachten. Der Potentialausgleich ist eine elektrische Verbindung, welche die Körper elektrischer Betriebsmittel und fremder leitfähiger Teile auf gleiches oder annä-

hernd gleiches Potential bringt. In den Potentialausgleich sind unter anderem folgende Komponenten einzubeziehen [176]:

- Erdungsanlagen
- Stahlkonstruktionen (zum Beispiel Rahmen der Hausstation)
- Heizungsleitungen (Vor- und Rücklaufleitungen)
- Trinkwasserleitungen (kalt, warm und Zirkulation)
- Wärmeübertrager
- Warmwassererwärmer

Niederspannungselemente wie zum Beispiel das Bus-system sollten zusätzlich mit einem Überspannungsschutz ausgerüstet werden.

### 5.4.8 Projektablauf

Die Grundlegende Planung und Betrieb eines thermischen Netzes werden in Kapitel 6 behandelt. Dabei wird zwischen einer Planungs- und einer Betriebsphase unterschieden.

Nachfolgend wird spezifisch auf die für die Planung und den Betrieb von Fernwärme-Übergabestationen notwendigen Arbeitsschritte eingegangen. Die einzelnen Arbeitsschritte werden vielfach nicht nur von einer einzelnen Person oder einem einzelnen Unternehmen durchgeführt. Daher ist auf eine fortlaufende Dokumentation und gute Kommunikation zu achten.

#### 5.4.8.1 Planungsphase

1. Ist-Analyse Wärmeabnehmer: Erfassen des Wärme- und Leistungsbedarfs sowie der Wärmeinbindung bei den Wärmeabnehmern (Kapitel 2.1).
2. Technische Anschlussvorschriften (TAV) festlegen wie in Kapitel 7.6.3 beschrieben.
3. Hydraulikschemas und Ausschreibungsunterlagen erstellen. In den Ausschreibungsunterlagen sind unter anderem folgende Inhalte zu definieren:
  - Temperatur- und Druckanforderungen gemäss TAV
  - Anschlussleistung
  - Art der Warmwassererwärmung
  - Anforderungen an die Konstruktion
  - Aufbau (Lage der Anschlüsse, Masse zur Einbringung, Einbringungsweg, örtliche Gegebenheiten)
  - Armaturen, Mess- und Regelgeräte
  - Werkstoffe und Verbindungselemente
  - Korrosionsschutz
  - Wärmedämmung
  - Elektrischer Anschluss
  - Potenzialausgleich
  - Geräuschkopplung
  - Schaltschrank
  - Verkabelung

- Elektrische Regelungen (Stellantriebe und Umwälzpumpen)
- Temperaturfühler- und Kommunikationsanschlüsse
- Lieferbedingungen
- Inbetriebnahme und Schulung
- Dokumentation

#### 4. Submissionsphase

- Offerten einholen
- Offerten prüfen und vergleichen (eine Bewertungstabelle für Fernwärme-Übergabestationen ist im Leitfaden Fernwärme-Übergabestationen zu finden).
- Vergabe zur Ausführung

#### 5. Einbau und Inbetriebnahme:

- Ausführung und Montage (Materialkontrolle, Vollständigkeit, Abweichung von der Planung)
- Prüfen der Wasserqualität (Primär- und Sekundärseite)
- Inbetriebnahme der Anlage
- Funktionskontrolle der Anlagenteile und Systeme
- Mängel und Funktionsstörungen beheben
- Protokoll über den Verlauf und Ergebnis der Inbetriebnahme und Funktionskontrollen erstellen (von allen Beteiligten zu unterschreiben)
- Aufgetretene Mängel sind bis zur Abnahme zu beheben.

#### 6. Abnahme und Schulung

- Abnahme anhand des Pflichtenhefts
- Auf offensichtliche Mängel prüfen und so-fort festhalten
- Nachweis über die Durchführung des hydraulischen Abgleichs auf der Sekundärseite ist vom Planer oder Ausführenden vorzu-legen.
- Dokumentation überprüfen und evtl. Nachführen lassen
- Abnahmeprotokoll erstellen (von allen Beteiligten zu unterschreiben)
- Schulung der Mitarbeitenden und Wärmeabnehmer durchführen (evtl. bereits während der Inbetriebnahme erfolgt).

#### 5.4.8.2 Betriebsphase

Die Betriebsphase ist entgegen der Planungsphase als fortlaufender Prozess zu betrachten und startet nach der Abnahme durch den Kunden, Bauherr, Betreiber und/oder deren Vertreter. Folgende Punkte sind bei Fernwärme-Übergabestationen besonders zu beachten:

1. Nachregulierung und Optimierung: Die Nachregulierung bzw. Optimierung der Übergabestation erfolgte am Anfang, während der Heizperiode und wenn möglich periodisch oder permanent über die Auswertung der wichtigsten Parameter.
  - Soll-Ist-Vergleich mit Referenzwerten (evtl. Einstellen von Sollwerten und Regelparametern wie Temperatur, Druck etc.)
  - Feststellen und Interpretieren von Abweichungen (Fehler- und Schadensdiagnose)
  - Ermittlung von Optimierungspotenzialen.
2. Service und Unterhalt:
  - Eichpflicht der Wärmezähler umsetzen
  - Periodische Kontrollen
  - Sicherheitseinrichtungen
  - Wasserqualität
  - Entschlammung
  - Funktion Entgaser
  - Leckage
3. Fakturierung der bezogenen Wärmemenge.

#### **5.4.9 Auslegung und Anforderungen für eine Übergabestation**

Die Anforderungen für den Anschluss an ein thermisches Netz, Anforderungen an die Wärmeverteilung der Sekundärseite und die wichtigsten Auslegungsgrundlagen für die Übergabestation müssen in den Technischen Anschlussvorschriften festgehalten sein (siehe Kapitel 5.7 und Kapitel 7.6.3).

Für eine korrekte und technisch einwandfreie Konfektionierung durch den Hersteller / Lieferanten der Übergabestation, sind vor allem folgende Informationen wichtig, welche unter anderem im Wärmeliefervertrag und den Vertragsbestandteilen wie den Technischen Anschlussvorschriften TAV festgehalten sind:

- Vertraglich abonnierte Leistung in kW
- Anzahl Heizkreise und Art der Warmwasseraufbereitung
- Wärmeübertragemedium
- Nenndruck PN
- Maximale Betriebstemperatur in °C
- Vorlauftemperatur Winter in °C
- Vorlauftemperatur Sommer in °C
- Maximale Rücklauftemperatur im Heizbetrieb in °C
- Maximale Rücklauftemperatur bei der Warmwassererwärmung in °C
- Maximale Rücklauf-Grädigkeit im Heizbetrieb in K
- Maximaler Druckabfall Übergabestation in mbar oder bar
- Maximaler Differenzdruck im Netz in mbar oder bar
- Werkstoffe und Materialisierung

## 5.5 Standard-Schaltungen

Eine Übersicht der Anschlussmöglichkeiten an thermische Netze ist in Bild 5.10 zu sehen. Es wird folgendermassen unterteilt:

- Anschluss direkt oder indirekt
- mit oder ohne Warmwassererwärmung
- Art der Warmwassererwärmung (Durchflusswassererwärmer und Warmwasserwärmer mit internem oder externem Wärmeübertrager)
- Anschluss der Warmwassererwärmung am primären oder sekundären Kreislauf.

Im Kapitel 5.2.2 wird grundsätzlich auf direkte und indirekte Anschlüsse eingegangen. Auf den folgenden Seiten werden die wichtigsten Standard-Schaltungen für den direkten und indirekten Fernwärmeanschluss schematisch dargestellt und kurz beschrieben. Bei der schematischen Darstellung wird durchwegs ein diffe-

renzdruckunabhängiges Regelventil (Kombiventil) zur Volumenstrom- und Differenzdruckregelung eingesetzt. Alternativ kann die Volumenstrom- und Differenzdruckregelung auch über ein separates Durchgangsventil zur Volumenstromregelung und einen Differenzdruckregler erfolgen.

Die Schemata sind bewusst nicht bis ins kleinste Detail ausgearbeitet. Sie zeigen die grundlegende hydraulische Einbindung, verzichten jedoch auf eine detaillierte Darstellung der Mess- und Regeltechnik. Dies soll Raum für kreative Ausarbeitungen lassen.

Zusätzlich werden unterschiedliche Standard-Schaltungen für die Warmwassererwärmung gezeigt. In den Schemas werden hauptsächlich die beiden Warmwasserspeicher mit internem oder externem Wärmeübertrager näher betrachtet.

Weiter sind auch zwei Schaltungen mit Strahlpumpen aufgeführt.

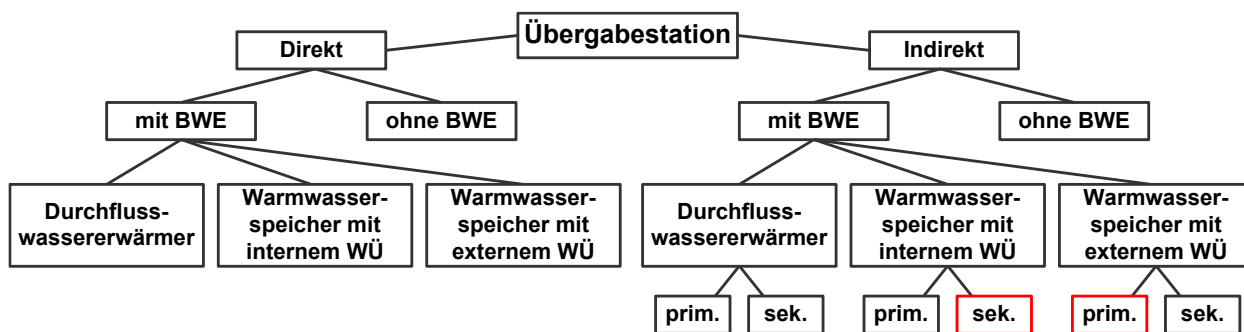


Bild 5.10 Anschlussmöglichkeiten für die Wärmeversorgung mit oder ohne Warmwassererwärmung. Mit einem roten Rahmen ist die übliche Anschlussart der Warmwassererwärmung bei einem indirekten Anschluss gekennzeichnet, wobei mit prim. der Anschluss der Warmwassererwärmung an der Primär- und mit sek. der Anschluss an der Sekundärseite gemeint ist.

### 5.5.1 Direkter Anschluss

Die Heizkreise verfügen über eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung und die primäre Rücklauftemperatur wird bei Gefahr einer Überschreitung der maximal zulässigen Rücklauftemperatur über eine Rücklauftemperaturbegrenzung begrenzt.

Direktanschluss einer Heizgruppe mittels Drosselschaltung gemäss Bild 5.11 (variabler Durchfluss in der Heizgruppe, z. B. Anschluss eines Lufterhitzers).

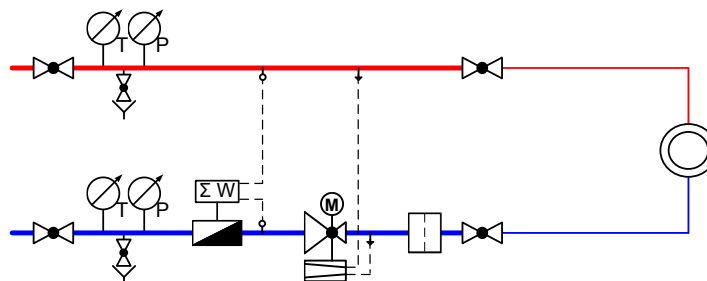


Bild 5.11 Direkter Anschluss mit Drosselschaltung.

Direktanschluss einer Heizgruppe mittels Einspritzschaltung zur Temperaturregelung gemäss Bild 5.12 (z. B. Anschluss einer Heizkörper- oder Fussbodenheizung).

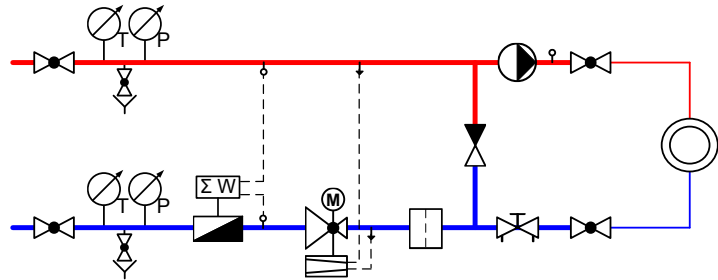


Bild 5.12 Direkter Anschluss mit Einspritzschaltung

## 5.5.2 Indirekter Anschluss

Der Anschluss an ein Fernwärmenetz muss bei hohen geodätischen Höhenunterschieden und/oder bei ausgedehnten Anlagen indirekt erfolgen, da der Netzdruck den maximal zulässigen Druck in der Hausanlage (z.B. Gebäudeheizung) übersteigt. Das bedeutet, dass der Erzeugerkreis vom Verbraucherkreis mit einem Wärmeübertrager hydraulisch getrennt wird (Primär- und Sekundärkreis). Die Heizkreise verfügen über eine witterungsgeführte Regelung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur über das primärseitige Durchgangsventil (Kombiventil).

Der indirekte Anschluss an ein thermisches Netz erfolgt üblicherweise gemäss Bild 5.13 mit einer Drosselschaltung.

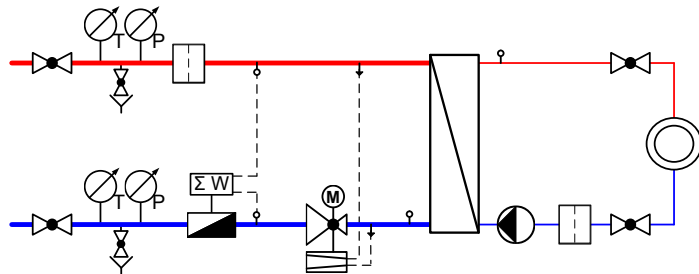


Bild 5.13 Indirekter Anschluss mit Drosselschaltung.

Indirekter Anschluss mit einem primärseitigen Wärmeübertrager, hier dargestellt mit mehreren Heizgruppen und Warmwassererwärmung. Die Warmwassererwärmung ist vereinfachend dargestellt, die Ausführung sollte gemäss den Erläuterungen im nächsten Kapitel erfolgen.

Die in Bild 5.14 dargestellte sekundärseitige Schaltung ist nur möglich, wenn der Anschluss des Wärmeübertragers differenzdruckbehaftet erfolgt. Ist mehrheitlich in Neubauten oder sanierten Gebäuden anzutreffen und heutiger Stand der Technik.

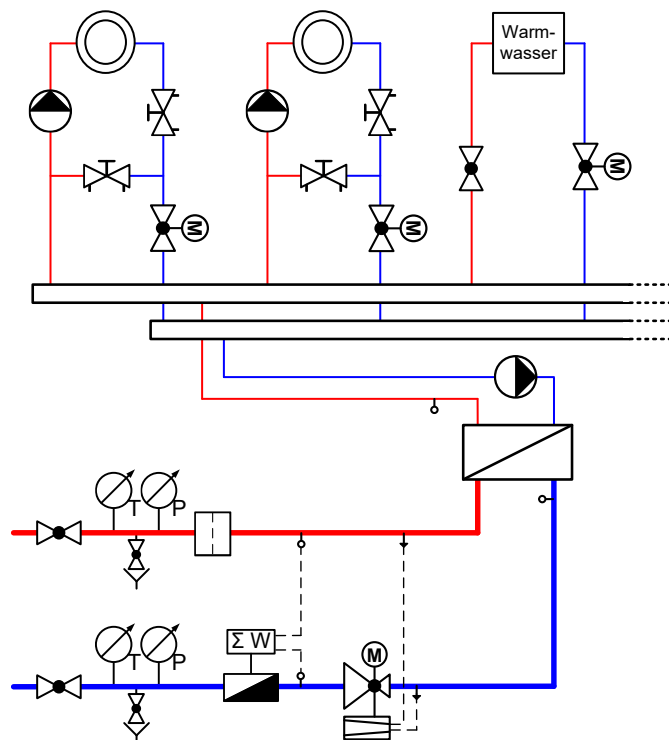


Bild 5.14 Indirekter Anschluss mit Drosselschaltung für den sekundärseitigen Anschluss mehrerer Heizgruppen und Warmwassererwärmung (differenzdruckbehaftet).

Die in Bild 5.15 dargestellte sekundärseitige Schaltung ist nur möglich, wenn der Anschluss des Wärmeübertragers differenzdruckarm erfolgt, vielfach noch im Bestand anzutreffen. Bei einem differenzdruckarmen Anschluss sind aber folgende Rahmenbedingungen zu erfüllen:

- Ventilautorität  $\geq 0,5$ , d.h. der Druckabfall über dem Dreiwegeventil ist grösser als der Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss (entspricht Wärmeübertrager und Anschlussleitungen).
- Maximaler Druckabfall über den sekundärseitigen Teilstrecken mit variablem Durchfluss  $\leq 20\%$  der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe. Das soll den gegenseitigen Einfluss durch Fehlzirkulation bei mehreren Heizgruppen mit Dreiwegeventil verhindern.

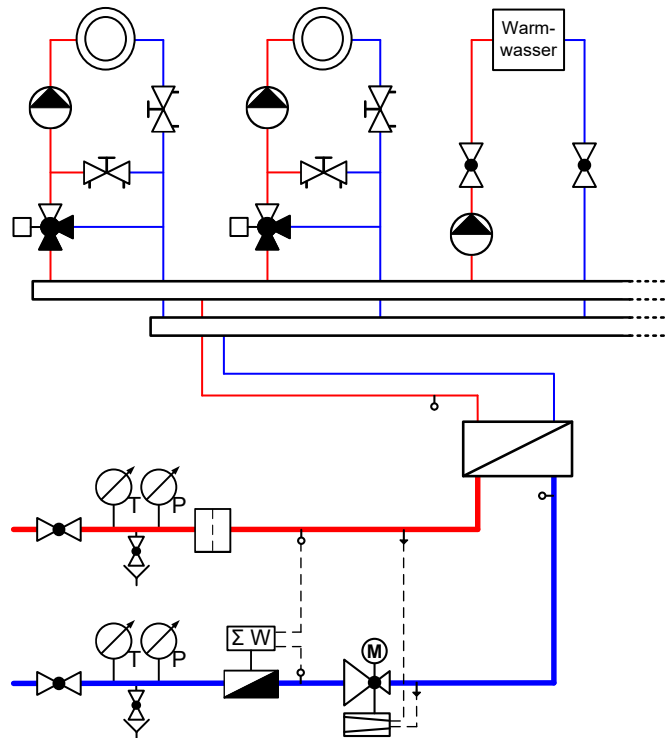


Bild 5.15 Indirekter Anschluss mit Drosselschaltung für den sekundärseitigen Anschluss mehrerer Heizgruppen und Warmwassererwärmung (differenzdruckarm).

Indirekter Anschluss über einen dezentralen Wärmespeicher (Bild 5.16), hier dargestellt mit mehreren Heizgruppen und Warmwassererwärmung oder zur weiteren Unterverteilung. Die Warmwassererwärmung ist vereinfachend dargestellt, die Ausführung sollte gemäss den Erläuterungen im nächsten Kapitel erfolgen.

Dezentrale Wärmespeicher werden bevorzugt da eingesetzt, wo Kunden systembedingt hohe Lastspitzen haben. Im Einzelfall ist auch der Anschluss weiterer Kunden oder Gebiete zu prüfen (z. B. bei Netzengpässen), dabei ist insbesondere die Versorgungssicherheit bei langanhaltenden Kälteperioden zu beachten.

Die Erfassung der Ein- und Ausschaltkriterien für die Ladung des Wärmespeichers erfolgt über Temperaturfühler oben und unten im Wärmespeicher.

Zu beachten ist der Nenndruck des primärseitigen Anschlusses des Wärmespeichers. Möglich ist auch ein Speicheranschluss über einen aussenliegenden Wärmeübertrager.

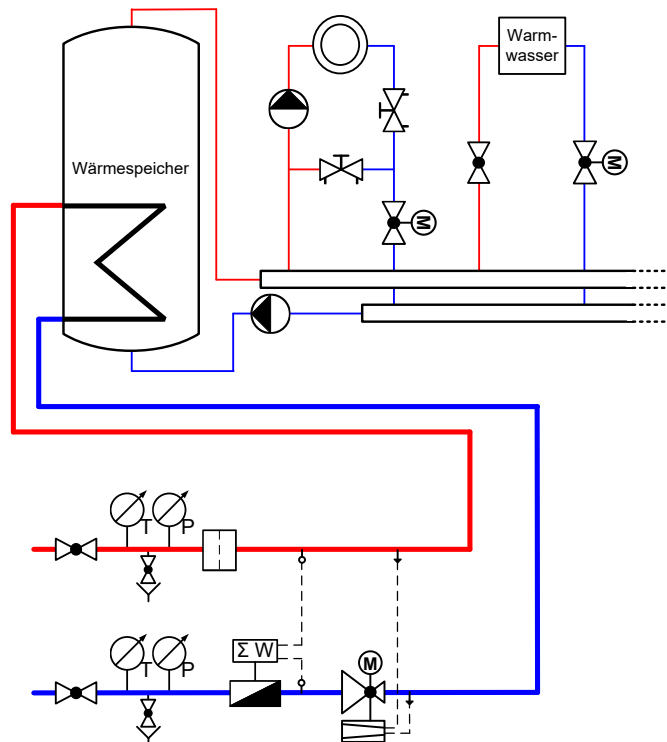


Bild 5.16 Anschluss eines dezentralen Wärmespeichers für den indirekten Anschluss mehrerer Heizgruppen und Warmwassererwärmung.

### 5.5.3 Warmwassererwärmung

Die folgenden Standard-Schaltungen gehen auf die Warmwassererwärmung ein. Die Warmwasserwärmer sind, wenn möglich, über eine Warmwasser-Vorrangschaltung oder sogenannte Boilervorrangschaltung zu laden, womit der Leistungsbedarf für die Warmwassererwärmung nicht zum Heizleistungsbedarf addiert wird und somit keinen direkten Einfluss auf die abonnierte Leistung und auf die Auslegung der Übergabestation hat.

Direkter Anschluss eines Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager (Bild 5.17). Dieser Anschluss mit Einspritzschaltung ist speziell für Hochtemperaturnetze gedacht, bei der die Vorlauftemperatur deutlich über 70°C ist. Durch die Einspritzschaltung zur Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss soll der Kalkausfall im Wärmeübertrager verhindert, zumindest deutlich reduziert werden. Bei Vorlauftemperaturen bis 70°C ist eine Drosselschaltung gemäss Bild 5.11 zu bevorzugen.

Zu beachten ist der Nenndruck des primärseitigen Anschlusses des Wärmespeichers.

Die Ladung des Warmwasserspeichers erfolgt mit konstantem Durchfluss. Die maximal zulässige Rücklauftemperatur muss durch geeignete sekundärseitige hydraulische und regelungstechnische Massnahmen garantiert werden. Die Erfassung der Ein- und Ausschaltkriterien erfolgt über Temperaturfühler im Speicher.

Indirekter Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager (Bild 5.18). Dieser Anschluss mit Einspritzschaltung ist speziell für Hochtemperaturnetze gedacht, bei der die Vorlauftemperatur deutlich über 70°C ist (siehe oben). Bei Vorlauftemperaturen bis 70°C ist klar eine Drosselschaltung gemäss Bild 5.13 zu bevorzugen.

Dieselbe Schaltung gilt auch für einen indirekten Anschluss eines Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager. Die maximal zulässige Rücklauftemperatur muss durch geeignete sekundärseitige hydraulische und regelungstechnische Massnahmen garantiert werden.

Die Erfassung der Ein- und Ausschaltkriterien erfolgt über Temperaturfühler im Warmwasserspeicher. Die sekundärseitige Laderegulation erfolgt mit konstantem oder variablem Durchfluss. Bei variablem Durchfluss wird die drehzahlgeregelte Pumpe mit einer definierten Anfahrrampe hochgefahren und auf die Austrittstemperatur geregelt.

Die primärseitige Pumpe muss auf die Auslegebedingungen (Temperatur und Druck) des thermischen Netzes ausgelegt sein.

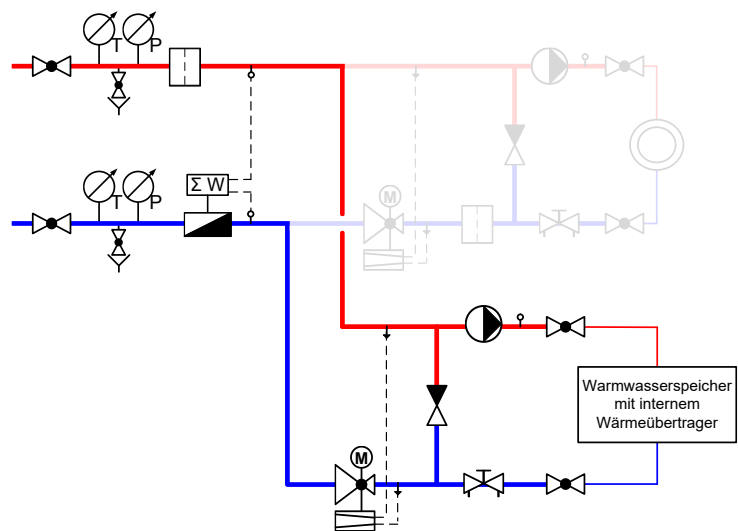


Bild 5.17 Direkter Anschluss eines Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager.

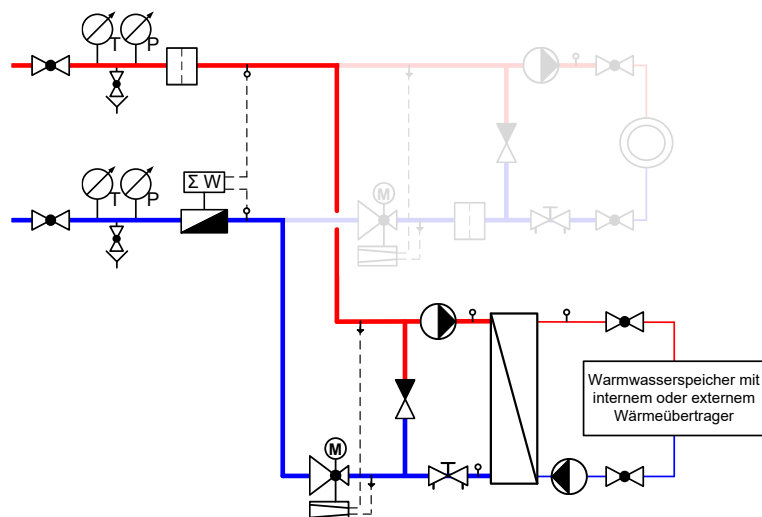


Bild 5.18 Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager oder ein indirekter Anschluss eines Warmwasserspeichers mit internem Wärmeübertrager.

Wesentlich für einen wirtschaftlichen und effizienten Betrieb von thermischen Netzen sind niedrige Rücklauftemperaturen. Der Fokus liegt dabei bei der hydraulischen Einbindung der Kunden und insbesondere bei der Warmwassererwärmung ist Optimierungspotenzial vorhanden. Zum Beispiel kann durch die Vorwärmung des Kaltwassers über einen zusätzlichen Wärmeübertrager (Vorwärmung) oder über einen zusätzlichen sanitärseitigen Speicher die Rücklauftemperatur zusätzlich gesenkt werden.

Mit dem Prinzip der Kaltwasser-Vorwärmung mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager kann bei allen Varianten der Warmwassererzeugung angewendet werden. Beispielhaft zeigt das Bild 5.19 eine Variante der Kaltwasser-Vorwärmung bei einem Warmwasserspeicher mit externem Wärmeübertrager. Die primärseitige Pumpe muss auf die Auslegebedingungen (Temperatur und Druck) des thermischen Netzes ausgelegt sein.

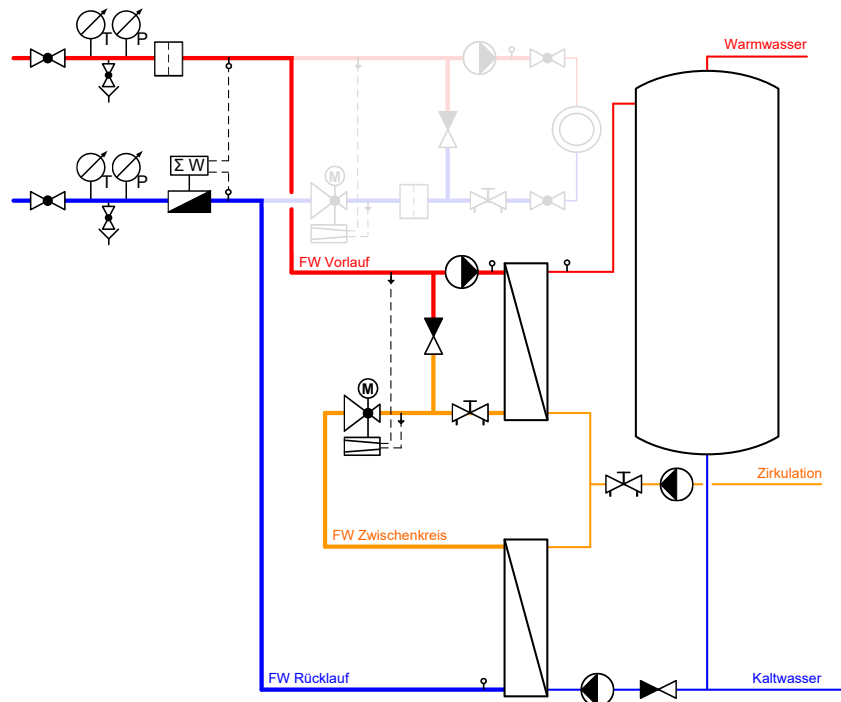


Bild 5.19 Anschluss eines Warmwasserspeichers mit externem Wärmeübertrager und Vorwärmung des Kaltwassers über einen separaten Wärmeübertrager.

Eine andere Variante der Vorwärmung bieten in Serie geschaltete Warmwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager. Der erste Warmwasserspeicher dient zur Vorwärmung und im nachgeschalteten Warmwasserspeicher wird auf die zur Vermeidung von Legionellen notwendigen Temperatur nacherwärmt (Bild 5.20).

Die Wassertemperatur im Speicher zur Vorwärmung erreicht in der Regel nicht mehr als 45°C und ist somit im Idealbereich der Legionellen Vermehrung. Deshalb sollte das Warmwasser im zweiten Speicher mindestens eine Stunde pro Tag auf über 60 °C erwärmt werden.

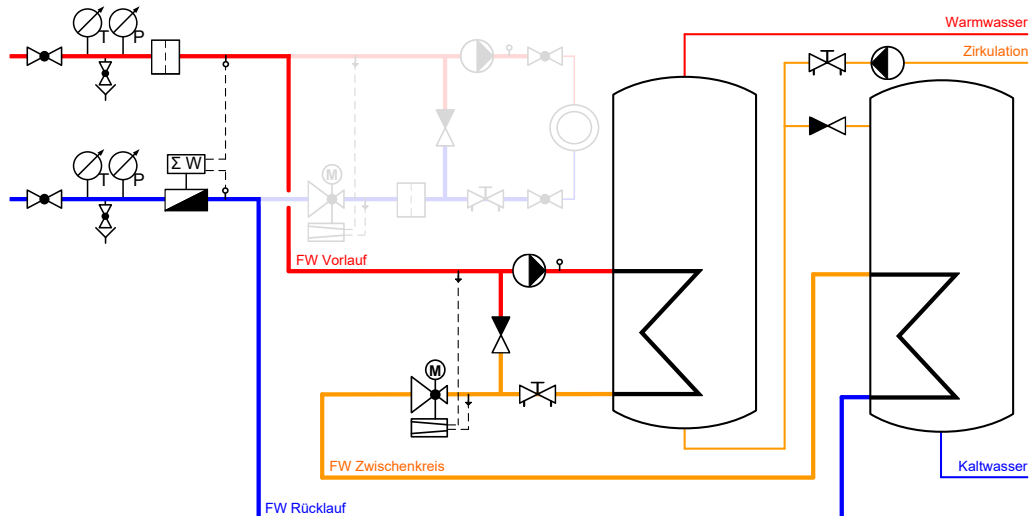


Bild 5.20 Anschluss von zwei in Serie geschalteten Warmwasserspeichern mit internem Wärmeübertrager.

## 5.5.4 Strahlpumpe

Eine weitere Anschlussmöglichkeit bietet der Anschluss mit Strahlpumpe. Diese Schaltung lässt sich analog den oben aufgeführten Schaltungen als direkter Anschluss (Bild 5.21) oder indirekter Anschluss (Bild 5.22) anwenden.

Die Strahlpumpe ergibt eine Temperaturregelung mit variablem Durchfluss. Die Strahlpumpe übernimmt die Funktion der Volumenstrom- und Differenzdruckregelung womit auf das Kombiventil verzichtet werden kann.

Zum Vergleich:

Die Drosselschaltung in Bild 5.21 ergibt eine Mengenregelung mit variablem Durchfluss. Die Einspritzschaltung in Bild 5.22 eine Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss.

Vorsicht ist wegen des variablen Durchflusses in schlecht abgeglichenen Wärmenetzen geboten (Gefahr des «Absterbens» von schlecht durchflossenen Anlagenteilen bei kleiner Last).

Um eine Verkalkung im Wärmeübertrager bei erhöhter Wasserhärte im Trinkwasser zu minimieren, kann die primäre Ladetemperatur des Wärmeübertragers begrenzt werden ohne dass eine Umwälzpumpe und ein Rückschlagventil eingesetzt werden muss (vgl. Einspritzschaltung).

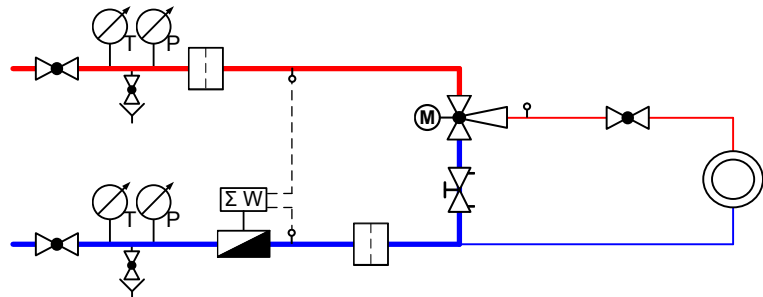


Bild 5.21 Direkter Anschluss mit Strahlpumpe.

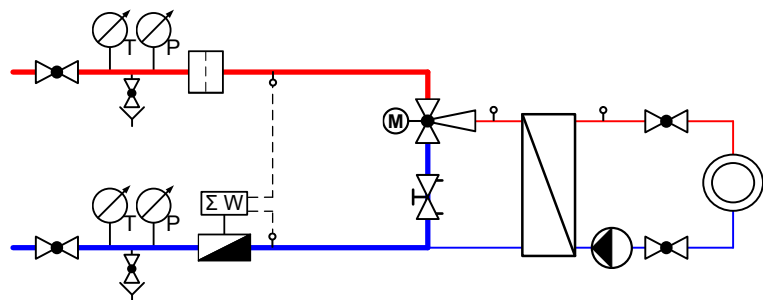


Bild 5.22 Indirekter Anschluss mit Strahlpumpe.

## 5.6 Ist-Analyse Kunde

Mit einer Ist-Analyse des Kunden sollen einerseits der Wärme- und Leistungsbedarf, das notwendige Temperaturniveau und das Lastprofil erhoben sowie plausibilisiert werden (siehe Kapitel 2.1). Andererseits soll die bestehende Situation der Sekundärseite beim Kunden beurteilt werden, damit dieser die Anforderungen des Wärmelieferanten erfüllen kann (siehe Kapitel 5.7).

Bei Neubauten erfolgt die Bewertung des Wärme- und Leistungsbedarfs in der Regel mit standardisierten Berechnungsverfahren. Bei Bestandsbauten ist von einer nicht-plausibilisierten Übernahme der wichtigsten Eckdaten zwingend abzuraten, da bestehende Wärmeerzeugungsanlagen vielfach überdimensioniert sind. Auch mitberücksichtigte Sicherheitszuschläge führen zu überhöhten abonnierten Leistungen. Siehe dazu die Ausführungen im Kapitel 2.1.

Für die Analyse und Plausibilisierung empfiehlt sich, in einem ersten Schritt einen standardisierten Fragebogen zu benutzen. Eine Vorlage steht auf der Webseite von QM Thermische Netze als Download zur Verfügung [199], dieser ist wie folgt gegliedert und kann von einem versierten Kunden grösstenteils selber ausgefüllt werden:

- Kontaktdaten

- Objektdaten
- Angaben Wärmeerzeugung (bisher)
- Angaben Energiebedarf (bisher)
- Sanierungsabsichten
- Übergabestation
- Angabe Wärmeabgabe und Wärmeverteilsystem Sekundärseite (Hydraulik, Schaltungen, Temperaturen, Regulierung etc.)
- Möglicher Anschlusszeitpunkt
- Beilagen.

Mit den vollständigen Angaben des Fragebogens kann ein potenzieller Wärmeabnehmer anhand von Kennzahlen und Richtwerten beurteilt werden. Bei Schlüsselkunden oder wo gewünscht, hilft ein persönliches Gespräch offene Fragen zu klären. Eine zusätzliche Begehung vor Ort ist zu empfehlen und rundet Analyse der Ist-Situation ab.

Für die Plausibilisierung und Beurteilung der Ist-Situation einzelner oder auch mehrerer Wärmeabnehmer bietet sich die frei zugängliche Excel-Tabelle Situationserfassung [200] von QM Holzheizwerke an. Es ist ein Excel-basiertes Berechnungstool zur Plausibilitätsprüfung der Energie- und Leistungsbedarfswerte.

## 5.7 Anforderungen an die Sekundärseite

Aus Sicht des Wärmelieferanten besteht ein grosses Interesse, über die technische Situation auf der Sekundärseite und die hydraulische Einbindung des Kunden Bescheid zu wissen. Das übergeordnete Ziel ist, dass die gelieferte Wärme möglichst effizient genutzt wird und tiefe primäre Rücklauftemperaturen erzeugt werden.

Aus rechtlicher Sicht besteht für den Wärmelieferanten aber grundsätzlich kein Rechtsanspruch auf die Gebäudetechnik beim Kunde. Die wichtigsten Anforderungen

an die Sekundärseite und die hydraulische Einbindung sind jedoch einzufordern und im Wärmeliefervertrag sowie in den Technischen Anschlussvorschriften vertraglich festzuhalten.

Es ist daher zu empfehlen, dass der Wärmelieferant und/oder Planer kontrolliert, dass die vereinbarten Anforderungen eingehalten und nachgewiesen werden.

Die in Tabelle 5.12 aufgeführten Anforderungen betreffen die gebäudetechnischen Anlagen wie die Wärmeverteilung und die hydraulische Einbindung im Gebäude für Heizung und Lüftung, Warmwassererwärmung und Regelung.

Tabelle 5.12 Anforderungen an die gebäudetechnischen Anlagen und an die hydraulische Einbindung bei einem Anschluss an ein thermisches Netz.

| Anforderung                | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hydraulik Allgemein</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Im Sanierungsfall ist das gesamte hydraulische Konzept zu überdenken und mit dem Wärmelieferanten abzusprechen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Hydraulische Schaltungen auf den neusten Stand der Technik bringen (z. B. Umlenkschaltungen umbauen).</li> <li>Bei bestehenden Pumpen die Dimensionierung prüfen und drehzahlgeregelte Pumpen einsetzen.</li> <li>Bestehende Regelventile durch druckunabhängige Regelventile (z. B. Kombiventile) ersetzen.</li> <li>Bestehende Sicherheitseinrichtungen überprüfen.</li> <li>Regelparameter anpassen.</li> </ul> </li> <li>Wärmedämmung gemäss kantonalen Vorschriften prüfen, bei Bedarf nachrüsten.</li> <li>Keine hydraulischen Kurzschlüsse auf der Primär- und Sekundärseite. Folgende Einrichtungen sind unzulässig: <ul style="list-style-type: none"> <li>Offene Expansionsgefässe</li> <li>Doppelverteiler (Rohr-in-Rohr, Vierkant)</li> <li>Bypässe (auf Verteiler, bei Verbrauchern etc.)</li> <li>Überströmregler und -ventile zwischen Vor- und Rücklauf</li> <li>Einspritzschaltungen mit Dreiwegventilen</li> <li>Umlenkschaltungen mit Dreiwegventilen</li> <li>Vierwegmischer.</li> </ul> </li> <li>Auf der Primärseite sind Überströmventile zur Sicherstellung eines Minimaldurchflusses am Ende der Stränge (z. B. Verhinderung von «kalten Zapfen») nur zulässig, wenn keine andere Lösung möglich ist und garantiert werden kann, dass der Durchfluss minimal ist.</li> <li>Zur Verhinderung des Rücklauftemperaturanstiegs bei Fehlzirkulation bzw. wenn der Durchfluss primärseitig grösser als der Durchfluss sekundärseitig ist (z. B. Fehler im Durchgangsventil), werden bei Einspritzschaltungen auf der Primärseite Rückschlagventile in den Bypässen eingesetzt. Die folgenden Nachteile eines Rückschlagventils sind bei der Auslegung der Schaltung jedoch zu beachten und eine Fehlzirkulation möglichst zu vermeiden: <ul style="list-style-type: none"> <li>Einseitige hydraulische Entkoppelung</li> <li>Drücke werden bei Fehlzirkulation addiert</li> <li>Gruppe wird trotz abgestellter Pumpe warm, wenn das Durchgangsventil ungewollt geöffnet wird.</li> </ul> </li> <li>Dynamischer hydraulischer Abgleich der Heizflächen- und Warmwasserzirkulationssysteme zur Sicherstellung korrekter Volumenströme.</li> <li>Nachweis über die Durchführung des hydraulischen Abgleichs auf der Sekundärseite ist vom Planer/ Ausführenden vorzulegen.</li> <li>Einbau und korrektes Einstellen von primärseitigen Rücklauftemperaturbegrenzern.</li> <li>Bei sekundärseitig verzweigten Netzen mit mehreren Verteilern ist es sinnvoll, vor den einzelnen Verteilern ein differenzdruckunabhängiges Regelventil zur Volumenstrom- und Differenzdruckregelung (Kombiventil) einzusetzen. Der erhöhte Druckabfall des Kombiventils (Wirkdruck ca. 20 kPa) ist zu beachten.</li> </ul> |

| Anforderung                | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Heizung</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alle Heizflächen sind mit selbsttätig wirkenden Thermostatventilen bestehend aus Stellantrieb und Stellgerät zur raumweisen Temperaturregelung auszurüsten. Wenn möglich sind druckunabhängige Thermostatventile mit einer Voreinstellmöglichkeit vorzusehen.</li> <li>Werden keine Thermostatventile eingesetzt (z. B. Altbau), sind geeignete Alternativen mit dem Kunden abzusprechen bzw. sollte im Bedarfsfall über eine Optimierungsstrategie verhandelt werden.</li> <li>Nutzung von hohen Rücklaufftemperaturen aus einzelnen Heizkreisen (z. B. Lüftung, statische Heizflächen etc.) zur Versorgung anderer Verbraucher (z. B. Fussboden- oder Wandheizung).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Lüftung</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lüftungsanlagen (einzeln oder im Ausnahmefall gruppenweise) sind mit Regelungseinrichtungen zu versehen. Als Regelgrösse können Raum-, Zu- und Ablufttemperatur dienen. Als Regelventil sind für den direkten Anschluss ans thermische Netz Durchgangsventile zu verwenden. Für den indirekten Anschluss können sowohl Durchgangs- wie auch Dreiwegventile verwendet werden.</li> <li>Mit Aussenluft beaufschlagte Lüftungsanlagen sind mit einer Frostschutzschaltung und gegebenenfalls einer Anfahrschaltung vorzusehen.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Warmwassererwärmung</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Eine Warmwassererwärmung mit hartem Wasser (<math>\geq 15</math> °fH; mittelhart) ist möglich. Zur Verhinderung der Verkalkung der Wärmeübertrager sind diese mit einer Rücklaufbeimischung anzuschliessen. Bei weichem Wasser oder wenn die primäre Vorlauftemperatur immer unter 70°C liegt, kann auf die Rücklaufbeimischung verzichtet werden (d.h. Pumpe und Rückschlagventil entfallen).</li> <li>Bei hartem Wasser (<math>\geq 15</math> °fH; mittelhart) sind zusätzlich Absperrorgane und Spülanschlüsse zur Reinigung des Wärmeübertragers vorzusehen. Bei Wärmeübertragern, insbesondere Plattenwärmeübertrager &lt; 200 kW, ist für kurzfristigen Ersatz zu sorgen bzw. sind diese vorrätig zu halten (Lagerhaltung beim Betreiber oder Lieferanten).</li> <li>Um den Kalk- und Salzausfall in Leitungen, Armaturen und Wärmeübertragern zu verhindern, ist eine Überhöhung der vorgeschriebenen Warmwassertemperatur zu vermeiden.</li> <li>Beim Wärmeübertrager sind zur schnelleren Abkühlung die Anschlüsse für Kaltwasser (sekundärseitig) und Rücklaufwasser (primärseitig) oben anzubringen.</li> <li>Die Zirkulation nicht in den heissen Bereich führen bzw. in die Nähe eines Temperaturfühlers einbinden.</li> <li>Bei ausreichender Dimensionierung des Warmwasserspeichers die Position des Temperaturfühlers optimieren – nach oben versetzen. Bei grösseren Warmwasserspeichern (<math>\geq 500</math> Liter) um einen zweiten Temperaturfühler erweitern.</li> <li>Werden mehrere Warmwasserspeicher eingebunden, ist eine Serienschaltung der Parallelschaltung vorzuziehen.</li> </ul> |
| <b>Regelung</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung von dicht schliessenden Regelorganen und regelungstechnisch korrekte Ansteuerung zur Vermeidung unkontrollierter Konvektion.</li> <li>Vermeidung von Schwingungen in hintereinander geschalteten Regelkreisen (z. B. thermisches Netz/Kundenanlage) durch schnellere Reaktionszeit und Arbeitsweise des nachfolgenden Regelkreises.</li> <li>Die hydraulische und regelungstechnische Auslegung (Regelventile, Wärmezähler, Wärmeübertrager etc.) hat entsprechend den Regeln der Technik zu erfolgen.</li> <li>Hydraulische Schaltungen sind so zu konzipieren, dass mengenvariable Teilstrecken entstehen. Dabei sollen druckunabhängige Regelventile eingebaut werden (z. B. Kombiventile).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |



## **Teil 2 – Planung, Betrieb und Optimierung**

## 6 Projektablauf

### 6.1 Übersicht

Das Gesamtsystem eines thermischen Netzes umfasst die Wärmeerzeugung, die Wärmeverteilung und die Wärmeabgabe an die Kunden. Die nachfolgende Beschreibung des Projektablaufs umfasst die Planungsaufgaben für das thermische Netz, also die Wärmeverteilung ab Wärmeerzeugung bis und mit Wärmeabgabe bei den Kunden. Das Bild 6.1 zeigt eine Übersicht über den Projektablauf. Dabei wird grundsätzlich unterschieden zwischen der Planungsphase und der Betriebsphase.

Die **Planungsphase** ist in vier Phasen unterteilt:

Phase 1: Vorstudie

Phase 2: Entwurfsplanung

Phase 3: Planung, Ausschreibung und Vergabe

Phase 4: Ausführung und Abnahme

Die Planung ist in **vier Checklisten** beschrieben:

Tabelle 6.10: Checkliste Phase 1

Tabelle 6.11: Checkliste Phase 2

Tabelle 6.12: Checkliste Phase 3

Tabelle 6.13: Checkliste Phase 4

Nach der Planungsphase beziehungsweise nach der Abnahme übernimmt der Betreiber des thermischen Netzes formell den operativen Betrieb der Anlage und wird in Ausnahmefällen und/oder zur Betriebsoptimierung durch den Planer unterstützt.

Die **Betriebsphase** umfasst folgende zwei Phasen:

Phase 5: Betriebsoptimierung

Phase 6: Betrieb und Bewirtschaftung

Die Betriebsphase ist in **zwei Checklisten** beschrieben:

Tabelle 6.14: Checkliste Phase 5

Tabelle 6.15: Checkliste Phase 6

### 6.2 Qualitätssicherung

Bei Planung, Ausführung und Betrieb von thermischen Netzen ist sicherzustellen, dass die vereinbarte Qualität bei Planung, Bau, Montage, Inbetriebnahme und Betrieb eingehalten wird. Dazu ist die Qualität zu definieren und die Ausführung durch Vergleich mit den Anforderungen zu überwachen. Die Qualitätssicherung ist dabei nicht auf einzelne Phasen beschränkt, sondern ist ein Prozess über alle Projektphasen hinweg.

Im AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil 17 [121] sind die notwendigen Massnahmen zur Qualitätssicherung bei der Ausführung eines thermischen Netzes mit KMR festgehalten. Die darin vorgestellten Strategien können teilweise auch auf andere Rohrsysteme übertragen werden [126]. Das Arbeitsblatt ist eng mit der SN EN ISO 9001 [201] verknüpft, welches von einer ganzheitlichen Betrachtung im Hinblick auf die Einbeziehung der Kundenforderung und Kundenzufriedenheit ausgeht. Im Arbeitsblatt FW 401 Teil 17 hat der AGFW Checklisten erarbeitet (Tabelle 6.1), die einen Überblick geben, an welchen Stellen des Bauvorhabens welche Qualitätssicherungsmassnahmen durchzuführen sind. Angesprochen werden dabei Auftraggeber (AG) bzw. dessen Beauftragte als Veranlasser einer Baumassnahme und Auftragnehmer (AN) wie zum Beispiel Tiefbauunternehmer oder Leitungsbauer.

Die Verwendung der Checklisten und die Ausführung nach SN EN ISO 9001 wird je nach Situation grundsätzlich verlangt, ansonsten wird deren Anwendung dringend empfohlen. Weiter stellt der SVGW in seinen Richtlinien F1 ([202]) und F5 ([203]) ebenfalls klare Anforderungen bezüglich der Qualität im Leitungsbau.

Tabelle 6.1 Auszug aus den Checklisten für den Auftraggeber AG und dem Auftragnehmer AN nach AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil 17 [121] in Teilgebiete der Ausführung gegliedert.

| Teilgebiet          | Überprüfungstätigkeiten                                                                                                                                 |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Projektvorbereitung | Planung und Auswahl des geeigneten Verlegekonzeptes, Vollständigkeit der Ausführungsunterlagen, Anfrage und Vergabe, Kontrolle der Ausführung, etc.     |
| Tiefbau             | Verkehrssicherung durch AN, Rohrgraben erstellen, Übergabe an Rohrleitungshersteller, Oberflächenwiederherstellung, etc.                                |
| Rohrleitungsbau     | Prüfung der Rohrleitungen und sonst. Materialien, Rohrverlegung und Montage, Nachweis der Fertigungsqualität der Schweissnähte, Nachweis der Dichtheit, |
| Muffenmontage       | Überprüfen der Qualifikation des Fachpersonals, Muffen und Dehnpolstermontage, Abnahme des Rohrleitungsbaus und Muffenmontage,                          |
| Projektabschluss    | Gemeinsame Abnahme der ausgeführten Arbeiten (AG und AN), Vollständigkeit der Dokumentation, Übergabe an den Betrieb                                    |

Tabelle 6.2 Vergleich Planungsabläufe und gültige Regelwerke in der Schweiz, Deutschland und Österreich mit einem für das Planungshandbuch Thermische Netze optimierten Projektablauf. Die Regelwerke verwenden unterschiedliche Begriffe und auch die einzelnen Planungsabläufe weisen gewisse Unterschiede auf.

| Schweiz                                                                                                                                                                                       | Deutschland                                                                                                     | Österreich                                                                                                                                                          | Planungshandbuch<br>Thermische Netze     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>SIA-Ordnung 108 [204]<br/>Ausgabe 2020</b>                                                                                                                                                 | <b>Honorarordnung für Architekten<br/>und Ingenieure (HOAI) [205]<br/>Ausgabe 2021</b>                          | <b>Unverbindliche Kalkulations-<br/>empfehlung für Ingenieurlei-<br/>stungen Leistungsbild Techni-<br/>sche Ausrüstung [206]</b>                                    |                                          |
| <b>Phasen und Teilphasen</b>                                                                                                                                                                  | <b>Leistungsphasen</b>                                                                                          |                                                                                                                                                                     | <b>Projektphasen</b>                     |
| 1 Strategische Planung<br>11 Bedürfnisformulierung, Lö-<br>sungsstrategien                                                                                                                    | 1. Grundlagenermittlung                                                                                         | 1. Grundlagenermittlung                                                                                                                                             | (Leitfaden TNS [207])                    |
| 2 Vorstudien<br>21 Projektdefinition, Machbar-<br>keitsstudie<br>22 Auswahlverfahren                                                                                                          | 2. Vorplanung (Projekt- und<br>Planungsvorbereitung)                                                            | 2. Vorplanung                                                                                                                                                       | 1. Vorstudie                             |
| 3 Projektierung<br>31 Vorprojekt                                                                                                                                                              | 3. Entwurfsplanung (System-<br>Integrationsplanung)                                                             | 3. Entwurfsplanung                                                                                                                                                  | 2. Entwurfsplanung                       |
| 32 Bauprojekt<br>33 Bewilligungsverfahren, Aufla-<br>geprojekt<br>4 Ausschreibung<br>41 Ausschreibung, Offertver-<br>gleich, Vergabeantrag (erstel-<br>len der Ausschreibungsunter-<br>lagen) | 4. Genehmigungsplanung<br>5. Ausführungsplanung<br>6. Vorbereitung der Vergabe<br>7. Mitwirkung bei der Vergabe | 4. Bewilligungsplanung (Geneh-<br>migungsplanung)<br>5. Projektplanung (Ausführungs-<br>leitplanung)<br>6. Vorbereitung der Vergabe<br>7. Mitwirken bei der Vergabe | 3. Planung, Ausschreibung<br>und Vergabe |
| 5 Realisierung<br>51 Ausführungsprojekt<br>52 Ausführung<br>53 Inbetriebnahme, Abschluss                                                                                                      | 8. Objektüberwachung (Bau-<br>überwachung) und Dokumen-<br>tation                                               | 8. Fachbauaufsicht (Bauüberwa-<br>chung), Abnahme, Rech-<br>nungsprüfung<br>9. Abnahme                                                                              | 4. Ausführung und Abnahme                |
| 6 Bewirtschaftung<br>61 Betrieb, Betriebsoptimierung<br>62 Erhaltung                                                                                                                          | 9. Objektbetreuung                                                                                              | 10. Rechnungsprüfung                                                                                                                                                | 5. Betriebsoptimierung                   |
|                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                 |                                                                                                                                                                     | 6. Betrieb und Bewirtschaftung           |

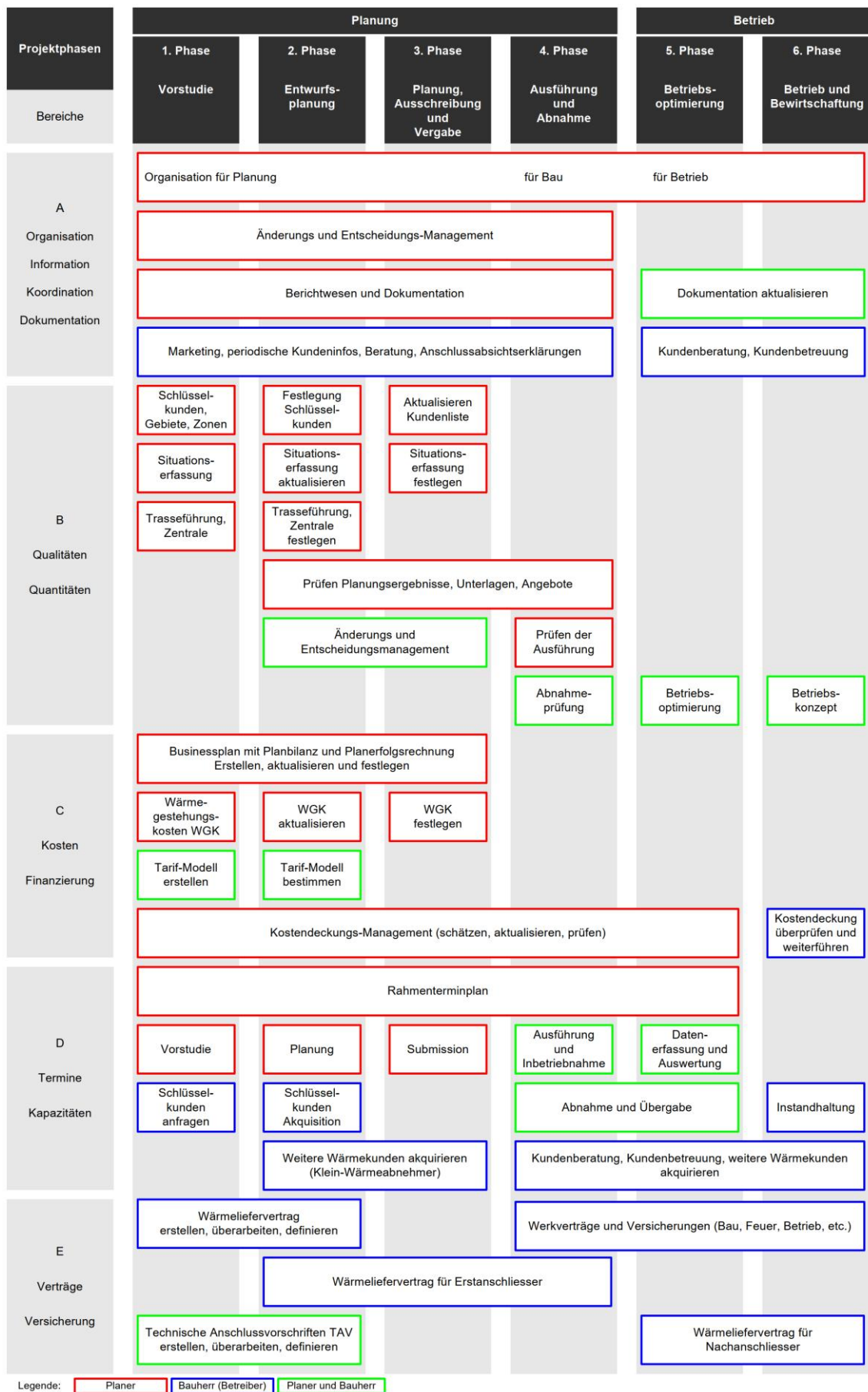


Bild 6.1 Übersicht Projektablauf

### 6.3 Unterschiede zwischen SIA 108 und Planungshandbuch Thermische Netze

Die Tabelle 6.2 zeigt die Begriffe der Planungsabläufe für verschiedene Regelwerke in der Schweiz, in Deutschland und in Österreich sowie die Zuteilung und Begriffsverwendung im vorliegenden Planungshandbuch Thermische Netze.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen der SIA 108 und dem Planungsablauf im vorliegenden Planungshandbuch sind folgende:

- Die SIA 108 Phase 1 Strategische Planung wird durch den Leitfaden vom Verband Thermische Netze Schweiz TNS abgedeckt. Das Planungshandbuch steigt im Wesentlichen bei der SIA Phase 2 Vorstudie ein.
- Die SIA 108 Phase 3 und 4 wird im Planungshandbuch in einer Phase zusammengefasst (Phase 3 Planung, Ausschreibung und Vergabe).
- Die SIA 108 Phase 6 Bewirtschaftung wird im Planungshandbuch in zwei Phasen aufgeteilt. Einmal in Phase 5 Bewirtschaftung und einmal in Phase 6 Betrieb und Bewirtschaftung.

Des Weiteren sind im Bild 6.1 eine mögliche Zuteilung der wichtigsten Aufgaben und Verantwortlichkeiten von Planenden und Betreibenden zu sehen. Je nach Situation, Knowhow, Ressourcen etc. können die Aufgaben und Verantwortlichkeiten untereinander anders aufgeteilt werden und soll lediglich als Grundlage für die Zuteilung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten dienen.

### 6.4 Phase 1: Vorstudie

Das Ziel der **Vorstudie** sind verbindliche Aussagen zu Machbarkeit, Chancen und Risiken zu erhalten. Klar vereinbarte Ziele und eine Situationserfassung bilden die Grundlagen dazu.

Ziel der Situationserfassung ist, die Auslegungs- und Entscheidungsbasis für ein technisch und wirtschaftlich optimales thermisches Netz zu schaffen. Insbesondere gilt es in einem iterativen Prozess die optimale Energieversorgung und Netzstruktur für eventuell einzelne Ausbaustufen und schlussendlich für den Endausbau zu finden. Auf Basis dieser Situationsanalyse können die Produktion, die Verteilung und die Übergabe optimal ausgelegt werden. Je nach Projektfortschritt sind folgende Punkte zu erfassen:

1. Wärmeversorgungsgebiet
2. Für jeden Kunden aufgeteilt in Raumwärme, ev. Klimakälte, Warmwasser, Prozesswärme:
  - a) Wärme- Kältebedarf
  - b) Leistungsbedarf
  - c) erforderliches Temperaturniveau
3. Jahres-Wärme- / Kältebedarf Gesamtanlage

4. Lastkennlinie Gesamtanlage inkl. Berücksichtigung von thermischen Energiespeicher
5. Jahresdauerlinie Wärme- / Kälteleistungsbedarf Gesamtanlage inkl. Berücksichtigung von thermischen Energiespeicher
6. Standort(e) Energieproduktion und Energieträgermix
7. Trassenplan des thermischen Netzes
8. Festlegung Rohrsystem
9. Energiegestehungskosten.

Weitere wichtige Arbeiten, die in der Regel parallel ablaufen und mit der technischen Abklärung nicht direkt in Zusammenhang stehen, sind:

- Standortsicherung Energiezentrale
- Marketing und Kundenbetreuung
- Kundenakquisition und Absichtserklärungen einholen
- Vertragswesen
- Kostenmanagement (Businessplan und Planerfolgsrechnung).

Die aufgeführten Punkte und Arbeiten sind nicht immer fest einer Phase zugeteilt. Teilweise sind die Arbeiten Phasenübergreifend weiterzuführen, zu aktualisieren und zu konkretisieren. Je nach Projekt muss der Ablauf eventuell angepasst werden.

In den nächsten Kapiteln wird auf die einzelnen Aufgaben eingegangen.

#### 6.4.1 Potenzielles Wärme- / Kälteversorgungsgebiet

Ein potenzielles Wärme- und oder Kälteversorgungsgebiet ist beispielsweise eine Ortschaft, Ortsteile, Quartiere, mehrere Grosskunden oder ein einzelner Grosskunde mit umliegenden Gebäuden. Die Einteilung des potenziellen Perimeters in Gebiete und Zonen erfolgt aufgrund der erwarteten Wärme- / Kältebezugsdichte von Gebäudetypen (EFH-Siedlung, Industrie, MFH-Gebiete usw.) oder aufgrund von geografischen Gegebenheiten wie Strassen, Bahntrassen oder Gewässern. Die Zonen können vereinfacht wie Grosskunden behandelt werden. Als Hilfsmittel zur Einteilung einer Ortschaft dient auch der Ortsplan oder wenn vorhanden ein Energiekataster.

Wichtig ist, die **Schlüsselkunden** in einem Gebiet zu identifizieren und diese für den Anschluss an das thermische Netz zu gewinnen. Schlüsselkunden zeichnen sich durch einen hohen Leistungs- und / oder Energiebedarf aus (zum Beispiel > 50 kW bei 2000 h/a). Beispiele für Schlüsselkunden sind:

- Industrie mit Prozesswärme / Prozesskälte
- MFH-Gebiete
- Dorf- oder Stadtkerne
- Zonen mit verdichteter Bauweise.

Nur mit Schlüsselkunden kann eine Zone oder ein Gebiet optimal und wirtschaftlich an ein thermisches Netz angeschlossen werden, weshalb folgendes Vorgehen empfohlen wird:

1. Schlüsselkunden in einem potenziellen Gebiet definieren
2. Schlüsselkunden vertraglich binden (Absichtserklärung bietet Planungssicherheit)
3. Potenzielle Trassenführung (Netzstruktur) definieren
4. Potenzielle weitere Kunden entlang des Trasses akquirieren.

Die **Wärmebezugsdichte** ist ein Mass für die Eignung einer Zone für den Anschluss an ein thermisches Netz (siehe Tabelle 6.3). Sie setzt den jährlichen Wärmebezug aller Gebäude ins Verhältnis zur Grundstücksfläche der Zone:

$$\text{Wärmebezugsdichte} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{a m}^2} \right] = \frac{\text{Wärmebedarf} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right]}{\text{Zonenfläche} \left[ \text{m}^2 \right]}$$

Für die Wärmebezugsdichte gelten folgende Aussagen:

- EFH-Gebiete sind in der Regel nicht interessant (Wärmebezugsdichte 15 – 30 kWh/a m<sup>2</sup>).
- Interessante Gebiete sind MFH-Gebiete, Dorf- oder Stadtkerne oder Zonen mit verdichteter Bauweise (städtische Gebiete).
- Die Wirtschaftlichkeit eines thermischen Netz kann verbessert werden, wenn die in den Zonen oder nahegelegene Grosskunden (Schlüsselkunden) eingebunden werden können.
- Ein thermisches Netz für nur einen Grosskunden ist nur dann interessant, wenn die umliegenden Gebiete eine hohe Wärmebezugsdichte aufweisen.
- Grosskunden sollen über ein thermisches Netz verbunden werden, wenn sie örtlich nahe beisammen sind.

Tabelle 6.3 Empfohlene Wärmebezugsdichte einer Zone als Eignungskriterium [39].

| Eignung für thermisches Netz | Wärmebezugsdichte<br>kWh/(a m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|----------------------------------------------|
| Nicht geeignet               | < 50                                         |
| Bedingt geeignet             | 50 – 70                                      |
| Geeignet                     | > 70                                         |

Je nach Situation, können mit tiefen Investitions-, Bau- und Energiekosten Gebiete mit einer tieferen Wärmebezugsdichte als 70 kWh/(a m<sup>2</sup>) wirtschaftlich mit einem thermischen Netz versorgt werden. Dies sollte aber vertieft durch eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung (Vollkostenrechnung) nachgewiesen werden.

In Werkzeugkoffer zur räumlichen Energieplanung Modul 7 [9] wird die in der betrachtenden Zone geltende Ausnützungsziffer als weitere Eignungsgrösse ein-

geführt. Die Ausnützungsziffer ist dabei das Verhältnis zwischen der anrechenbaren Bruttogeschossfläche des Gebäudes und der anrechenbaren Landfläche. Dabei wird auch die Netztemperatur mitberücksichtigt (siehe Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4 Nutzerseitige Eignung von Wohngebieten bzw. Zonen mit mehrheitlich Wohnbauten für Hoch (HT)- und Niedertemperatur (NT)-Netze.

Annahmen:

Anschlussdichte ca. 2 MWh/(a m).

Verteilkosten Neubauten: 800 CHF/Tm

Bestehende Gebäude: 1200 CHF/Tm;

Wirtschaftlichkeitsgrenze bei Verteilkosten von 40 Fr. / MWh (vgl. [9] Modul 7).

Tm = Trassenmeter

| Ausnützungsziffer | Bestehende Bauten  |                    |
|-------------------|--------------------|--------------------|
|                   | HT-Netze (≥ 60 °C) | NT-Netze (≤ 60 °C) |
| < 0.5             | wenig geeignet     | wenig geeignet     |
| 0.5 – 0.8         | bedingt geeignet   | bedingt geeignet   |
| 0.8 – 1.1         | geeignet           | geeignet           |
| > 1.1             | geeignet           | geeignet           |

| Ausnützungsziffer | Neubauten          |                    |
|-------------------|--------------------|--------------------|
|                   | HT-Netze (≥ 60 °C) | NT-Netze (≤ 60 °C) |
| < 0.5             | wenig geeignet     | wenig geeignet     |
| 0.5 – 0.8         | wenig geeignet     | bedingt geeignet   |
| 0.8 – 1.1         | bedingt geeignet   | bedingt geeignet   |
| > 1.1             | geeignet           | geeignet           |

## 6.4.2 Umfrage Schlüsselkunden

Die Umfrage bei Schlüsselkunden soll das Anschlussinteresse klären und Planungsdaten zur Verfügung stellen. Oft liegen bei bestehenden Gebäuden oder besonderen Bauten keine geeigneten Daten vor oder ihre Erhebung ist aufwändig. In der Vorstudie sollte der Aufwand dafür klein gehalten werden und eventuell mit mündlichen Anfragen und Abschätzungen gearbeitet werden.

Für eine grobe Abschätzung der Wärmebezugsdichte in einem Wärmeversorgungsgebiet kann der Jahreswärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser der einzelnen Gebäude auch abgeschätzt werden. Dazu dienen folgende Methoden:

- a) Abschätzung des Jahreswärmebedarfs über die Energiebezugsfläche EBF, Gebäudestandard und Nutzungsart. Dazu werden der spezifische Heizwärmebedarf und der spezifische Wärmebedarf für Brauchwarmwasser gemäss Tabelle 6.5 addiert und mit der Energiebezugsfläche multipliziert:
- $$Q_G = EBF (q_H + q_{WW})$$

$Q_G$  = Jahreswärmebedarf Gebäude in kWh/a

EBF = Energiebezugsfläche in m<sup>2</sup>

$q_H$  = spez. Heizwärmebedarf in kWh/(a m<sup>2</sup>)

$q_{WW}$  = spez. Wärmebedarf Warmwasser in kWh/(a m<sup>2</sup>)

Abschätzung des Jahreswärmebedarfs über das Gebäudevolumen, Gebäudestandard und Nutzungsart. Dazu wird der spezifische Wärmeleistungsbedarf eines Gebäudes gemäss

- b) Tabelle 6.6 mit dem beheizten Grundriss, der Geschosshöhe (visuelle Kontrolle vor Ort) und der Vollbetriebsstunden gemäss Tabelle 6.7
- c) multipliziert. Die Vollbetriebsstundenzahl von Schulanlagen, Industrie, Gewerbe und Büro mit Wochenendabsenkung und Ferienabsenkung ist um ca. 15% zu vermindern.

Auf Basis von Fragebögen und weiteren Abschätzungen zum Wärmebedarf werden die **Lastkennlinie** und die **Jahresdauerlinie** für das potenzielle Wärmeversorgungsgebiet bestimmt. Als hilfreiches Tool kann die frei zugängliche Excel-Tabelle zur Situationserfassung [200] von QM Holzheizwerke empfohlen werden.

**Tabelle 6.5** Spezifischer Heizwärmebedarf und spezifischer Wärmebedarf Brauchwarmwasser für Gebäude unterschiedlicher Heizgrenzen und Regionen der Schweiz [208].  
Bedeutung der Heizgrenzen:  
15°C: Gebäude vor 1980  
13°C: Gebäude nach 1980 oder energetisch saniert  
11°C: Neubauten oder energetisch saniert nach Standard Minergie.

| Ort                                      | Spezifischer Heizwärmebedarf<br>in [kWh/(a m²)] |       |       |    |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------|-------|----|
|                                          | Raumwärme                                       |       |       | WW |
| Heizgrenze                               | 15°C                                            | 13°C  | 11°C  | –  |
| Mittelland (Zürich)<br>300...800 m.ü.M.  | 60–100                                          | 30–60 | 20–40 | 20 |
| Bergregion (Davos)<br>800...1'800 m.ü.M. | 75–120                                          | 35–75 | 25–45 | 20 |
| Südschweiz (Locarno)<br>200...600 m.ü.M. | 50–85                                           | 25–50 | 20–35 | 20 |

**Tabelle 6.6** Spezifischer Wärmeleistungsbedarf verschiedener Gebäudetypen (basierend auf Tagesmittelwert ohne Berücksichtigung von Aufheizspitzen [39].

| Gebäudetyp                                    | Spezifischer Wärmeleistungsbedarf<br>W/m³ |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Herkömmlich wärmegeämmte Wohnhäuser           | 20 – 27                                   |
| Gut wärmegeämmte bestehende Wohnhäuser        | 15 – 20                                   |
| Neubauten gemäss heutigen Vorschriften        | 8 – 15                                    |
| Herkömmliche Dienstleistungsgebäude           | 23 – 30                                   |
| Werkstatt-, Produktionsräume oder Lagerhallen | 10 – 20                                   |

**Tabelle 6.7** Vollbetriebsstunden für bestehende Gebäude (Raumwärme und Brauchwarmwasser). Langjährige Erfahrungswerte für Gebäude unterschiedlicher Heizgrenzen und Regionen der Schweiz [208].  
Bedeutung der Heizgrenzen:  
15°C: Gebäude vor 1980  
13°C: Gebäude nach 1980 oder energetisch saniert  
11°C: Neubauten oder energetisch saniert nach Standard Minergie.

| Ort                                      | Vollbetriebsstunden in h/a |               |               |               |
|------------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                          | Heizgrenze                 | 15°C          | 13°C          | 11°C          |
| Mittelland (Zürich)<br>300...800 m.ü.M.  |                            | 2'000 – 2'500 | 1'600 – 2'000 | 1'300 – 1'700 |
| Bergregion (Davos)<br>800...1'800 m.ü.M. |                            | 2'300 – 2'800 | 1'900 – 2'300 | 1'600 – 2'000 |
| Südschweiz (Locarno)<br>200...600 m.ü.M. |                            | 1'700 – 2'200 | 1'400 – 1'700 | 1'400 – 1'800 |

### 6.4.3 Aktualisieren Wärmeversorgungsgebiet

Um den wirtschaftlichen Betrieb des thermischen Netzes nicht zu gefährden, werden in einem ersten Schritt ungeeignete Zonen mit tiefen Wärmebezugsdichten ausgeschieden. Übrig bleibt das mögliche, potenziell wirtschaftliche Wärmeversorgungsgebiet.

Für eine Erschliessung werden zusammenhängende Zonen mit hoher Wärmebezugsdichte ausgewählt. Darin werden Standort der Wärmeerzeugung und Lage des thermischen Netz so festgelegt, dass das Leitungsnetz möglichst kurz bleibt. Wenn die Erschliessung einzelner Kunden aufgrund der Lage des thermischen Netzes (Trassenplan) ungünstig liegen, obwohl ein Anschlussinteresse vorliegt, müssen diese unter Umständen ausgeschieden oder erst für eine spätere Erweiterungsphase berücksichtigt werden. Vom ursprünglichen, potenziellen Versorgungsgebiet bleibt das für die Erschliessung geeignete Versorgungsgebiet übrig.

Mit der Annahme eines **Erschliessungsgrades** von 50% bis 80% des geeigneten Versorgungsgebietes wird der **Jahreswärmebedarf** abgeschätzt.

Für die Beurteilung des benötigten Wärmeleistungsbedarfs kann zusätzlich ein **Gleichzeitigkeitsfaktor** berücksichtigt werden. Dieser beschreibt im Verbund bei einer Vielzahl von Kunden den Effekt, dass praktisch zu keinem Zeitpunkt alle Kunden gleichzeitig die maximale Leistung beziehen. Es ist somit eine Basisgrösse für die Dimensionierung des Verteilnetzes und die Auslegung der Wärmeerzeuger.

Per Definition beschreibt der Gleichzeitigkeitsfaktor das Verhältnis zwischen dem maximalen gleichzeitig anfallenden Wärmeleistungsbedarf und der gesamten abonnierten Anschlussleistung aller Kunden [209]:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i(t_{\max})}{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i(t)}$$

- $g$  = Gleichzeitigkeitsfaktor (dimensionslos)  
 $\dot{Q}_i(t_{\max})$  = Abnahmeleistung des Kunden  $i$  zum Zeitpunkt der maximalen Leistungsanforderung in kW  
 $\dot{Q}_i(t)$  = Abonnierte Leistung des Kunden  $i$  in kW  
 $n$  = Anzahl Kunden

Für den Gleichzeitigkeitsfaktor gilt somit  $g \leq 1$ . In Bild 6.2 ist der Gleichzeitigkeitsfaktor als Näherungsfunktion in Abhängigkeit der Anzahl Wärmekunden basierend auf einer Erhebung aus dem Jahre 2001 dargestellt [209].

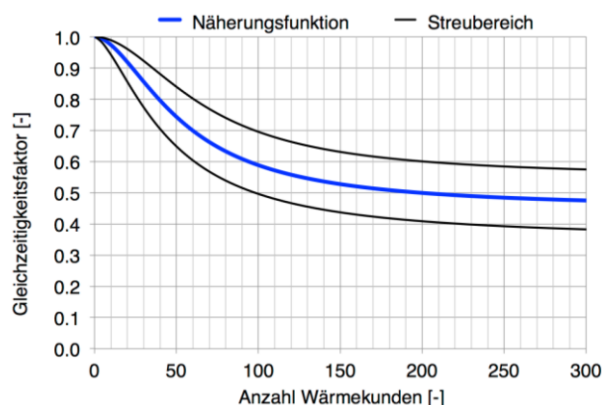


Bild 6.2 Näherungsfunktion und Streubereich für den Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit der Anzahl Kunden (Grafik nach [209]).

Bei der Benutzung des Gleichzeitigkeitsfaktors ist Vorsicht geboten. Es ist einerseits wichtig zu wissen, woher die Angaben des maximalen Leistungsbedarfs der einzelnen Kunden kommen und zum anderen ist eine Plausibilisierung der Angaben vorzunehmen. Für die Festlegung der Gleichzeitigkeit ist auch die Kundenstruktur berücksichtigen. So haben Kunden mit (konstanter) Prozesswärme in der Regel eine höhere Gleichzeitigkeit als zum Beispiel eine Einfamilienhaus-siedlung oder Kunden mit einem saisonal schwankenden Leistungsbedarf. Andererseits kann eine saisonale Spitzenlast zu kurzfristig erhöhten Gleichzeitigkeitsfaktoren führen, zum Beispiel während der Ferienzeit in Wintersportorten mit maximaler Belegung von Hotels und Ferienwohnungen. Nur so ist es dem Planer oder dem Energieversorger möglich, die Leistungsanforderungen der Kunden (abonnierte Leistung) bei der Auslegung und Dimensionierung der benötigten Infrastruktur richtig einzuordnen. Die Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit beruht daher auf viel Erfahrung sowie einer guten Kenntnis und Plausibilisierung der Auslegedaten der einzelnen Kunden.

Bei der Benutzung der in Kapitel 6.4.2 erwähnten Excel-Tabelle Situationserfassung von QM Holzheizwerke ist darauf zu achten, dass kein (globaler) Gleichzeitigkeitsfaktor benutzt wird, da der Leistungsbedarf der einzelnen Kunden als Tagesmittel und nicht als

maximalen Tages-Stundenwert hinterlegt werden soll. Mit der Berücksichtigung von Tagesmittelwerten wird bei der Systemwahl und der Auslegung des Wärmeerzeugers bereits eine Art Gleichzeitigkeit berücksichtigt, welche nicht zusätzlich verwendet werden soll.

#### 6.4.4 Erste wirtschaftliche Betrachtung

Bei thermischen Netzen wird von einem wirtschaftlichen Betrieb ausgegangen, wenn der Erlös vom Wärmeverkauf die Wärmegestehungskosten aus Kapital- und Betriebskosten inkl. Amortisation der Anlagen übersteigt. Ein wichtiger Indikator zur Abschätzung, ob ein thermisches Netz wirtschaftlich sein kann, ist die Anschlussdichte. Die Anschlussdichte ist das Verhältnis zwischen der jährlich verkauften Wärmemenge in MWh/a und der gesamten Trassenlänge von Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen in Metern:

$$\text{Anschlussdichte} \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{a m}} \right] = \frac{\text{Wärmebezug der Kunden} \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \right]}{\text{Trassenlänge} [\text{m}]}$$

Da die Anschlussdichte zur Charakterisierung des Verteilnetzes dient, sind Kunden, welche für den Eigenbedarf am Standort der Energiezentrale direkt versorgt werden, nicht einzubeziehen.

Für eine Grobbeurteilung ohne genauere Kenntnis der Randbedingungen gelten gemäss Tabelle 6.8 Versorgungsgebiete mit einer Anschlussdichte  $> 2 \text{ MWh}/(\text{a m})$  im Endausbau in der Regel als wirtschaftlich attraktiv.

Tabelle 6.8 Empfohlene Anschlussdichten für einen wirtschaftlichen Betrieb [39].

| Ausbaustatus      | Anschlussdichte in MWh/(a m)     |                                    |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|                   | Einfache (günstige) Bedingungen* | Komplexe (ungünstige) Bedingungen* |
| Erste Ausbaustufe | $> 0.7$                          | $> 1.4$                            |
| Endausbau         | $> 1.2$                          | $> 2.0$                            |

\* Die Bedingungen beinhalten Bedingungen beim Bau des Verteilnetzes in Bezug auf Komplexität (Oberfläche, Werkleitungen, Geländetopologie, Koordination etc.) und Kosten (Rohrsystem, Verkehrsführung, Bauzeit, Urbanes oder ländliches Umfeld etc.).

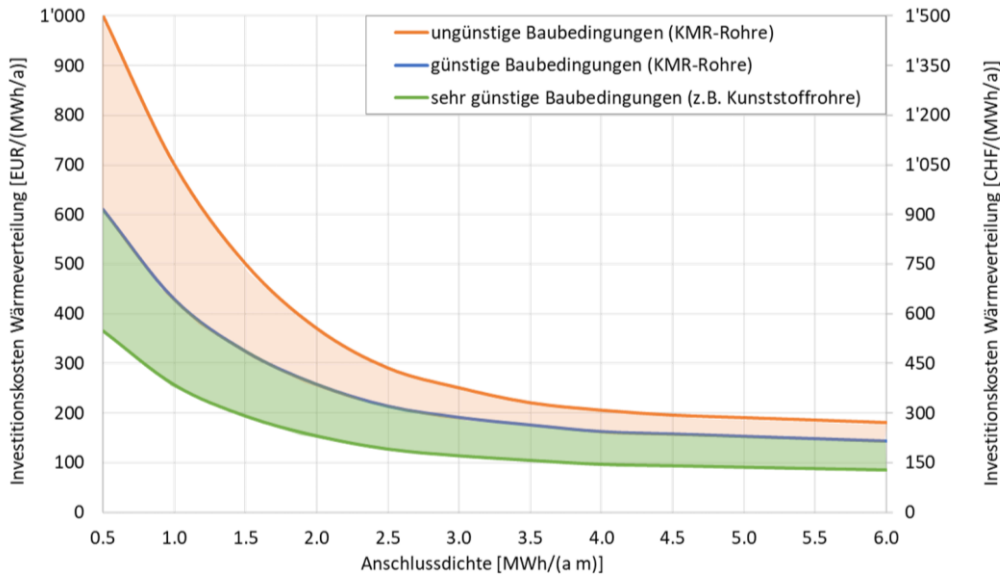
Im Falle von günstigen Energieträgern oder Wärmequellen sowie bei vorteilhaften Baubedingungen können geringere Anschlussdichten ebenfalls einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Im ländlichen Kontext sind die Bedingungen beziehungsweise die Kosten für den Bau des Verteilnetzes in der Regel «günstiger» als in einem städtischen Kontext. Richtwerte spezifischer Investitionskosten der Wärmeverteilung in Funktion der Anschlussdichte sind im Bild 6.3 zu finden.

In jedem Fall ist die Wirtschaftlichkeit durch eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung (Vollkostenrechnung) nachzuweisen.

Der Anschluss von **Kleinkunden** in der Nähe oder entlang einer Trasse, ist normalerweise unkritisch in

Bezug auf die Wirtschaftlichkeit. Befindet sich jedoch ein Kleinkunde weit entfernt von der nächsten Haupt- oder Zweigleitung, so reduziert dies die Anschlussdichte, weshalb ein entsprechender Anschluss unattraktiv

sein kann und individuell geprüft werden muss. Der Anschluss kann allenfalls an eine Beteiligung an den zusätzlich anfallenden Anschlusskosten oder einen erhöhten Wärmepreis gebunden werden.

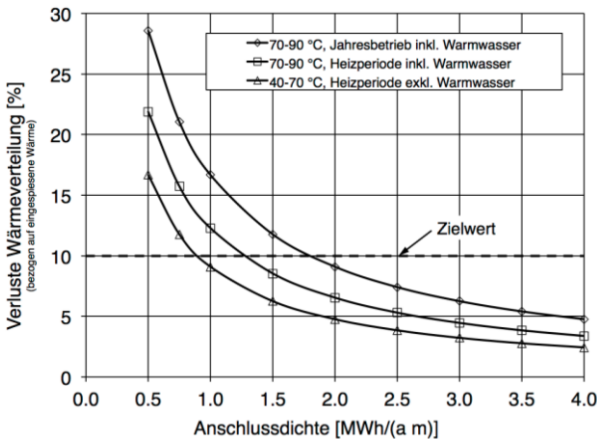


**Bild 6.3** Richtwerte spezifischer Investitionskosten der Wärmeverteilung in Funktion der Anschlussdichte – Auswertung realisierter Anlagen aus AT und CH im Zeitraum 2009 – 2018 [39]. In den Kosten enthalten sind die Fernleitungsgruppe in der Heizzentrale, das Fernleitungsnetz inklusive Grabarbeiten sowie die Hausanschlüsse bis und mit Wärmeübergabestationen (ohne Hauszentrale). EUR/CHF - Umrechnung berücksichtigt unterschiedliche Preisniveaus in AT und CH

Die **Wärmeverteilungsverluste** sind ebenfalls eine wichtige Kenngrösse, welche die Wirtschaftlichkeit beeinflussen und sie sind von folgende Faktoren abhängig:

- Dimensionierung der Rohrleitungen
- Dämmstärke der Rohrleitungen
- Temperaturniveau von Vor- und Rücklauf
- Anschlussdichte
- Betriebsdauer (Ganzjahres- oder Saisonbetrieb).

Die Wärmeverteilungsverluste werden als Differenz zwischen der dem thermischen Netz zugeführten und der von allen Kunden bezogenen Wärmemenge bestimmt (siehe auch Kapitel 4.7.4).



**Bild 6.4** Wärmeverteilungsverluste in Funktion der Anschlussdichte für verschiedene Betriebsweisen und Vorlauftemperatur-Niveaus des Wärmenetzes nach [39].

Das Bild 6.4 zeigt die Wärmeverteilungsverluste in Funktion der Anschlussdichte für verschiedene Betriebsweisen und Vorlauftemperaturen. Bei einer Anschlussdichte von  $> 1.8 \text{ MWh}/(\text{a m})$  sollten die Wärmeverteilungsverluste einen Zielwert von 10% des Nutzwärmebedarfs der Kunden nicht übersteigen. Um den Zielwert nach Bild 6.4 zu erreichen, müssen je nach Betriebsweise und Temperaturniveau die in Tabelle 6.9 aufgeführten Anschlussdichten eingehalten werden. Weiter zu berücksichtigen ist, dass die Wärmeverteilungsverluste abhängig sind von der Anschlussdichte und bei Anschlussdichten von weniger als  $1.8 \text{ MWh}/(\text{a m})$  auch deutlich mehr als 10% betragen können und bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen sind.

**Tabelle 6.9** Empfohlene Anschlussdichte der Wärmeverteilung zur Einhaltung des Zielwertes der Wärmeverteilungsverluste von  $\leq 10 \%$  gemäss Bild 6.4 [39].

| Vorlauftemperatur | Betriebsweise          | Anschlussdichte           |
|-------------------|------------------------|---------------------------|
|                   |                        | $\text{MWh}/(\text{a m})$ |
| 70-90°C           | Jahresbetrieb inkl. WW | $> 1.8$                   |
| 70-90°C           | Heizperiode inkl. WW   | $> 1.3$                   |
| 70-90°C           | Heizperiode exkl. WW   | $> 0.8$                   |

Betragen die jährlichen Wärmeverteilungsverluste im Endausbau (nach Klimabereinigung) mehr als 10%, sollte in erster Priorität die Anschlussdichte erhöht werden. Dadurch werden nicht nur die Wärmeverteilungsverluste

reduziert, sondern auch die Wirtschaftlichkeit insgesamt verbessert.

Für eine erste wirtschaftliche Beurteilung der Wärmegestehungskosten ist das **Energieangebot** zu erfassen. Das Energieangebot ist bezüglich Potenzial, Verfügbarkeit, Qualität, Energieinhalt und Preis zu beurteilen. Bei infrage kommenden Energie- und Brennstofflieferanten sind Angebote über das jährlich verfügbare Potenzial, den Energieinhalt und den Energie- respektive Brennstoffpreis einzuholen. Nach der Berechnung des Jahresenergie- und brennstoffbedarfs können anhand von

Jahresnutzungsgraden der Wärmeerzeugungsanlagen und Wärmeverteilungsverluste die Energie- und Brennstoffkosten abgeschätzt werden.

Auf Basis von mittleren Wärmegestehungskosten für Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Energie und Brennstoff können in der Vorstudie die einzelnen Varianten verglichen und beurteilt werden (siehe Kapitel 7.4.2).

In der Regel beträgt die Kostengenauigkeit in der Phase 1 (Vorstudie)  $\pm 25\%$ .

Tabelle 6.10 Checkliste Phase 1 – Vorstudie.

| Check                                                         | Checkliste Phase 1 – Vorstudie                                                                                                                       | Bemerkungen   |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Potenzielles Versorgungsgebiet</b>                         |                                                                                                                                                      | Kapitel 6.4.1 |
|                                                               | Potenzielle Schlüsselkunden > 50 kW bestimmen (z.B. Industrie mit Prozesswärme, öffentliche Gebäude und Überbauungen in verdichteter Bauweise, etc.) |               |
|                                                               | Einsatz von Kataster-Datenbanken wie z.B. webGIS, Energie-Richtplan der Kantone, Feuerungskontrolldaten etc.                                         |               |
|                                                               | Wärmeversorgungszone mit genügend hoher Wärmebezugsdichte erfassen ( $\geq 70 \text{ kWh/m}^2$ )                                                     |               |
|                                                               | Lokales und regionales Energieangebot erfassen                                                                                                       |               |
|                                                               | Kantonales und Kommunales Energiekonzept berücksichtigen (z.B. kantonale Energierichtpläne, Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich MuKE)   |               |
|                                                               | Standortevaluation Energiezentrale                                                                                                                   |               |
| <b>Umfrage Schlüsselkunden</b> (liegen folgende Angaben vor?) |                                                                                                                                                      | Kapitel 6.4.2 |
|                                                               | Anschlussinteresse: Ja / Nein                                                                                                                        |               |
|                                                               | möglicher Anschlusszeitpunkt                                                                                                                         |               |
|                                                               | Jährlicher Wärmebedarf in kWh/a aufgeteilt in Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme                                                                 |               |
|                                                               | Anschlussleistung in kW                                                                                                                              |               |
|                                                               | Energiebezugsfläche EBF in $\text{m}^2$                                                                                                              |               |
|                                                               | Erforderliches Temperaturniveau in $^{\circ}\text{C}$                                                                                                |               |
| <b>Aktualisieren Versorgungsgebiet</b>                        |                                                                                                                                                      | Kapitel 6.4.3 |
|                                                               | Festlegen der Schlüsselkunden und des Versorgungsgebietes                                                                                            |               |
|                                                               | Potenzial von weiteren Kleinkunden (< 50 kW Anschlussleistung) abschätzen                                                                            |               |
|                                                               | Lastkennlinie und Jahresdauerlinie bestimmen (z.B. Excel-Tabelle Situationserfassung von QM Holzheizwerke)                                           | Kapitel 2.2   |
|                                                               | Standort der Energiezentrale evaluieren (evtl. mehrere Varianten)                                                                                    |               |
|                                                               | Trassenführung der Haupt- und Zweigleitungen evaluieren (evtl. mehrere Varianten). Mögliche Synergien mit anderen Bauvorhaben prüfen.                | Kapitel 4.5   |
|                                                               | Grob-Dimensionierung der Leitungen gemäss Empfehlungen                                                                                               | Kapitel 4.11  |
| <b>Erste wirtschaftliche Betrachtung</b>                      |                                                                                                                                                      | Kapitel 6.4.4 |
|                                                               | Anschlussdichte bestimmen                                                                                                                            | Kapitel 6.4.4 |
|                                                               | Verteilungsverluste abschätzen                                                                                                                       | Kapitel 4.7   |
|                                                               | Investitions- und Betriebskosten abschätzen ( $\pm 25\%$ )                                                                                           | Kapitel 7.4   |
|                                                               | Wärmegestehungskosten auf Basis des Energieangebotes abschätzen                                                                                      | Kapitel 7.4   |
|                                                               | Mögliche Investitionshilfen / Subventionen prüfen                                                                                                    |               |
|                                                               | Notwendige Tarife bestimmen                                                                                                                          | Kapitel 7.6.4 |
| <b>Entscheidung</b>                                           |                                                                                                                                                      |               |
|                                                               | Entscheid über die Weiterentwicklung des Projektes (iterativer Prozess)                                                                              |               |
|                                                               | Übergang in die Entwurfsplanung                                                                                                                      | Kapitel 6.5   |

## 6.5 Phase 2: Entwurfsplanung

In der Entwurfsplanung werden die in der Vorstudie gemachten Abschätzungen konkretisiert. Das Ziel ist eine oder mehrere wirtschaftlich vertretbare Varianten zur Auswahl zu haben.

Für die Situationserfassung in der Entwurfsplanung wird für die Berechnung und Optimierung des thermischen Netzes eine Datenbasis der potenziellen Kunden erarbeitet, erweitert oder aktualisiert. In den weiteren Projektierungsschritten wird diese weiter aktualisiert und die Genauigkeit erhöht.

Darauf aufbauend wird das Wärmeversorgungsgebiet konkretisiert (Standorte für Energiezentralen und Trassenführungen). Aufgrund der Randbedingungen wird ein geeignetes Rohrsystem evaluiert und dimensioniert.

Damit erfolgt eine zweite wirtschaftliche Betrachtung. Für die weitere Planungssicherheit sollte bei Baubeginn ein möglichst hoher Deckungsgrad des Jahresenergieabsatzes durch schriftliche Zusicherung (unterzeichnete Wärmelieferverträge oder Absichtserklärungen) gesichert sein.

### 6.5.1 Konkretisieren der Schlüsselkunden

Für die Umfrage bei Schlüsselkunden und weiteren potenziellen Kunden kann ein Fragebogen genutzt werden. Eine relativ ungezwungene und hürdenfreie Möglichkeit bieten heutzutage digitale Lösungen wie Webseiten oder per Email. Eine Vorlage steht auf der Webseite von QM Thermische Netze als Download zur Verfügung [199]. Der Fragebogen beinhaltet unter anderem die folgenden Punkte:

- Anschlussinteresse: Sofort, innerhalb der nächsten 5 Jahre, später, kein Anschluss.
- Angaben zum Leistungsbedarf und zum Jahresenergiebedarf für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme
- Angaben zum aktuellen Erzeugung (Brennstoff, Baujahr, Wirkungsgrad, Verbrauch)
- Angaben zum Warmwasseraufbereitungssystem (dezentral elektrisch, zentral über Heizkessel, Winter- und Sommerbetrieb)
- Angaben zur Hausanlage (Anzahl Heizkreise, Radiator, Bodenheizung, Temperaturen)
- Erforderliches Temperaturniveau (effektiven Bedarf prüfen, nicht aktuelle Einstellungen übernehmen)
- Angaben zu Sanierungsabsichten
- Energiebezugsfläche.

Für die Planung wird am besten eine Tabellenkalkulation erstellt und für jeden Kunden im möglichen Versorgungsgebiet ein Datensatz erfasst und die Daten auf Plausibilität geprüft. Die Tabelle ist ein zentrales Pla-

nungsinstrument, das im weiteren Planungsablauf laufend aktualisiert und ergänzt wird.

Der Energieversorger ist verantwortlich für die Zuteilung eines Kundenstatus und eines Anschlusstermins. Mit Fortschreiten des Projekts sollte ein möglichst hoher Deckungsgrad des Jahresenergieabsatzes durch Absichtserklärungen oder unterzeichnete Wärmelieferverträge gesichert sein. Als Empfehlung sollte bis Investitionsentscheid etwa 70% des Jahresenergieabsatzes vertraglich gesichert sein, wobei dies eher im ländlichen Kontext realistisch ist, wo langfristig betrachtet der Versorgungssperimeter und das Absatzpotenzial einfacher abzuschätzen ist. Bei sehr grossen Netzen, insbesondere im städtischen Kontext, ist es umso schwieriger zum Zeitpunkt des Investitionsentscheid eine so hohe Anschlussquote zu haben. Umso wichtiger ist es, dass in diesem Fall eine klare, koordinierte, langfristige und verbindliche Energiestrategie zur Verfügung steht.

### 6.5.2 Umfrage Kleinkunden

Bei potenziellen Kleinkunden ist es wichtig darauf zu achten, dass deren Anschluss die Anschlussdichte nicht negativ beeinflusst. Der Jahresenergiebedarf des Kleinkunden (MWh/a) geteilt durch die für einen Anschluss erforderliche Trassenlänge sollte demnach nicht kleiner sein als die projektierte Anschlussdichte des gesamten Netzes.

### 6.5.3 Festlegen Versorgungsgebiet

Auf Basis der Umfrage bei den Schlüsselkunden und Kleinkunden kann das Versorgungsgebiet festgelegt werden.

Für das Versorgungsgebiet gilt es nun einen passenden Standort für die Energiezentrale zu finden und zu sichern. Anschliessend kann die Trassenführung definieren werden. Ökonomisch günstig ist in der Regel ein Standort an zentraler Lage im Versorgungsgebiet, um möglichst kleine Leitungsquerschnitte zu ermöglichen.

Bei der Trassenführung ist auf wenig Richtungswechsel und Abzweiger zu achten. Weitere Hinweise sind in Kapitel 4.5 ausgeführt. Die Dimensionierung der einzelnen Leistungsabschnitte erfolgt auf Basis der Empfehlungen im Kapitel 4.11. Aufgrund der Trassenführung müssen folgende Aspekte ebenfalls berücksichtigt und geklärt werden:

- Durchleitungsrechte
- Hindernisse, Querungen (Gleise, Fluss, etc.)
- Verkehrsführung
- Koordination mit Werkleitungen
- Mögliche (spätere) Erweiterungen oder Anschlüsse

### **6.5.4 Zweite wirtschaftliche Betrachtung**

Während die wirtschaftliche Beurteilung der Varianten in der Entwurfsplanung noch auf mittleren Wärmegestellungskosten beruht, genügt diese Methode jedoch nicht für eine langfristige wirtschaftliche Betrachtung. Daher muss spätestens in der jetzigen Phase damit begonnen werden eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung aufzubauen. Diese stellt die jährliche Entwicklung des Betriebes für eine Betrachtungsdauer von zum Beispiel 20 bis 30 Jahre dar und zeigt zum Beispiel vor allem die grosse Herausforderung der Liquidität in den Anfangsjahren auf.

Die Ausarbeitung erfolgt in der Regel durch den Energieversorger und wird eventuell vom Planer unterstützt. Wichtig ist, dass die Aufgabenteilung frühzeitig erfolgt und klar definiert ist. Mindestens die projektspezifischen Daten wie die Kundenstruktur und die Anschlussdichte des Netzes, welche einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben, müssen vom Planer erarbeitet und für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Verfügung gestellt werden. Die Kontrolle der Wirtschaftlichkeit sollten nicht nur in der Planungsphase durchgeführt, sondern während der gesamten Betriebszeit des thermischen Netzes nachgeführt und nach möglichen Kostenoptimierungen geprüft werden.

Die Kostengenauigkeit in der Phase 2 (Entwurfsplanung) beträgt in der Regel  $\pm 15\%$ .

### **6.5.5 Akquisition**

Die Akquisition von Kunden ist in der Regel Aufgabe des Energieversorgers, sie kann aber auch auf den Planer übertragen werden. Zu beachten ist dabei, dass der Energieversorger nach Übernahme der Anlage meist allein verantwortlich ist für Marketing, Kundenbetreuung, Beratung und Akquisition von Neukunden. Aus diesem Grund wird insbesondere neuen Betreibern von thermischen Netzen empfohlen, diese Aufgaben frühzeitig vorzubereiten. Dabei ist zu beachten, dass Marketing, Kundenbetreuung, Beratung und Akquisition von Neukunden personal- und zeitaufwändig ist.

Tabelle 6.11 Checkliste Phase 2 – Entwurfsplanung.

| Check                                                     | Checkliste Phase 2 – Entwurfsplanung                                                                                                                                                                                  | Bemerkungen                 |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Konkretisieren Schlüsselkunden</b>                     |                                                                                                                                                                                                                       | Kapitel 6.5.1               |
|                                                           | Anschlussbedingungen der Schlüsselkunden konkretisieren (mit Fragebogen bestätigen lassen)                                                                                                                            |                             |
|                                                           | Daten auf Plausibilität prüfen                                                                                                                                                                                        |                             |
|                                                           | Standort, Typ und Umfang der Übergabestation abklären (speziell beim Umbau bestehender Energiezentralen)                                                                                                              |                             |
|                                                           | Zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs (Sanierungsabsichten, Termine, etc.). Diese Information sollte aus dem Fragebogen hervorgehen.                                                                              |                             |
| <b>Umfrage Kleinkunden</b> (liegen folgende Angaben vor?) |                                                                                                                                                                                                                       | Kapitel 6.5.2               |
|                                                           | Anschlussinteresse: Ja / Nein                                                                                                                                                                                         |                             |
|                                                           | möglicher Anschlusszeitpunkt                                                                                                                                                                                          |                             |
|                                                           | Jährlicher Wärmebedarf in kWh/a aufgeteilt in Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme                                                                                                                                  |                             |
|                                                           | Anschlussleistung in kW                                                                                                                                                                                               |                             |
|                                                           | Energiebezugsfläche EBF in m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                             |                             |
|                                                           | Erforderliches Temperaturniveau in °C                                                                                                                                                                                 |                             |
|                                                           | Eventuell Fragebogen versenden                                                                                                                                                                                        |                             |
|                                                           | Zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs (Sanierungsabsichten, Termine, etc.). Diese Information sollte aus dem Fragebogen hervorgehen.                                                                              |                             |
| <b>Festlegen Wärmeversorgungsgebiet</b>                   |                                                                                                                                                                                                                       | Kapitel 6.5.3               |
|                                                           | Aktualisieren der Kunden                                                                                                                                                                                              |                             |
|                                                           | Festlegen des Versorgungsgebietes                                                                                                                                                                                     |                             |
|                                                           | Lastkennlinie und Jahresdauerlinie aktualisieren                                                                                                                                                                      |                             |
|                                                           | Standort der Energiezentrale festlegen                                                                                                                                                                                |                             |
|                                                           | Trassenführung der Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen festlegen (Durchleitungsrechte einholen, Hindernisse erfassen wie Strassenquerungen, Bahngleise, Grundwasser, Flüsse und Koordination mit Werkleitungen) | Kapitel 4.3 bis Kapitel 4.5 |
|                                                           | Rohrsystem für Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen evaluieren (evtl. mehrere Varianten)                                                                                                                         | Kapitel 4.2.1               |
|                                                           | Dimensionierung der Leitungen gemäss Empfehlungen                                                                                                                                                                     | Kapitel 4.11                |
| <b>Zweite Wirtschaftliche Betrachtung</b>                 |                                                                                                                                                                                                                       | Kapitel 6.5.4               |
|                                                           | Businessplan mit Planbilanz und Erfolgsrechnung erstellen/aktualisieren                                                                                                                                               | Kapitel 7.5                 |
|                                                           | Anschlussdichte bestimmen                                                                                                                                                                                             | Kapitel 6.4.4               |
|                                                           | Wärmeverteilverluste abschätzen                                                                                                                                                                                       | Kapitel 4.7                 |
|                                                           | Lokales und regionales Energieangebot aktualisieren                                                                                                                                                                   |                             |
|                                                           | Investitions- und Betriebskosten abschätzen ( $\pm 15\%$ )                                                                                                                                                            | Kapitel 7.4                 |
|                                                           | Wärmegestehungskosten auf Basis des Energieangebotes aktualisieren                                                                                                                                                    | Kapitel 7.4                 |
|                                                           | Notwendige Tarife evtl. anpassen                                                                                                                                                                                      | Kapitel 7.6.4               |
|                                                           | Wärmeliefervertrag und Technische Anschlussvorschriften verfassen                                                                                                                                                     | Kapitel 7.6                 |
| <b>Entscheidung</b>                                       |                                                                                                                                                                                                                       |                             |
|                                                           | Entscheid über die Umsetzung des Projektes (iterativer Prozess)                                                                                                                                                       |                             |
|                                                           | Übergang in die Ausschreibungs- und Vergabephase                                                                                                                                                                      |                             |

## 6.6 Phase 3: Planung, Ausschreibung und Vergabe

Das Ziel von Phase 3 ist das Projekt soweit zu planen und vorzubereiten, dass eine reibungslose Ausführung möglich ist. Die Aufgaben in Phase 3 umfassen folgende Punkte:

- Auslegung Verteilnetz (Rohrsystem, Dimensionierung etc.)
- Übergabestationen spezifizieren
- Pläne erstellen
- Ausschreibung vorbereiten und Angebote einholen
- Vergabe in Absprache mit dem Bauherrn
- Mithilfe bei der wirtschaftlichen Beurteilung

Die Voraussetzung für die erfolgreiche Auftragserfüllung ist eine klare Informations- und Kommunikationsstrategie und soll durch klare Regeln definiert werden. In der Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure nach SIA 103 [210] werden die Rechte und Pflichten der Parteien beim Abschluss und bei der Abwicklung von Verträgen über Ingenieurleistungen klar geregelt.

### 6.6.1 Auslegung thermisches Netz

Planung, Auslegung, Spezifizierung und Berechnung des thermischen Netz:

- Ausführungsstandard des thermischen Netz festlegen
  - Wahl des Rohrsystems und Dämmstandard
  - Verlege-Situationen klären und Verlege-Verfahren festlegen
  - Notwendige Armaturen festlegen
  - Datenübertragung und Leckageüberwachung einplanen
- Pläne erstellen
  - Situationspläne 1:200/1:500
  - Längenprofile
  - Detailpläne Freileitungen
  - Grabenprofile
- Dimensionierung Leitungsabschnitte
- Auslegung Netzpumpen, Armaturen und sonstige Sicherheitseinrichtungen
- Rohrstatik erstellen inkl. Ev. Vorspannetappen
- Verkehrsführung beachten und berücksichtigen
- Durchleitungsrechte klären und wenn nötig einholen

### 6.6.2 Spezifikation Übergabestation

Das Konzept beziehungsweise der Standard für die Übergabestationen muss zwingend definiert werden und das zeitliche Vorgehen muss mit dem Gesamtprojekt abgestimmt werden. Alle technisch relevanten Punkte sollten in den TAV aufgeführt werden (Anschlussart, Grädigkeit des Wärmeübertragers, Druck- und Temperaturbeständigkeit, Sicherheitseinrichtungen, Materialien, Wärmedämmung, Datenübertragung etc.). In Ausnahmefällen kann je nach Situation von den Anforderungen abgewichen werden, jedoch nur wenn dies keinen negativen Einfluss hat, zum Beispiel auf die Rücklauftemperatur. Weitere Informationen sind im Kapitel 5.4 zu finden.

### 6.6.3 Baubewilligungsverfahren

Ziel des Baubewilligungsverfahrens ist das Erlangen der Baubewilligung. Es gilt das Dossier für die Eingabe zusammenzustellen. Dafür benötigt werden unter anderem Pläne, Formulare, Berechnungen etc.. Das Baubewilligungsverfahren ist vorgängig mit den örtlichen Gemeinde- und Kantonsbehörden zu klären. Es ist zudem genügend Zeit einzuplanen, je nach Kanton kann das Verfahren bis zu 6 Monate beanspruchen.

### 6.6.4 Ausschreibung vorbereiten

Primär werden die Leistungen für die Rohr- bzw. Tiefbauarbeiten ausgeschrieben. Es ist möglich, dass die Installation der Leckageüberwachung sowie die Durchführung der Durchstrahlprüfungen (Röntgen-) der Schweissnähte separat ausgeschrieben werden. Für die Ausschreibungen werden Leistungsverzeichnisse erstellt, in denen Allgemeine und besondere Bestimmungen verlangt werden. Die Ausschreibungen enthalten die unten aufgelisteten Bestandteile und mehr oder weniger detaillierte Planunterlagen:

- Ausschreibungspläne für den Tief- und Leitungsbau erstellen
  - Gefälle
  - Materialien
  - Überdeckung
  - Sonderbauwerke (z.B. Schächte)
  - Spriessung
  - Entleerung und Entlüftung
  - Sektionierung (Absperarmaturen)
  - Kompensationsmassnahmen
  - Aufmasse zum Tief- und Rohrbau
- Anleitung zum Schweißen der Leitungen, falls vorhanden Verfahrensprüfung
- Generelle Personalqualifikation und Nachweis für Fachpersonal und beauftragte Firmen
- Zeugnisse der Stahl- und Kunststoffschweisser sowie Arbeitsproben, dasselbe für Muffenmonteure inkl. Nachdämmen

- Exakte Schnittstellendefinition zwischen den verschiedenen Aufträgen, zum Beispiel Einbringung der Leitungen in die Gräben
- Terminprogramm.

In der Regel sind die Übergabestationen nicht Bestandteil der Ausschreibung des thermischen Netzes. Je nach Auftragsumfang kann dafür eine separate Ausschreibung notwendig sein. In diesem Fall ist ebenfalls ein eindeutiges Pflichtenheft zu erstellen.

Anhand des Normpositionen-Katalogs (NPK) [146] kann die Ausschreibung standardisiert und vereinfacht erstellt werden. Der NPK ist, dem Bauablauf entsprechend, in rund 200 Kapitel unterteilt, die alle nach der gleichen Systematik aufgebaut sind und zur Erstellung klarer und detailgenauer Leistungsbeschreibungen beim Bauen dient. Zudem ist er ein Nachschlagewerk und eine Checkliste für die Devisierung. Speziell für Leitungen und Armaturen im Fernwärmebereich ist seit Anfang 2017 im NPK das Kapitel 414 erhältlich.

Da eine Optimierung im Betrieb von der Mess- und Steuerbarkeit möglichst vieler Netzparameter abhängig ist, ist bereits bei der Ausschreibung darauf zu achten, dass ein Konzept zur Betriebsoptimierung erstellt wird, in welchem die Verantwortlichkeiten und technische Randbedingungen festgehalten werden (siehe Kapitel 6.8.1).

### 6.6.5 Submission

Bei öffentlichen Auftraggebern muss die Verfahrensart vorgängig geklärt werden, bei Privaten werden in der Regel mit der Bauherrschaft die Unternehmerlisten bereinigt. Die Submissionsphase endet mit der Offertkontrolle, Offertvergleich und einer Vergabeempfehlung an die Bauherrschaft. Eventuell wird (bei nicht öffentlichen Ausschreibungen) noch eine Angebotsrunde respektive Angebotsverhandlungen durchgeführt.

### 6.6.6 Dritte Wirtschaftliche Betrachtung

Die Planbilanz und Planerfolgsrechnung wird auf den aktuellen Stand gebracht. Die Investitions- und Betriebskosten sowie die Wärmegestehungskosten können bestimmt werden. Auf dieser Basis sollten die zum Teil schon gültigen Tarife kontrolliert werden.

Die Kostengenauigkeit in der Phase 3 beträgt  $\pm 10\%$ .

### 6.6.7 Vergabe

Aufgrund der eingereichten Offerten können die einzelnen Arbeitspakete verteilt und mittels Werkvertrag vergeben werden. Mit dem Abschluss von Phase 3 beginnt die Ausführungsphase, die mit der Abnahme der Anlage endet.

Tabelle 6.12 Checkliste Phase 3 – Planung, Ausschreibung und Vergabe.

| Check                                     | Checkliste Phase 3 – Planung, Ausschreibung und Vergabe                                                                                                                                              | Bemerkungen                             |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Auslegung thermisches Netz</b>         |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.6.1                           |
|                                           | Ausführungsstandard des thermischen Netz festlegen (Rohrsystem, Dämmstärke, Verlege-Methoden und –Verfahren, Armaturen, Datenübertragung, Leckageüberwachung, etc.)                                  | Kapitel 4.2 bis Kapitel 4.5             |
|                                           | Dimensionierung der Leitungen gemäss Empfehlungen                                                                                                                                                    | Kapitel 4.11                            |
|                                           | Auslegung der Netzpumpen, Armaturen und Sicherheitseinrichtungen                                                                                                                                     | Kapitel 3.4, 4.2.3, 5.4.7.8 und 5.4.7.9 |
|                                           | Rohrstatik erstellen (Berechnung der Auflager, erforderliche Überdeckung, Kompensation, Festpunkte, Dehnung, Vorspannetappen Nachweis der statischen Belastbarkeit, etc.)                            | Kapitel 4.10                            |
| <b>Spezifikation Übergabestation</b>      |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 5.4                             |
|                                           | Grädigkeit des Wärmeübertragers festlegen                                                                                                                                                            | Kapitel 5.4.7.3                         |
|                                           | Hydraulische Einbindung primärseitig zwischen Lieferant und Kunde sowie sekundärseitig für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme                                                                    | Kapitel 0, 5.5 und 5.7                  |
|                                           | Steuer- und Regelungstechnische Anforderungen festlegen                                                                                                                                              | Kapitel 5.4.7.5                         |
|                                           | Energiezählerzähler (Datenübertragung und –überwachung)                                                                                                                                              | Kapitel 5.4.7.7                         |
| <b>Baubewilligung</b>                     |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.6.3                           |
|                                           | Erstellen der Unterlagen für die Baueingabe                                                                                                                                                          |                                         |
|                                           | Baueingabe mit örtlichen Gemeinde- und Kantonsbehörden klären                                                                                                                                        |                                         |
|                                           | einholen der Baubewilligung                                                                                                                                                                          |                                         |
|                                           | Prüfen und berücksichtigen allfälliger Auflagen                                                                                                                                                      |                                         |
| <b>Ausschreibung vorbereiten</b>          |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.6.4                           |
|                                           | Ausschreibungspläne für den Tief- und Leitungsbau erstellen (Gefälle, Materialien, Überdeckungshöhen, Sonderbauwerke, Spriessung, Entleerung, Entlüftung, Sektionierung und Kompensationsmassnahmen) |                                         |
|                                           | Definition von Anforderungen, Mengen, Qualität sowie Plan- und Zielwerte                                                                                                                             |                                         |
|                                           | Generelle Personal- und Firmenqualifikation definieren                                                                                                                                               |                                         |
|                                           | Terminplan definieren                                                                                                                                                                                |                                         |
|                                           | Evtl. separate Ausschreibung für Übergabestation                                                                                                                                                     |                                         |
| <b>Submission</b>                         |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.6.5                           |
|                                           | Klären der Verfahrensart (Öffentlich, Einladungsverfahren, etc.)                                                                                                                                     |                                         |
|                                           | Tief- und Leitungsbau                                                                                                                                                                                |                                         |
|                                           | Übergabestation und hydraulische Einbindung                                                                                                                                                          |                                         |
|                                           | Mess-, Steuer- und Regelungstechnik MSR, Leitsystem, etc.                                                                                                                                            |                                         |
|                                           | Energiezentrale (Wärmeerzeugung, Verteilung, Brennstofflager- und Disposition, etc.)                                                                                                                 |                                         |
| <b>Dritte Wirtschaftliche Betrachtung</b> |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.6.6                           |
|                                           | Businessplan mit Planbilanz und Erfolgsrechnung aktualisieren                                                                                                                                        | Kapitel 7.5                             |
|                                           | Investitions- und Betriebskosten bestimmen ( $\pm 10\%$ )                                                                                                                                            | Kapitel 7.4                             |
|                                           | Wärmegestehungskosten bestimmen                                                                                                                                                                      | Kapitel 7.4                             |
|                                           | Tarife kontrollieren                                                                                                                                                                                 | Kapitel 7.6.4                           |
| <b>Vergabe</b>                            |                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.6.7                           |
|                                           | Offertenvergleich und Vergabe                                                                                                                                                                        |                                         |

## 6.7 Phase 4: Ausführung und Abnahme

In der Phase 4 wird das thermische Netz realisiert. Auf Basis von detaillierten Ausführungsplänen werden Gräben ausgehoben, Leitungen gelegt, geschweisst und geprüft. In der Folge werden Teilsysteme und am Ende das Gesamtsystem auf deren Funktionstüchtigkeit geprüft. Mängel und Funktionsstörungen werden detailliert notiert und behoben, bevor die Anlage in Betrieb genommen wird. Auch in dieser Phase ist für eine erfolgreiche Auftragserfüllung eine klare Informations- und Kommunikationsstrategie die Voraussetzung und soll durch klare Regeln definiert werden. Wie in Phase 3 schon erwähnt, werden in der Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure nach SIA 103 [210] die Rechte und Pflichten der Parteien beim Abschluss und bei der Abwicklung von Verträgen über Ingenieurleistungen klar geregelt.

Als Abschluss kommt es zur Abnahme bzw. Übergabe der Anlage an den Bauherren.

### 6.7.1 Ausführungspläne

Auf Basis der Ausschreibungspläne werden detaillierte Ausführungspläne (üblicherweise Situationspläne im Massstab 1:200) erstellt oder je nach Stand und Detaillierungsgrad entsprechend angepasst.

### 6.7.2 Ausführung

Der wesentliche Auftrag während der Ausführung ist die Bauleitung und Bauüberwachung. Diese dient der termin- und fachgerechten Ausführung sowie der übergeordneten Baukoordination. Dazu gehören:

- Organisation der Baustelle
  - Startsituation bzw. Begehung mit Behörden und Unternehmer vor Ort organisieren und Protokollieren)
  - Anwohnerinformation
  - Termine absprechen und Koordinieren
- Periodische Baubesprechungen koordinieren und leiten (Projektstand, Schnittstellen einzelner Lieferanten, Terminplan, Kosten etc.)
- Informieren des Bauherrn über den Projektfortschritt
- Prüfen der Ausführungen, evtl. Abnahme einzelner Teilsysteme (Checklisten in AGFW-Arbeitsblatt FW 401 [121] Teil 17)
- Erdverlegte Rohrleitungen sollten durch ein Trassenwarnband über jeder Leitung gesichert werden. Nichtmetallische Leitungen (PMR) sollten mit einem detektierbaren Trassenwarnband verlegt werden.

### 6.7.3 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme ist folgender Ablauf zu empfehlen:

- Funktionskontrolle der Anlagenteile und Systeme
- Kalte Inbetriebsetzung der Anlage
- Mängel und Funktionsstörungen beheben
- Inbetriebnahme der Anlage
- Protokoll über den Verlauf und Ergebnis der Inbetriebnahme erstellen und von allen Beteiligten zu unterschreiben.
- Aufgetretene Mängel sind bis zur Übergabe zu beheben.

Mit der Inbetriebnahme geht die Verantwortung grundsätzlich an den Betreiber über. Häufig wird ein thermisches Netz jedoch in Betrieb genommen bevor die ganzen Baumassnahmen (zum Beispiel Wiederherstellung der Oberfläche) abgeschlossen sind, in diesem Fall liegt die Verantwortung der Baustelle bei der Bauleitung bis die Arbeiten vollständig abgeschlossen sind oder bis zur offiziellen Übergabe an den Betreiber.

### 6.7.4 Dokumentation

Die Voraussetzung für einen sicheren Betrieb und Unterhalt ist die verlässliche, vollständige und aktuelle Leitungsdokumentation. Diese trägt wesentlich dazu bei, dass die Leitungen und Anlagenteile schnell und zuverlässig auffindbar sind und bildet nach die Basis für die Planung von Erweiterungs- und Instandhaltungsvorhaben und hilft bei der Darstellung von detaillierten Anlagendokumentationen [126]. Die Grundlage für eine verlässliche Leitungsdokumentation ist die exakte Einmessung und Nachführung der Unterlagen. Der Aufwand für die Nachführung kann erheblich sein und ist entsprechend einzuplanen.

Der Dokumentationsumfang kann für den technischen Teil in zwei Hauptbereiche gegliedert werden:

- die Prüf- und Nachweisdokumentation
- die Betriebstechnische Dokumentation.

Die Unterlagen der **Prüf- und Nachweisdokumentation** bestehen aus aktuellen Unterlagen der Betriebsanlagen und geben über deren ordnungsgemässe Herstellung Auskunft. Sie umfassen folgende Punkte:

- Herstellungsdocumentation der Anlagen (Planungsunterlagen, Qualitätsprüfungen, Abnahmezeugnisse)
- Baustellendokumentation zum Nachweis der Qualitätskontrolle und der Gewährleistungsansprüche
- Erweiterungen (Neubau, Kundenanschlüsse)
- Anpassung der Dokumentation an Veränderungen an technischen Anlagen im Rahmen der Instandhaltung (Austausch von Baugruppen oder Anlagenteilen)
- Veränderungen der technischen Anlagen durch behördliche oder private Bedürfnisse (Trassenumlegungen, vertragliche Veränderungen).

Eine Übersicht zur Dokumentation der erforderlichen Massnahmen zur Qualitätssicherung umfasst folgende Punkte:

- Abnahmen und dazugehörige Protokolle der Lieferungen und Leistungen
- CE-Erklärungen inklusive Gefahrenanalyse
- Nivellement der Fernwärme-Rohrleitung
- Abrechnungs-Isometrien zum Rohrbau
- Lieferung und Nachweis des Rohrherstellers
- Übersicht zu den Materialbescheinigungen mit Objektzuordnung zu den Stahl-Rohrteilen, Mantelrohren, Muffen, PUR-Schaum, Armaturen, etc.
- Nachweise und Ergebnisse der werksinternen und externen Prüfungen
- Filme und Protokolle zur Durchstrahlung der werkseitigen Schweissnähte
- Protokolle für:
  - Verlegearbeiten und Qualitätskontrollen
  - Schweissarbeiten am Mediumrohr
  - Vorspannung oder Vorwärmung der Fernwärmeleitung
  - Nachdämmarbeiten und Dehnpolstereinbau
  - Schleifenmessung beim Leckageüberwachungssystem
  - Druckprüfung
- Berechnungsnachweise (Revisionszustand)
- Pläne, Zeichnungen und statischer Nachweis zu Schachtbauwerken
- Statischer Nachweis zu Press- und Schutzrohren, falls verlangt
- Trassenplangesamtübersicht
- Revidierte Trassen- und Detailpläne
- Revidierter Plan des Leckageüberwachungssystems in Verbindung mit der Begleitkabelführung (geografische Darstellung)
- Teilezeichnungen zu Armaturen, Einbauten, etc. für die Ersatzteilhaltung.

Zur **Betriebstechnischen Dokumentation** gehören alle Unterlagen, welche zur Sicherung und Unterstützung der ordnungsgemässen Betriebsführung sowie zur Einhaltung der Arbeitssicherheit beitragen:

- Vorschriften, Gesetze, Normen
- Betriebsvorschriften und Arbeitsanweisungen
- Betriebshandbücher
- Dokumentation von wiederkehrenden Prüfungen
- Organisatorische Pläne (Verantwortungsstrukturen, Bereitschaftspläne, Notfall- und Einsatzpläne, Weiterbildungspläne)

- Wartungs- und Instandhaltungsplanung
- Lebenslaufunterlagen für Anlagen (Schadensauswertungen, Störungs- und Reparaturberichte etc.)
- Gerätelisten mit Überwachungs- und Prüfnachweisen (elektrische Geräte, Wärmezähler, Manometer, Temperaturfühler, etc.)
- Kundendateien
- Anlagen und Betriebsmittelkennzeichnungssysteme.

Alle im Betrieb notwendigen Unterlagen sind zugänglich zu halten und in speziellen Schulungen zu vermitteln.

Neben der Dokumentation in schriftlicher Form (Planunterlagen, etc.) ist auch der Kennzeichnung der Anlagenteile vor Ort Rechnung zu tragen. Die am Objekt angebrachte Anlagenkennzeichnung sollte demnach der Bezeichnung im Planwerk entsprechen. Weiter sind auch Leitungsanlagen im öffentlichen Raum erkennbar zu gestalten. Folgendes ist zu beachten:

- Oberirdische Bauwerke und Bedienpunkte in Freileitungen sollten mit der Anlagenkennzeichnung sowie Klartext ausgestattet sein.
- Bei unterirdischen Bauwerken sollten Schachtdächer eingesetzt werden, welche auf eine entsprechende Anlage hinweisen.
- Erdeinbauarmaturen in erdverlegten Trassen müssen in Analogie zu Gas oder Wasser mit einer Lagekennzeichnung durch Schilder gekennzeichnet sein.

### 6.7.5 Kostenkontrolle

Während der Ausführung sind allfällige Regiepositionen periodisch zu aktualisieren. Zur Ausführung und Abnahme gehört auch eine Bauabrechnung, in der alle Kosten für die Erstellung des thermischen Netzes zusammengetragen und in einem Bericht festgehalten werden.

### 6.7.6 Abnahme

Bei der Abnahme der Anlage wird das Gesamtsystem formell an den Bauherren übergeben. Für die Abnahme sollten mindestens der verantwortliche Planer, der oder die Anlagenlieferanten und der Bauherr anwesend sein. Die Abnahme erfolgt aufgrund:

- Abnahme anhand des Pflichtenhefts
- Dokumentation überprüfen und evtl. Nachführen
- Abnahme der Kostenkontrolle
- Abnahmeprotokoll erstellen und von allen zu visieren.
- Garantiebeginn definieren

Tabelle 6.13 Checkliste Phase 4 – Ausführung und Abnahme.

| Check | Checkliste Phase 4 – Ausführung und Abnahme                                                                                                                                                                                         | Bemerkungen   |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|       | <b>Ausführungspläne</b>                                                                                                                                                                                                             | Kapitel 6.7.1 |
|       | Ausführungspläne für den Tief- und Leitungsbau auf Basis der Ausschreibungspläne erstellen (Gefälle, Materialien, Überdeckungshöhen, Sonderbauwerke, Spriessung, Entleerung, Entlüftung, Sektionierung und Kompensationsmassnahmen) |               |
|       | <b>Ausführung</b>                                                                                                                                                                                                                   | Kapitel 6.7.2 |
|       | Abschluss einer Bauwesenversicherung                                                                                                                                                                                                | Kapitel 6.9.4 |
|       | Bauüberwachung während der Bauphase (Kontrolle der termin- und fachgerechten Ausführung)                                                                                                                                            |               |
|       | Baubesprechungen koordinieren und leiten (Projektstand, Schnittstellen einzelner Lieferanten, Terminplan, Kosten etc.)                                                                                                              |               |
|       | Informieren des Bauherren über den Projektstand                                                                                                                                                                                     |               |
|       | Prüfen der Ausführungen, evtl. Abnahme einzelner Teilsysteme                                                                                                                                                                        |               |
|       | <b>Inbetriebnahme</b>                                                                                                                                                                                                               | Kapitel 6.7.3 |
|       | Funktionskontrolle aller Anlagenteile und Systeme                                                                                                                                                                                   |               |
|       | Kaltinbetriebsetzung der Anlage                                                                                                                                                                                                     |               |
|       | Mängel und Funktionsstörungen beheben                                                                                                                                                                                               |               |
|       | Inbetriebnahme der Anlage                                                                                                                                                                                                           |               |
|       | <b>Dokumentation</b>                                                                                                                                                                                                                | Kapitel 6.7.4 |
|       | Prüf- und Nachweisdokumentation erstellen                                                                                                                                                                                           |               |
|       | Betriebstechnische Dokumentation erstellen                                                                                                                                                                                          |               |
|       | Betriebshandbuch erstellen                                                                                                                                                                                                          |               |
|       | <b>Kostenkontrolle</b>                                                                                                                                                                                                              | Kapitel 6.7.5 |
|       | Bauabrechnung erstellen, in der alle Kosten für die Erstellung des thermischen Netz zusammengetragen sind.                                                                                                                          |               |
|       | <b>Abnahme</b>                                                                                                                                                                                                                      | Kapitel 6.7.6 |
|       | Abnahme des Gesamtsystems anhand des Pflichtenheftes. An der Abnahme sollten der Planer, der oder die Anlagelieferanten und der Bauherr anwesend sein.                                                                              |               |
|       | Dokumentation überprüfen und nachführen                                                                                                                                                                                             |               |
|       | Betriebshandbuch aktualisieren                                                                                                                                                                                                      |               |
|       | Instruieren des Anlagenbetreibers                                                                                                                                                                                                   |               |
|       | Abnahmeprotokoll erstellen und von allen Beteiligten unterschreiben lassen                                                                                                                                                          |               |

## 6.8 Phase 5: Erste Betriebsoptimierung

Die herkömmlichen Methoden der Inbetriebsetzung und Abnahme, vor allem für komplexe Anlagen, ist häufig unzureichend und ist keine Gewährleistung für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage. Auch wenn Anlagen richtig projektiert und entsprechend realisiert wurden, werden sie oft nicht so betrieben, wie dies im Konzept vorgesehen ist. Unabdingbar für eine richtige Funktionsweise ist eine erste Betriebsoptimierung, mit der nach der Übergabe der Anlage an den Bauherren die Anlagefunktionen systematisch überprüft und mit den Vorgaben der Funktionsbeschreibung verglichen werden. Aufgrund dieser Überprüfung können Mängel an Anlagekomponenten behoben und die Einstellungen von Steuer- und Regelparametern verbessert werden.

Bei subventionierten Projekten kann diese erste Betriebsoptimierung ein wesentlicher Bestandteil der Subventionsbedingungen und somit auch obligatorisch sein (z. B. Meilenstein MS 5 bei QM Holzheizwerke).

Die erste Betriebsoptimierung wird je nach Anlagegröße in den ersten zwei Betriebsjahren nach der Abnahme der Anlage durchgeführt. Je nach Ausbaugrad und geplantem Endausbau kann oder sollte die Betriebsoptimierung wiederholt oder nachgeholt werden. Bei thermischen Netzen sollte zumindest ein volles Betriebsjahr für die Betriebsoptimierung herangezogen werden können. Im Kapitel 8 werden diverse weitere Fassetten der Optimierung betrachtet, welche über den eigentlichen Betrieb hinausgehen und vielfach strategisch und langfristig einzuordnen sind.

Für eine gezielte Datenerfassung ist es notwendig, dass schon früh in der Planung ein Konzept für die Betriebsoptimierung erstellt wird. Das Konzept regelt wann, von wem und wie welche Betriebsdaten erfasst und ausgewertet werden. Zudem sollten schon in der Projektierungsphase die entsprechenden Plan- respektive Zielwerte definiert werden. Das Konzept der Betriebsoptimierung, insbesondere deren Auftragserteilung zur Durchführung muss vom Bauherren und vom verantwortlichen Planer gemeinsam geplant und vereinbart werden. Die Datenerfassung hat ab Inbetriebnahme der Anlage zu erfolgen und ist solange durchzuführen wie vertraglich vereinbart wurde. Die Datenerfassung für die Betriebsoptimierung sollte jedoch mindestens über ein Jahr erfolgen.

Damit eine erfolgreiche Betriebsoptimierung gemeinsam mit den Anlagelieferanten erfolgen kann, sind entsprechende finanzielle Sicherstellungen für die Gewährleistungsdauer in den Werkverträgen vorzusehen (Hafrücklässe), da ansonsten nicht alle Anlagelieferanten aus freien Zügen an der Betriebsoptimierung teilnehmen würden.

### 6.8.1 Datenerfassung

Wie oben erwähnt, wird bei der Betriebsoptimierung untersucht, ob die Anlage so funktioniert, wie es bei der

Projektierung vorgesehen war. Diese Aufgabe ist nur möglich, wenn vorher festgelegt wurde, wie die Anlage funktionieren soll. Die notwendigen Voraussetzungen für eine Betriebsoptimierung sind ein Konzept zur Betriebsoptimierung sowie müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Funktionsbeschreibung mit Prinzipschema, in der detailliert beschrieben ist, wie die Anlage in den verschiedenen Betriebszuständen funktionieren soll.
- Liste der vereinbarten und garantierten Kennzahlen, mit denen der Nachweis für einen optimalen Betrieb erbracht werden soll.
- Messstellenliste, in welcher pro Messstelle der Messort, der Messbereich, die Auflösung und die Messgenauigkeit angegeben sind.
- Beschreibung, wie die automatische Datenaufzeichnung durchgeführt wird. Hier müssen auch die Verantwortlichkeiten festgehalten werden:
  - die Spezifikationen und die Planung der Datenaufzeichnung
  - das Auslesen der Daten
  - die Datenauswertung.
- Die Anlage muss mit der entsprechenden Leitetchnik ausgerüstet werden und in der Lage sein die gewünschten Daten aufzuzeichnen und zu archivieren.  
Optional können viele Kennzahlen durch die Leitetchnik selbst überwacht werden. Zum Beispiel kann ein System die Einhaltung der Soll-Vorlauf-temperatur (mit entsprechenden Parametern) selber überwachen und entsprechend visualisieren.

Eine Fernauslesung für den Planer und den Anlagelieferanten sind von grossem Vorteil für den raschen Zugang zu den Betriebsdaten. Mit einer kontinuierlichen Datenerfassung mit einem Leitsystem können auch zu einem späteren Zeitpunkt Daten ausgewertet und Optimierungen vorgenommen werden.

Durch eine Datenkommunikation im thermischen Netz und der Erfassung der Daten in einem zentralen Leitsystem stehen die Daten der jeweiligen Hausübergabestationen in ständiger Verbindung mit der Energiezentrale. Dadurch werden alle relevanten Daten der Übergabestationen (Momentanleistung, Durchfluss, Temperaturen, Solltemperaturen, Betriebsstatus, Pumpen- und Ventilstatus etc.) protokolliert, können grafisch dargestellt und ausgewertet werden.

Diese Datenkommunikation wird durch einen Datenbus hergestellt. Die Datenübertragungreichweite darf nicht durch die Anzahl der angeschlossenen Regelgeräte eingeschränkt sein. Der Hardwareaufbau der Schnittstellen muss für die Bedingungen in einem thermischen Netz ausgelegt sein (möglicher hoher Störeinfluss durch parallel verlegte Energiekabel, unterschiedliche Erdpotenziale der einzelnen Gebäude, Gefahr durch direkten und indirekten Blitzschlag). Zusätzlich müssen auch Vorkehrungen bezüglich Cybersicherheit getroffen werden.

Durch den ständigen Datenverbund werden die Abläufe im gesamten thermischen Netz transparent gemacht und es ist das Fernverstellen aller Anlageparameter jeder einzelnen Übergabestation möglich. Es kann daher von jedem beliebigen Ort aus (zum Beispiel auch per Notebook und Mobiltelefon) der Kunde bei der Einstellung seiner Anlage unterstützt werden.

Die Verlegung des Datenkabels erfolgt meist in Baumstruktur mit einer Einschleifung in jedes Haus. Es sind dadurch keine Schleifen, Ringe oder Abschlusswiderstände im Netz notwendig, wobei Kabelmuffen im Erdreich grundsätzlich zu vermeiden sind. Die zu verlegenden Datenkabel sollten mehrpolig (entsprechend den Anforderungen des Systemlieferanten) und abgeschirmt sein. Heute werden dazu, wenn möglich meist Glasfaserkabel eingesetzt. Bevor die einzelnen Unterstationsregler an das Datenkabel angeschlossen werden, muss unbedingt die gesamte Verkabelung auf Unterbrechungen oder Kurzschlüsse ausgemessen werden. Um für spätere Netzerweiterungen und für eine etwaige Fehlersuche eine genaue Dokumentation der erfolgten Kabelverlegung zur Verfügung zu haben, muss die Verlegung der Kabel genau dokumentiert werden.

## 6.8.2 Auswertung

Damit die erfassten Daten interpretiert und beurteilt werden können, ist eine grafische Darstellung der Daten für unterschiedliche Betriebszustände unerlässlich. Die minimal zu untersuchenden Betriebszustände sind der Schwachlastbetrieb (Übergangs- und Sommerzeit) und der Betrieb bei hoher Last (im Heizfall bei kalter Witter, im Kühlfall bei warmer Witterung). Die Daten der beiden Betriebszustände sollten folgende Anforderungen erfüllen:

- Darstellung von Wochenverläufen
- Darstellung von Tagesverläufen (24h-Verlauf) von ausgewählten Tagen

- Die wichtigsten Daten auf einem einzigen Diagramm gemeinsam darstellen
- Einheitliche Einteilung und Beschriftung der Achsen
- Nicht mehr als Sechs Parameter auf einem Diagramm

Die Auswertung der erfassten Betriebsdaten erfolgt aufgrund folgender Kriterien:

- Soll-Ist-Vergleich mit Referenzwerten (Temperatur- und Druckniveau nach TAV)
- Interpretieren der Abweichungen
- Ermittlung des Optimierungspotenzials
- Fehler- und Schaden-Dokumentation

## 6.8.3 Optimierung

Aus der Analyse der Datenerfassung ergeben sich Optimierungsmassnahmen. Aus dem ein Massnahmenplan zu erstellen ist, der durch den Bauherrn zu genehmigen und umzusetzen ist. Die Massnahmen können je nach Priorität auch gestaffelt umgesetzt werden.

Die gemachten Optimierungen müssen in jedem Fall kontrolliert und gegebenenfalls nachjustiert werden. Die häufigsten Anpassungen beziehungsweise Optimierungsmassnahmen sind:

- Hydraulischer Abgleich
- Einstellen von Sollwerten und Reglerparameter (Temperatur, Druck, etc.)
- Zeitprogramme anpassen

Wenn möglich sollte die Aufzeichnung und Auswertung der wichtigsten Schlüsselwerte der Kunden (zum Beispiel Energie- und Wassermenge) kontinuierlich oder periodisch durchgeführt werden. Somit kann gewährleistet werden, dass mögliche Störungen und Optimierungspotenziale schnell und einfach erfasst werden (siehe Kapitel 0).

Tabelle 6.14 Checkliste Phase 5 – Betriebsoptimierung.

| Check | Checkliste Phase 5 – Betriebsoptimierung                                                                     | Bemerkungen   |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|       | <b>Datenerfassung</b>                                                                                        | Kapitel 6.8.1 |
|       | Erstellen eines Konzeptes für die Datenerfassung (bei subventionierten Projekten in der Regel obligatorisch) |               |
|       | Daten der Anlage erfassen und aufzeichnen                                                                    |               |
|       | Einstellung der Referenzwerte protokollieren                                                                 |               |
|       | <b>Auswertung</b>                                                                                            | Kapitel 6.8.2 |
|       | Grafische Aufbereitung der Daten                                                                             |               |
|       | Soll-Ist-Vergleich mit Referenzwerten                                                                        |               |
|       | Interpretieren der Abweichungen                                                                              |               |
|       | Ermittlung des Optimierungspotenzials                                                                        |               |
|       | Fehler- und Schaden Dokumentation                                                                            |               |
|       | <b>Optimierung</b>                                                                                           | Kapitel 6.8.3 |
|       | Massnahmenplan zur Verbesserung (Umsetzung) erstellen                                                        |               |
|       | Massnahmen umsetzen                                                                                          |               |
|       | Nachkontrolle                                                                                                |               |

## 6.9 Phase 6: Betrieb und Bewirtschaftung

### 6.9.1 Betriebskonzept

Vor Ablauf der Garantiefrist, zusammen mit einer Schlusskontrolle, ist vom Hauptplaner neben der Aktualisierung der Dokumentation ein Betriebs-, Ausbildungs- und Wartungskonzept zu erstellen und dem Bauherrn abzugeben. Dieses Konzept muss folgende Elemente enthalten:

- revidierte Datenblätter für die manuelle Erfassung von Betriebsdaten
- Angaben, wie das Betriebspersonal für die Ausübung seiner Tätigkeit aus- und weitergebildet werden muss.
- revidierter Wartungsplan
- Alarmierung und Pikettorganisation
- Notfallplan
- Erfolgsüberwachung.

Mit der Erfolgsüberwachung wird sichergestellt, dass die Anlage auch nach Ablauf der Garantiefrist die Anforderungen für einen optimalen Betrieb erfüllt. Im Betriebskonzept muss daher festgelegt sein,

- welche Daten wie (manuell, automatisch) erfasst werden
- wie diese Daten ausgewertet werden (z.B. welche Kennzahlen, welche Excel-Auswertungen)
- wer für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse verantwortlich ist
- wer bei welchen Störungen bzw. Ereignissen zu kontaktieren ist
- in welchen Abständen, welche wiederkehrende Prüfungen durchzuführen sind
- welche Betriebsmittel in welchen Intervallen zu analysieren sind.

### 6.9.2 Instandhaltung

Instandhaltung bedeutet Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes, sowie zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes von technischen Mitteln eines Systems ergreifen. Diese Massnahmen beinhalten:

- Inspektion
- Wartungen
- Instandsetzungen (Unterhalt).

Die Instandsetzungsziele müssen mit den Unternehmenszielen abgestimmt werden und es sind entsprechende Instandhaltungsstrategien festzulegen.

Die Instandhaltung entwickelt sich durch die zunehmende Digitalisierung und Datenanalyse weg von reaktiven Ansätzen hin zu vorausschauender und optimier-

ter Wartung. Wichtige Entwicklungen sind dabei der Einsatz von IoT-Sensoren und künstlicher Intelligenz (KI) zur Echtzeitüberwachung und Fehlererkennung, die Integration von Instandhaltungsdaten in übergreifende Prozesse sowie ein stärkerer Fokus auf Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz (Stichwort Digital und Predictive Asset Maintenance).

### 6.9.3 Wartungsvertrag

Je nach Grösse und Komplexität der Anlage, sowie Anzahl der beteiligten Unternehmen ist mit den Anlagelieferanten, ein Wartungsvertrag zu vereinbaren. Auf diese Weise können Störungen auf ein minimales Mass reduziert und die Betriebssicherheit erhöht werden. Mögliche Vertragspartner sind:

- Lieferant des Erzeugers mit Steuerung
- Lieferant der Brennstoff- Energieversorgung
- Lieferant der Abgasbehandlung
- Lieferant der Hydraulik (Verrohrung)
- Lieferant des Regel- oder Leitsystems
- Lieferant der Leckageüberwachungsanlage
- Lieferant der Übergabestationen.

Unter Umständen ist mit allen oben angeführten Lieferanten ein Wartungsvertrag abzuschliessen. Die eingeschlossenen Leistungen sollen bei allen ähnlich oder gleich sein.

In einem Wartungsvertrag sollten folgende Punkte schriftlich festgehalten werden:

- Zweck des Vertrags
- Klare Beschreibung von Liefergrenzen und Leistungen (auch Garantien möglich!)
- Beschreibung von Ausschlüssen und Ausnahmen
- Ausweisen von Stundensätzen und Zulagen sowie Spesen
- Kosten
- Gültigkeit und Dauer
- Kündigung
- Verlängerung
- Kontaktadresse und Organisation für die Anforderung von Service-Leistungen im Notfall
- Pflichten des Betreibers
- Rechte des Unternehmers
- Ort, Datum und Unterschrift von Bauherr und Unternehmer

### 6.9.4 Versicherungen

Für den langfristig gesicherten wirtschaftlichen Betrieb eines Energieversorgers muss auch der Abschluss von entsprechenden Versicherungen berücksichtigt werden. Dies hat insbesondere deshalb grosse Bedeutung, da meist vertragliche Energielieferverpflichtungen mit den

Kunden eingegangen worden sind. Es lässt sich bei keiner Energiezentrale gesichert vorhersagen, dass keine unerwarteten Anlagestörungen auftreten können, welche die Energielieferung unterbrechen oder unwirtschaftlich machen.

Beim Abschluss von Versicherungen sollten im wesentlichen folgende Gruppen genauer betrachtet werden:

- Bauwesenversicherung (während Bauphase)
- Feuerversicherung
- Maschinenbruch- und Betriebsunterbrechungsversicherung
- Betriebshaftpflichtversicherung.

Da sich das Versicherungswesen relativ umfangreich und komplex darstellt, empfiehlt es sich eine Risikoabschätzung durchzuführen und Experten heranzuziehen.

Tabelle 6.15 Checkliste Phase 6 – Betrieb und Bewirtschaftung.

| Check | Checkliste Phase 6 – Betrieb und Bewirtschaftung                                                                                                | Bemerkungen   |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|       | <b>Betriebskonzept</b>                                                                                                                          | Kapitel 6.9.1 |
|       | Betriebskonzept erstellen                                                                                                                       |               |
|       | Erfassen der Betriebsdaten                                                                                                                      |               |
|       | Aus- und Weiterbildungs-Massnahmen des Betriebspersonals festlegen                                                                              |               |
|       | Wartungsplan erstellen                                                                                                                          |               |
|       | Alarmierung und Pikettorganisation                                                                                                              |               |
|       | Notfallplan                                                                                                                                     |               |
|       | Erfolgsüberwachung durchführen                                                                                                                  |               |
|       | <b>Instandhaltung</b>                                                                                                                           | Kapitel 6.9.2 |
|       | Instandhaltungsstrategie festlegen (vorbeugende Instandhaltung auf der Basis von Betriebsergebnissen und der Kontroll- und Inspektionsarbeiten) |               |
|       | <b>Wartungsvertrag</b>                                                                                                                          | Kapitel 6.9.3 |
|       | Wartungsverträge mit Lieferanten der wichtigsten Anlagesysteme vereinbaren                                                                      |               |
|       | <b>Versicherungen</b>                                                                                                                           | Kapitel 6.9.4 |
|       | Risikoabschätzung durchführen und bei Bedarf Experten heranziehen (z.B. Versicherungsmakler)                                                    |               |
|       | Feuerversicherung                                                                                                                               |               |
|       | Maschinenbruch- und Betriebsunterbruchversicherung                                                                                              |               |
|       | Betriebshaftpflichtversicherung                                                                                                                 |               |

## 7 Wirtschaftlichkeit

### 7.1 Grundlegende Wirtschaftlichkeitsfragen

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von thermischen Netzen ergeben sich verschiedene Fragestellungen. Die wichtigsten sind:

- Wie hoch werden die Wärme- und/oder Kältegestehungskosten?
- Wie ist die Wirtschaftlichkeit des thermischen Netzes im Vergleich zu anderen (dezentralen) Energiesystemen und Lösungen?
- Welche Preise können den zukünftigen Kundinnen und Kunden angeboten werden?
- Wie setzt sich die Tarifstruktur grundlegend zusammen (Anschlussgebühr, Grundpreis, Messpreis, Arbeitspreis) und zu welchen Anteilen?
- Welches sind die wesentlichen wirtschaftlichen Risiken?
- Wie soll die wirtschaftliche Entwicklung über die Betriebszeit der Anlage und sich ändernden Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, wie zum Beispiel Brennstoffpreise, sinkender Wärmeabsatz durch Sanierungen und Klimawandel, CO<sub>2</sub>-Bepreisung, politischer und gesellschaftlicher Wandel.

Die Wahl der geeigneten Methode für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung hängt wesentlich von der Fragestellung und dem Projektstand ab.

In frühen Projektphasen, zum Beispiel Stufe Vorstudie/Machbarkeitsstudie, ist eine Abschätzung der Investitions- und Wärme gestehungskosten aufgrund von Erfahrungs- und Richtwerten sowie der Annuitätenmethode vielfach ausreichend.

In späteren Projektphasen wird die Genauigkeit der Kostenpositionen durch konkrete Angebote erhöht sowie die Sensitivität, die wirtschaftliche Entwicklung und die Risiken des Projektes über die Projektlaufzeit deutlich genauer und aufwändiger beurteilt.

In den nachfolgenden Kapiteln wird gezeigt, wie die Verantwortungen zwischen den Projektbeteiligten verteilt sind, welche Methoden geeignet und welche Hilfsmittel anwendbar sind, um die oben aufgeführten Fragen beantworten zu können.

### 7.2 Verantwortlichkeiten

Die Hauptverantwortung für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines thermischen Netzes liegt grundsätzlich bei der Bauherrschaft. Die verantwortlichen Planenden und weitere Experten können dabei die Bauherrschaft unterstützen und beraten. Je nach Situation kann die Durchführung der Wirtschaftlichkeitsberechnung auch an externe Experten delegiert werden. In jedem Fall muss die Bauherrschaft entscheiden.

Von der Bauherrschaft sind folgende Vorgaben für die Wirtschaftlichkeitsrechnung zu definieren und schriftlich festzuhalten:

- Berechnungsmethode.
- Kalkulationszinssatz.
- Nutzungsdauer der Gewerke und Betrachtungszeitraum.
- Betriebskosten.
- Energiepreise.
- Inflationsrate (Preissteigerungsrate).
- Entwicklung des Wärmebedarfes (Sanierungsrate, Etappierung und Entwicklung des Wärmeabsatzes).

Auf Basis dieser Vorgaben stellen die Verantwortlichen die Datengrundlage für die Entscheidungsfindung zusammen:

- Investitionskosten Energiezentrale und Verteilnetz.
- Wartungs- und Instandsetzungskosten.
- Energiekosten, bestehend aus Brennstoffkosten und Hilfsenergiekosten (bedarfs- oder verbrauchsgebundene Kosten).
- Leistungs- und Wärmebedarf der vorgesehenen Wärmekundinnen und -kunden (Ist-Situation sowie zukünftige Entwicklung).
- Sensitivitäts- und Risikoanalyse.

Die Verantwortlichkeiten zwischen Bauherrschaft und Planenden kann wie folgt aufgeteilt werden:

#### Bauherrschaft:

- Hauptverantwortlich für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit. Muss diese und die Basisdaten dazu prüfen und kritisch hinterfragen.
- Entscheidung über das gebäudescharfe Versorgungsgebiet (Abnehmerstruktur, Trassenplan etc.).
- Entscheidung über den möglichen Anschlusszeitpunkt (beeinflusst den Zeitpunkt der anfallenden Investitionskosten und der zu erwartenden Einnahmen aus dem Wärmeverkauf).

#### Planende:

- Verantwortlich für die Ermittlung des erforderlichen Wärmeleistungsbedarfs einschliesslich des Lastgangs und des zu erwartenden Jahreswärmebedarfs der potenziellen Kunden.
- Verantwortlich für die Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten.
- Unterstützung der Bauherrschaft bei der Entscheidungsfindung.

## 7.3 Kostenstruktur

Bei der Ermittlung der Kosten von gebäudetechnischen Anlagen werden laut VDI-Richtlinie 2067 [211] folgende vier Kostengruppen berücksichtigt:

- Kapitalgebundene Kosten (einschliesslich Instandsetzung und Erneuerung)
- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten
- Sonstige Kosten

Die Zuordnung der einzelnen Kostenarten zu diesen Kostengruppen zeigt Tabelle 7.1. Für einzelne Kostenarten werden bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung die Kosten aufgrund von Richtwerten abgeschätzt, zum Beispiel als Prozentsatz der Investitionssumme oder der produzierten Wärmemenge. Dabei muss klar defi-

niert sein, welche Kostenarten den einzelnen Kostengruppen zugeordnet sind.

Gemäss VDI 2067 [211] bedeutet Instandhaltung die Durchführung von Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustands und umfasst die Kostenarten «Instandsetzung», «Wartung» und «Inspektion»:

- **Instandsetzung** (in der Schweiz meist «Unterhalt» genannt): Massnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustands.
- **Wartung**: Massnahmen zur Bewahrung des Sollzustands.
- **Inspektion**: Massnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands.

Tabelle 7.1 Kostengruppen und Kostenarten als Grundlage und Richtwerte für die Ermittlung der jährlichen Kosten. Die Richtwerte gelten beispielhaft für Holzheizwerke. Zu beachten ist, dass – abweichend von VDI 2067 [211] – die Kosten für die Wartung in den Personalkosten enthalten sind.

| Kosten-<br>gruppe             | Kostenart                                                                       | Basis für die Ermittlung<br>der jährlichen Kosten                                  | Richtwerte                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kapitalgebundene<br>Kosten    | Kapitalkosten der Anlagekomponenten und baulichen Anlagen (Investitionen)       | Investitionssummen der Gewerke, Nutzungsdauer und Kalkulationszinssatz             | Nutzungsdauer: siehe Tabelle 7.2<br>Zinsen: gemäss Vorgabe der Bauherrschaft oder der geldgebenden Institutionen (Förderstellen).                                                                                                                                     |
|                               | Instandsetzungskosten (Reparaturen gemäss VDI 2067 [211])                       | Investitionssummen der Gewerke, Prozentsatz der Investitionssumme                  | Siehe Tabelle 7.2                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Verbrauchsgebundene<br>Kosten | Brennstoffkosten                                                                | Jahresverbrauch und Heizwert oder Brennstoffverbrauch, Brennstoffpreis             | Effektive, auf Angeboten basierende Preise                                                                                                                                                                                                                            |
|                               | Hilfsenergie (Elektrizität) für Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung              | Prozentsatz der Wärmemenge (erzeugt beziehungsweise verkauft) x Elektrizitätspreis | für reine Wärmeerzeugung: 1 – 1.5 % der erzeugten Wärmemenge.<br>Mit Abgaskondensation i.d.R. höher: ca. 2 %<br><br>keine Richtwerte für WKK- oder Wärmepumpen-Anlagen, effektive Kosten abschätzen.<br><br>für Wärmeverteilung: 0.5 - 1 % der verteilten Wärmemenge. |
|                               | Betriebsstoffe Wärmeerzeugung (z. B. für SNCR-Anlagen)                          | Preis, Verbrauchsmenge                                                             | effektive Kosten abschätzen                                                                                                                                                                                                                                           |
|                               | Ascheentsorgung                                                                 | Brennstoffeinsatz, Aschegehalt, Entsorgungsart                                     | effektive Kosten abschätzen (evtl. bereits im Brennstoffpreis enthalten)                                                                                                                                                                                              |
|                               | Personalkosten (für Bedienung, Reinigung, Wartung, Inspektion, ohne Verwaltung) | Prozentsatz der Investitionskosten Wärmeerzeugung                                  | um 1.5 % der Investitionskosten Wärmeerzeugung                                                                                                                                                                                                                        |
| Betriebsgebundene<br>Kosten   | Mieten, Pacht, Konzessionsgebühren                                              | einzelfallabhängig                                                                 | effektive Kosten abschätzen                                                                                                                                                                                                                                           |
|                               | Schornsteinfeger, Abgasuntersuchung, Emissionsmessung, Eichung von Wärmezähler  | einzelfallabhängig                                                                 | effektive Kosten abschätzen                                                                                                                                                                                                                                           |
| Sonstige<br>Kosten            | Versicherungen, Steuern, allgemeine Abgaben, Verwaltungskosten                  | Prozentsatz der Investitionssumme                                                  | 0.5 - 1.5 % der Gesamtinvestition                                                                                                                                                                                                                                     |

Die Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die Kostenarten und zeigt, welche Basisdaten für die Berechnung verwendet werden sollen. Teilweise sind auch Richtwerte angegeben. Diese können sowohl für die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode als auch für eine Planbilanz und Planerfolgsrechnung herangezogen werden. Die angegebenen Richtwerte sollten nicht ungeprüft übernommen werden. Da die spezifischen Kosten von den eingesetzten Systemen, der Anlagegrösse und von der Auslastung (Vollbetriebsstunden) abhängig sind, ist für jeden Einzelfall zu prüfen, ob ein Richtwert verwendet werden kann und wie hoch dieser angesetzt werden soll.

Zu beachten sind zudem Anlagenteile, welche zur fossilen Wärmeerzeugung dienen und nicht realistisch weiterbetrieben werden können, müssen bis spätestens auf das Zieldatum 100% Erneuerbarkeit abgeschrieben werden, längstens also bis 2050 (siehe KIG [212]) beziehungsweise müssen die Kosten für CO<sub>2</sub>-Kompensation und Negativemissionskauf mit einberechnet werden.

Die anzunehmende Nutzungsdauer für die Wirtschaftlichkeitsrechnung ist gemeinsam mit der Bauherrschaft und eventuell mit möglichen geldgebenden Institutionen (Banken, Förderstellen etc.) festzulegen. Bei der Festlegung der Nutzungsdauer ist zu beachten, dass diese nicht zwingend von der technischen Lebensdauer abhängig ist. Die Nutzungsdauer wird auch von der Veränderung der Bedürfnisse und von technologischen Entwicklungen beeinflusst. Zudem werden bei Sanierungen nicht einzelne Elemente, sondern in der Regel mehrere Bauteile gleichzeitig ersetzt - unabhängig ob jedes Element die technische Lebensdauer erreicht hat oder nicht.

Tabelle 7.2 Richtwerte für die Nutzungsdauer und die Instandsetzungskosten.

| Gewerk                                                                    | Nutzungs-<br>dauer<br>Jahre | Spez. Instand-<br>setzungskosten<br>% |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Anlagenteile zur Wärme- und Kälteerzeugung (inkl. Regelung und Steuerung) | 20                          | 2 – 3                                 |
| Hydraulik                                                                 | 20                          | 2                                     |
| Elektro- und Haustechnikinstallationen                                    | 20                          | 2                                     |
| Bauliche Anlagen und Erschliessung                                        | 50                          | 1                                     |
| Verteilnetz (inkl. Rohrleitungen und Erdarbeiten)                         | 40                          | 1                                     |
| Wärmeübergabestation                                                      | 30                          | 2                                     |
| Fahrzeuge                                                                 | 15                          | 3                                     |
| Planung*                                                                  | gemittelt                   | -                                     |

\* die gemittelte Nutzungsdauer für die Planung muss mit den Planungskosten für die einzelnen Gewerke gewichtet, respektive die Planungskosten den einzelnen Gewerken zugerechnet werden.

Die VDI-Richtlinien 2067 [211] enthält detailliertere und teilweise abweichende Angaben zur Tabelle 7.2. Für Berechnungen nach VDI sind entsprechend die Angaben aus der VDI-Richtlinie 2067 zu verwenden.

## 7.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung

### 7.4.1 Einleitung

In der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden die Wärmegestehungs- und Wärmeverteilungskosten, die Investitionskosten und die Kosten für Betrieb und Instandhaltung ermittelt. In einem Variantenvergleich können unterschiedliche Heizsysteme oder Ausführungsvarianten bezüglich ihrer Kosten gegenübergestellt werden.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist aber auch die Grundlage für die Preisbildung und die Preisgestaltung (siehe Kapitel 7.6.4).

Für die Analyse von Energiesystemen, die in der Regel eine lange Nutzungsdauer aufweisen und bei denen die Preissteigerung und andere künftige Veränderungen der Eingangsdaten daher von Bedeutung sind, wird die Verwendung **dynamischer Rechenmethoden** empfohlen. Bei diesen Verfahren werden die im Betrachtungszeitraum erwarteten Veränderungen abgeschätzt oder anhand von statistischen Mittelwerten vorgegeben, um die Jahreskosten für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage prognostizieren zu können. **Statische Rechenmethoden** betrachten demgegenüber nur die Verhältnisse, wie sie zum Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorliegen. Bei Betrachtungszeiträumen, die in der Regel mindestens 20 Jahre betragen, können sich damit deutliche Abweichungen zu dynamischen Verfahren ergeben. Vielfach kann bei dynamischen Verfahren von vereinfachten Annahmen ausgegangen werden, so dass für die Wirtschaftlichkeitsrechnung einfache Summenformeln verwendet werden können und der Rechenaufwand damit nicht wesentlich grösser ist als für statische Verfahren.

Die wichtigsten dynamischen Rechenmethoden sind:

- Annuitätenmethode
- Kapitalwertmethode
- Barwertmethode
- Weighted Average Cost of Capital, kurz WACC.

Für einen Variantenvergleich werden ausser den Investitions- auch die Wärmegestehungskosten jeder Variante ermittelt. Der Vergleich der Wärmegestehungskosten erlaubt einen Vollkostenvergleich über die Nutzungsdauer der Anlage. Die Berechnung der Wärmegestehungskosten nach der Annuitätenmethode wird in der Praxis häufig angewendet und ist in Kapitel 7.4.2 beschrieben.

Um die wirtschaftliche Entwicklung eines thermischen Netzes besser beurteilen zu können, sollten der jährliche Verlauf von Aufwand und Ertrag über mindestens 20 Betriebsjahre beurteilt werden, insbesondere von

Interesse ist die Liquiditätssituation in den Anfangsjahren. Hierzu eignet sich die Barwertmethode (NPV-Methode) sehr gut, mit der der effektive (interne) Zinssatz (IRR) der Investition berechnet werden kann. Als weitere Methode eignet sich auch die Beurteilung nach den gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten, kurz WACC (Abkürzung von englisch Weighted Average Cost of Capital). Diese Methode bezeichnet einen Ansatz der Unternehmensbewertung, der mit gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten arbeitet, und zur Bestimmung der Mindestrendite von Investitionsprojekten nützlich ist [213].

### 7.4.2 Berechnung der Wärmegestehungskosten mit der Annuitätenmethode

Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten wird üblicherweise die Annuitätenmethode angewandt. Diese ist in der VDI-Richtlinie 2067 [211] detailliert beschrieben. Die Annuitätenmethode ermittelt die im Betrachtungszeitraum anfallenden mittleren jährlichen Kosten mit einem mittleren Annuitätsfaktor. Die Jahreskosten setzen sich aus den Kapital-, Betriebs- und Energiekosten zusammen. In den Kapitalkosten wird die Investition über die Nutzungsdauer (Laufzeit der Anlage) verzinst und getilgt. Die Betriebskosten setzen sich aus Instandhaltungs- und Personalkosten zusammen. Die Energiekosten ergeben sich aus dem Energieverbrauch inklusive Hilfsenergie je Energieträger. Die jährlichen Betriebs- und Energiekosten werden unter Berücksichtigung ihrer möglichen Entwicklung zu den Kapitalkosten addiert.

Berechnung der **Jahreskosten K** nach [214]:

$$K = I a + A d a$$

K Jahreskosten [CHF/a]

I Investitionskosten (je Gewerk) [CHF]

A Jährliche Betriebskosten [CHF/a] bestehend aus:

- Wartungs- und Instandsetzungskosten
- Energiekosten (Brennstoffe und Hilfsenergie)
- sonstige Kosten

a Annuitätsfaktor [-], berechnet aus:

$$\text{für } i = 0: a = \frac{1}{n} \quad \text{für } i > 0: a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

d Diskontierungssummenfaktor (auch Rentenbarwertfaktor oder Abzinsungssummenfaktor) [-], berechnet aus:

$$d = \frac{(1+i-e)^n - 1}{(1+i-e)^n * (i-e)}$$

i Kalkulationszinssatz [-]

n Betrachtungsdauer (Nutzungsdauer) [-]

e allgemeine Teuerung, Inflationsrate [-]

Da die für die Wärmegestehungskosten relevanten Kostenpositionen stark von Land, Region, Standort, Rahmenbedingungen, Bauweise, Lohnstrukturen, Energiepreisen, Schnittstellen usw. abhängen, wird auf die Angabe von Richtwerten bewusst verzichtet. Ein

Vergleich der Wärmegestehungskosten mit anderen Lösungen im Rahmen eines Variantenvergleiches ist oftmals zweckdienlicher.

Die Bestimmung der Nutzungsdauer und der Instandsetzungskosten kann gemäss Tabelle 7.2 erfolgen, oder werden von der Bauherrschaft vorgegeben.

In vielen Fällen sind gegenüber der in VDI 2067 detailliert beschriebenen Methode die nachfolgenden Vereinfachungen möglich:

- Die Investitionen fallen nur zu Beginn des Betrachtungszeitraumes an.
- Der Betrachtungszeitraum entspricht der Lebensdauer der Investitionen. Das heisst, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Ersatzbeschaffungen getätigt werden müssen und keine Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraumes mehr bestehen.

Entspricht die Nutzungsdauer nicht dem Betrachtungszeitraum, so muss dies wie folgt berücksichtigt werden:

- Ist die Nutzungsdauer kürzer als der Betrachtungszeitraum, so ist die Ersatzinvestition entsprechend zu berücksichtigen (Barwert zur Erstinvestition dazurechnen).
- Ist am Ende des Betrachtungszeitraums das Ende der Nutzungsdauer noch nicht erreicht, so reduziert sich die Investition um den Barwert des Restwerts.

Aus der Division der Jahreskosten durch die mittlere jährlich erzeugte Nutzwärme ergeben sich die Wärmegestehungskosten  $k$  wie folgt:

$$k = \frac{K}{Q_{\text{Nutz}}}$$

k Wärmegestehungskosten [CHF/MWh]

K Jahreskosten [CHF/a]

$Q_{\text{Nutz}}$  Jährlich erzeugte Nutzwärme [MWh/a]  
(in thermischen Netzen können die Wärmegestehungskosten auch auf die gelieferte Nutzwärme bezogen werden)

Die Berechnung der Wärmegestehungskosten nach der Annuitätenmethode ist zum Beispiel auch im Excel-Tool Wirtschaftlichkeitsberechnung von QM Holzheizwerke [215] oder in der Open-Source-Software Sophena [216] enthalten. Zudem haben viele Planungsbüros für die Wirtschaftlichkeitsberechnung eigene Tabellenkalkulationsprogramme entwickelt, mit denen sich die Wärmegestehungskosten nach der Annuitätenmethode berechnen lassen.

### 7.4.3 Barwertmethode (NPV) und interner Zinssatz (IRR)

Die in Kapitel 7.4.2 beschriebene Annuitätenmethode berechnet die mittleren Kosten über die Betrachtungszeit. Da die Mehrheit der Investitionen für ein thermisches Netz üblicherweise am Anfang der langen Nutzungsdauer anfallen und sich die Einnahmen über die Jahre hinweg erst entwickelt, ist es sinnvoll die jährlichen Aufwände und Erträge etwas genauer zu betrach-

ten. Hierzu eignet sich die Barwert- oder NPV-Methode (engl. Net-Present-Value) sehr gut, aus der auch der effektive (interne) Zinssatz oder IRR der Investition (engl. internal rate of return) berechnet werden kann.

Als interner Zinssatz wird die durchschnittliche Verzinsung des investierten Kapitals über die Nutzungsdauer bezeichnet. Die Berechnung berücksichtigt die schwankenden Erträge (Wärmeverkauf) und Aufwendungen (Investition, Energiekosten, Instandhaltung) und ermittelt eine mittlere jährliche Rendite. Es wird derjenige Zinssatz gesucht, bei dem der Kapitalwert zum Zeitpunkt der Berechnung gleich null ist [217].

$$I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n}$$

- K Jahreskosten [CHF/a]
- t Zeitindex für Jahre, wobei  $t = 1, 2, 3, \dots, n$
- n Betrachtungsdauer/Nutzungsdauer [a]
- i Diskontierungszinssatz (Kalkulationszinssatz) [%]
- $I_0$  Investition im Zusammenhang mit der Beschaffung des Investitionsobjektes, zum Beispiel Kaufpreis einer Maschine [CHF]
- $a_t$  Aufwand während der Nutzungsdauer, fällig am Ende der jeweiligen Zeitperiode  $t$ , wie zum Beispiel Zahlungen für Brennstoffe, Löhne und Instandhaltung [CHF]
- $e_t$  Ertrag während der Nutzungsdauer, fällig am Ende der jeweiligen Zeitperiode  $t$ , wie zum Beispiel Erlöse aus dem Energieverkauf [CHF]
- $L_N$  Liquiditätserlös am Ende der Nutzungsdauer

Zur Ermittlung des internen Zinssatzes (IRR) muss die Gleichung oben nach  $i$  aufgelöst werden.

Bei Investitionsprojekten mit mehr als zwei Nutzungsperioden ergeben sich dabei erhebliche mathematische Lösungsschwierigkeiten, sodass mit Näherungslösungen gearbeitet werden muss. Das Vorgehen sieht wie folgt aus [217]:

- Es wird ein Kalkulationszinssatz  $i$  bestimmt, bei dem der damit berechnete Kapitalwert möglichst nahe bei null liegt, aber noch positiv ist.
- Es wird ein zweiter Kalkulationszinssatz  $i$  bestimmt, bei dem der damit berechnete Kapitalwert ebenfalls möglichst nahe bei null liegt, aber einen negativen Wert ergibt.
- Mit den beiden ermittelten Werte wird mittels Interpolation der Zinssatz berechnet, bei dem der Kapitalwert gerade null wird.

Tabellenkalkulationsprogramme wie Excel verfügen über spezielle Funktionen, welche diese Berechnungen vereinfachen.

Ist der berechnete interne Zinssatz einer Investition grösser als der vorgegebene Kalkulationszinssatz, so gilt die Investition als wirtschaftlich. Entsprechend gilt eine Investition als unwirtschaftlich, wenn der interne Zinssatz kleiner als der vorgegebene Kalkulationszinssatz ist.

#### 7.4.4 Variantenvergleich

Für einen Variantenvergleich und zur Bestimmung der Wärmegegestehungskosten kann die in Kapitel 7.4.2 beschriebene Annuitätenmethode verwendet werden.

Wenn sich die Inflationsrate und der Kapitalzinssatz näherungsweise parallel verhalten und somit bei konstanter Teuerung auch die Zinssätze konstant bleiben, kann mit dieser Annahme vereinfachend mit dem sogenannten realen Zinssatz gerechnet werden.

Der Realzins stellt die über die allgemeine Teuerungsrate hinausgehende Verzinsung dar und ergibt sich näherungsweise als Differenz zwischen dem Zinssatz und der Teuerungsrate. Beispiel: Beträgt der Nominalzins 3% bei einer allgemeinen Teuerung von 1%, so ergibt sich ein Realzins von 2%. In der Schweiz liegt der Realzins im langjährigen Mittel zwischen 1% bis 3%. In der Wirtschaftlichkeitsberechnung dürfen Zinssatz und Inflationsrate nicht unabhängig voneinander festgelegt werden, da sie eng mit einander verknüpft sind. Es ist daher zwischen **nominaler** und **realer Betrachtungsweise** zu unterscheiden.

Bei der **nominalen Betrachtungsweise** (VDI 2067) wird die Teuerung der späteren Jahre für die Ermittlung der Aufwände und Erträge berücksichtigt. In diesem Fall ist als Kalkulationszinssatz der effektiv zu zahlende Zins für Bankkredite einzusetzen.

Bei der vereinfachenden **realen Betrachtungsweise** wird über den ganzen Betrachtungszeitraum mit heutigen Preisen gerechnet. In diesem Fall ist als Kalkulationszinssatz der Realzins (Differenz zwischen Zinssatz und Teuerungsrate) einzusetzen. Dabei ist zu beachten, dass zwar die Relation der Kosten korrekt wiedergegeben wird, die ermittelten Wärmegegestehungskosten aber nicht den tatsächlichen entsprechen. Für eine einfache Berechnung wird für die reale Betrachtungsweise zudem angenommen, dass der Ersatz der Anlagen nach Ablauf der Nutzungsdauer zu real gleichen Preisen wie ursprünglich erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Nutzungsdauern der Varianten erheblich voneinander abweichen können. Der Betrachtungszeitraum muss dann der längsten durchschnittlichen Nutzungsdauer der verschiedenen Varianten entsprechen.

Werden die oben beschriebenen Regeln berücksichtigt, führt die reale und die nominale Betrachtungsweise zu den gleichen qualitativen Ergebnissen.

#### 7.4.5 Sensitivitätsanalyse

Mit einer Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss von Schwankungen einzelner (wichtiger) Kostenfaktoren dargestellt und folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Kostenfaktoren beeinflussen das Ergebnis besonders stark?
- Innerhalb welcher Grenzen können die Werte der Kostenfaktoren schwanken, ohne dass der betriebswirtschaftliche Erfolg des Unternehmens gefährdet ist?

So können zum Beispiel die Auswirkungen von Kostenüberschreitungen bei den Investitionskosten, ein geringerer Wärmeabsatz oder auch der Einfluss von schwankenden Energiepreisen, Abgaben und Steuern berechnet und beurteilt werden.

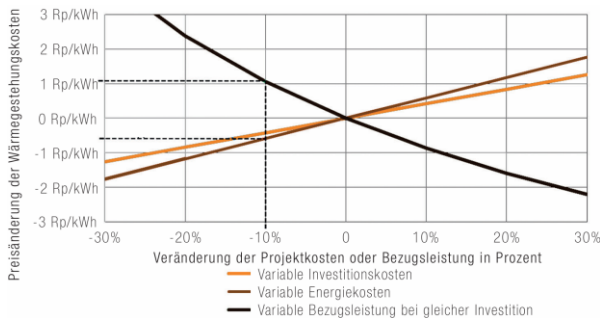


Bild 7.1 Preissensitivität von Wärmegestehungskosten bei prozentualer Änderung der Investitionskosten [207].

Eine einfache händische Sensitivitätsanalyse ist für Projekte mit hohem Investitionsaufwand für eine erste Abschätzung in Ordnung. Zur Generierung eines robusten Optimums ist bei komplexeren Projekten mit einer Auswahl des Versorgungssperimeters, der Energiequellen und so weiter entsprechende statistische Methoden wie zum Beispiel Monte-Carlo-Modelle heranzuziehen.

## 7.5 Businessplan

### 7.5.1 Aufbau und Inhalte

Der Businessplan beschreibt ein Unternehmenskonzept oder einen Unternehmensplan und somit eine Geschäftsidee, die in einem Unternehmen umgesetzt werden soll. Auch der Bau und Betrieb eines thermischen Netzes sind in diesem Sinne ein Unternehmen und benötigen einen Businessplan. Ein Businessplan ist damit auch ein Instrument, das über die Qualität eines Unternehmens Auskunft gibt. Ein guter Businessplan hilft bei der Finanzierung und der Akquisition von Wärmekundinnen und -kunden. Für die nachfolgenden Ausführungen umfasst der Businessplan ein Dokument in folgenden zwei Teilen:

**1. Textteil:** Dies ist der Businessplan als schriftliche Formulierung der Geschäftsidee in Bezug auf Produkt, Dienstleistung, Kundschaft und Marketing. Der Businessplan gibt Auskunft über die Entwicklung des Unternehmens und ermöglicht eine Beurteilung der Risiken.

Für ein thermisches Netz ist es dabei wichtig, die Auswirkungen verschiedener Varianten des Netzausbaus aufzuzeigen.

**2. Finanzteil:** Planbilanz und Planerfolgsrechnung geben Auskunft über geplante Einnahmen und Ausgaben, Förderungen, Finanzierung und Liquiditätsplanung. Die Planbilanz und Planerfolgsrechnung erfolgen in der Regel über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren.

Der Businessplan soll in diesen zwei Teilen folgende Inhalte abdecken:

- Executive Summary (maximal zwei Seiten)
- Unternehmen: Gründerteam, Unternehmensprofil, Unternehmensziele
- Produkt oder Dienstleistung: Vorteile und Nutzen für Kundinnen und Kunden, Stand der Entwicklung, Erstellung
- Branche und Markt: Branchenanalyse, Marktanalyse und Marktsegmentierung, Zielkundschaft, Wettbewerb, Standortanalyse
- Marketing: Markteintritt, Marketing- und Absatzkonzept, Absatzförderung
- Management und Schlüsselpersonen
- Umsetzungsplanung
- Chancen und Risiken
- Finanzteil: Planung für die kommenden 20 bis 25 Jahre: Personalplanung, Investitions- und Abschreibungsplanung, Plan-Gewinn- und Plan-Verlustrechnung, Liquiditätsplanung, Aufzeigen des Finanzbedarfs.
- Sensitivitätsanalyse als Ergänzung zur Investitionsrechnung, in der durch Variation der wichtigsten Inputgrößen folgende Fragen beantwortet werden:
  - Welche Inputgrößen beeinflussen die Höhe des Ergebnisses besonders stark?
  - Innerhalb welcher Grenzen können die Werte der Inputgrößen schwanken, ohne dass der Erfolg des Unternehmens gefährdet ist?
- Wichtige Inputgrößen sind unter anderem:
  - Fremdmittelanteil und Fremdkapitalzinssätze
  - Brennstoffpreis (und sichere Versorgung)
  - Bau- und Anlagenkosten
  - Strompreis
  - Personalkosten
  - Fördergelder

Der Businessplan sollte grundsätzlich von der Bauherrschaft verfasst werden. Einerseits ist die Bauherrschaft für die Geschäftsidee verantwortlich und andererseits ist dies die beste Basis, um den Businessplan nach aussen zu vertreten.

### 7.5.2 Planbilanz und Planerfolgsrechnung

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens kann sich nicht allein auf die Berechnung der mittleren Wärmegestehungskosten abstützen. Auch wenn über einen längeren Betrachtungszeitraum die Wärmegestehungskosten niedriger sind als die Erträge, ist eine Kompensation von allfälligen Verlusten in den ersten Betriebsjahren durch Gewinne in späteren Jahren nicht möglich, wenn die Liquidität in den Anfangsjahren nicht gesichert ist. Die Liquiditätssituation ist daher besonders zu beachten, wozu die Planbilanz und Planerfolgsrechnung mit Nachweis der wirtschaftlichen Situation über jedes Jahr dient.

Die Prüfung der Wirtschaftlichkeit und der dazugehörigen Planungsrechnungen sollte nicht nur einmalig nach der Erstellung durchgeführt werden. Wichtig ist auch, dass die Wirtschaftlichkeitsberechnung während der gesamten Betriebszeit regelmässig mit den effektiven Kosten aktualisiert, abgeglichen und geprüft wird. Mit der sogenannten Nachkalkulation können Trends und notwendige Kostenoptimierungen erkannt und entsprechend gehandelt werden.

Bei der Berechnung der Planbilanz und der Planerfolgsrechnung der einzelnen Jahre sollte die Teuerung berücksichtigt werden. Die Annahmen bezüglich Zinsen und Teuerung sollten mit den kreditgebenden Institutionen besprochen und vereinbart werden.

Von QM Holzheizwerke wird ein Excel-Tool zur Wirtschaftlichkeitsberechnung [215] zur Verfügung gestellt, welches speziell für thermische Netze entwickelt wurde. Mit diesem Tool kann die wirtschaftliche Situation eines thermischen Netzes über 25 Jahre abgebildet werden und basiert auf der Methode des internen Zinssatzes.

## 7.6 Wärmeliefervertrag

### 7.6.1 Allgemein

Mit dem Wärmeliefervertrag wird eine langfristige Partnerschaft zwischen Wärmelieferant und Kunden eingegangen. Eine spezifische gesetzliche Grundlage für Wärmelieferverträge gibt es in der Schweiz nicht. Grundsätzlich handelt es sich bei einem Wärmeliefervertrag um einen Kaufvertrag mit langen Laufzeiten. Der Kaufvertrag ist im OR geregelt [218]. Daneben sind noch weitere gesetzliche Rahmendbedingungen zu beachten, wie zum Beispiel das Kartellgesetz [219].

In Deutschland ist in diesem Bereich die Rechtslage wesentlich klarer definiert. Die Basis bildet die Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme "AVB-FernwärmeV" [220]. Die Verordnung enthält Regelungen u.a. über Hausanschlusskosten, technische Anschlussbedingungen, Preisbildung und Preisänderungsklauseln.

Unabhängig davon entstehen für beide Vertragsparteien (erhebliche) wirtschaftliche Abhängigkeiten. Bei der vertraglichen Gestaltung wird daher der Einbezug entsprechender Fachpersonen oder die Verwendung von (aktuellen) Musterverträgen empfohlen.

Folgende Punkte werden in der Regel zwischen den Vertragspartnern vertraglich vereinbart:

- Struktur des Wärmepreises und Abschätzung der späteren Konkretisierung der Zahlenwerte
- Inhalt der technischen Anschlussbedingungen und Anschlussleistung des Wärmeabnehmers
- Umfang und Art der Wärmelieferung, Nutzung und Eigentumsgrenzen
- Versorgungssicherheit und Vorgehen bei Ausfall der Hauptwärmequelle
- Geplante Vertragslaufzeit, Kündigungsbedingungen, Vorgehen bei Handänderungen
- Rechtlicher Rahmen der Energieerzeugung und der Trassenführung
- Fördermöglichkeiten

Der Wärmeliefervertrag sollte mindestens mit folgenden Dokumenten ergänzt werden, falls diese nicht bereits im Vertrag enthalten sind:

- Allgemeine Geschäftsbedingungen zum Wärmeliefervertrag (AGB)
- Technische Anschlussvorschriften (TAV)
- Tarifblatt/Tarifbestimmungen

Die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) dienen als Grundlage für eine Vielzahl von Verträgen und definieren allgemeine Punkte wie: Begriffe, Bau, Betrieb, Abgrenzung von Unterhalt und Eigentum, Wärmelieferungs- und Wärmebezugspflicht etc.

Die technischen Anschlussvorschriften (TAV) dienen dem Wärmelieferanten und dem Wärmeabnehmer als

Vorgabe zwecks Sicherstellung der technischen Anforderungen bei Planung, Umsetzung und Betrieb des thermischen Netzes.

Die Preisgestaltung wird in einem Tarifblatt oder den sogenannten Tarifbestimmungen festgehalten.

### 7.6.2 Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB)

Die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) dienen meist als Grundlage für eine Vielzahl von Verträgen und definieren die folgenden Punkte:

- Begriffe
- Bau, Betrieb, Unterhalt und Eigentum
- Wärmelieferungs- und Wärmebezugspflicht
- Beschränkung und Vermeidung von Lieferunterbrüchen – Haftung des Wärmelieferanten
- Schadenminderungspflicht
- Regelung Wärmabgabe an Dritte
- Durchleitungs-, Zugangs- und Benützungsrechte
- Veränderung der Anschlussleistung
- Einstellung der Wärmelieferung – Haftung des Kunden
- Eigentümerwechsel
- Verfahren bei Messfehlern
- Vorzeitige Beendigung des Vertrages
- Vertragsänderungen

### 7.6.3 Technische Anschlussvorschriften (TAV)

Die Technischen Anschlussvorschriften (TAV), oder auch sogenannte Technische Anschlussbedingungen (TAB), sind Bestandteil des Wärmeliefervertrages und dienen dem Wärmelieferanten und dem Kunden als Vorgabe zur Sicherstellung der technischen Anforderungen bei Planung, Umsetzung und Betrieb der Wärmeversorgung. Das Ziel der TAV ist, einen minimalen technischen Standard zu erreichen, die Qualität der Wärmeversorgung zu gewährleisten und grobe Fehler sowie Mängel zu verhindern.

Bei der Erarbeitung der Technischen Anschlussvorschriften gilt es, einen Mittelweg zu finden zwischen so wenig Einschränkungen wie möglich und so vielen wie nötig. Unnötig hohe technische Anforderungen führen zu hohen Kosten, während im umgekehrten Fall die Qualität der Wärmeübertragung und die Langlebigkeit der Anlage und der Komponenten beeinträchtigt wird (Produkte, Ausstattung, Konfiguration, Anordnung etc.).

Die TAV sollten kurz, prägnant und übersichtlich ausgeführt werden. Auf Normen und Vorschriften, welche grundsätzlich eingehalten werden müssen, ist zu verzichten.

Die TAV sollten zudem realistische Vorgaben machen (Rücklauftemperatur, Grädigkeit, Druckverluste, Materialien etc.) und nur wo notwendig Produktvorgaben machen (z. B. Wärmezähler, Ventile, Regelung etc.). Hingegen sollten in den TAV klare Vorgaben an die Sekundärseite und an die hydraulische Einbindung gestellt werden, wie z. B. zur Warmwassererwärmung sowie zu nicht erlaubten hydraulischen Einrichtungen.

Der Aufbau der TAV kann wie folgt gestaltet sein:

- Allgemein:
  - Geltungsbereich
  - Begriffe
  - Verantwortlichkeiten
  - Liefergrenze
  - Eigentumsverhältnisse
- Technische Grundlagen:
  - Wärmeträgermedium und Eigenschaften (Wasserchemie resp. Wasserqualität)
  - Temperaturen (Maximale Betriebstemperatur für die konstruktive Auslegung, Vor- und Rücklauftemperaturen Netzbetrieb)
  - Nenndruckstufe
  - Druckabfall Übergabestation (evtl. Vorgabe von Maximalwerten einzelner Komponenten)
  - Maximaler Differenzdruck im Netz bei Auslegung
- Ausrüstungsvorgaben:
  - Ausstattung Hausstation
  - Vorgaben an die Warmwassererwärmung
  - Anforderungen an die wichtigsten Komponenten (z. B. Wärmeübertrager, Kombiventil, Wärmezähler, Regelungs- und Kommunikationssystem etc.)
  - Anordnung der Komponenten (Prinzipschema)
  - Werkstoffe und Verbindungstechniken
  - Wärmedämmung
  - Qualität
- Einbindung Sekundärseite:
  - Anforderungen an hydraulische Einrichtungen sekundärseitig
  - Anforderungen an die Warmwassererwärmung sekundärseitig
  - Prinzipschema Hausstation und Warmwassererwärmung mit Liefer-, Eigentums- und Verantwortlichkeitsgrenzen
- Betriebliche Vorgaben:
  - Normen und Vorgaben des Betreibers
  - Angabe zum Betriebsregime (Netzfahrweise, Winter- und Sommerbetrieb oder reiner Winterbetrieb)
  - Anforderungen an den Hausanschlussraum

- Plombierungen
- Prüfungen und Kontrolle
- Montage und Inbetriebnahme
- Unterhalt, Service und Optimierung
- Beilagen:
  - Vor- und Rücklauftemperaturen (primärseitig) in Funktion der Aussentemperatur
  - Schnittstelle Fernüberwachung

Weitere Hinweise und detailliertere Angaben zu den oben aufgeführten Inhalten der TAV sind im AGFW-Merkblatt FW 515 – Technische Anschlussbedingungen – Heizwasser [221] zu finden.

## 7.6.4 Preisgestaltung und Tarifstruktur

Die Preisgestaltung wird wie erwähnt in einem Tarifblatt oder den sogenannten Tarifbestimmungen festgehalten. Sie nimmt Bezug auf die im Wärmeliefervertrag festgehaltenen Kostenanteile und kann folgendermassen gegliedert sein:

- Vorbemerkung
- Tarifsystem und Preise
- Preisänderungsklausel
- Besondere Anschlussverhältnisse.

Die Aufteilung der Kosten in der Preisgestaltung erfolgt sinnvollerweise in verbrauchsabhängige und verbrauchsunabhängige Kosten. Die Investition in die Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung sowie die Kosten für die Instandhaltung und Wartung sind weitgehend unabhängig vom Verbrauch. Verbrauchsgebundene Kosten sind dagegen zur Deckung des Brennstoff- und Stromverbrauchs zu erheben. Das Tarifsystem und die Preise setzen sich oft aus folgenden drei bis vier Kostenanteilen zusammen:

- **Einmalige Anschlussgebühr** in CHF für den Bau der Hausanschlussleitung und (anteilmässig) Übergabestation als einmaligen Hausanschlusskostenzuschuss des Kunden. Die Zahlung erfolgt meist nach Fertigstellung des Hausanschlusses.
- **Jährlicher Grundpreis** in CHF pro kW abonnierte Anschlussleistung zur Deckung der Fixkosten (verbrauchsunabhängige Kosten). Diese werden in der Regel erst nach der ersten Wärmelieferung fällig.
- **Arbeitspreis** in Rp. pro kWh gelieferte Wärme zur Deckung der variablen Kosten (verbrauchsabhängige Kosten).
- **Messpreis:** Darüber hinaus kann auch ein separat erfasster Messpreis enthalten sein, der die Kosten für die Messeinrichtungen sowie deren Wartung und Eichung abdeckt. Der Anteil des Messpreises an der Gesamthöhe des Tarifes ist in der Regel gering.

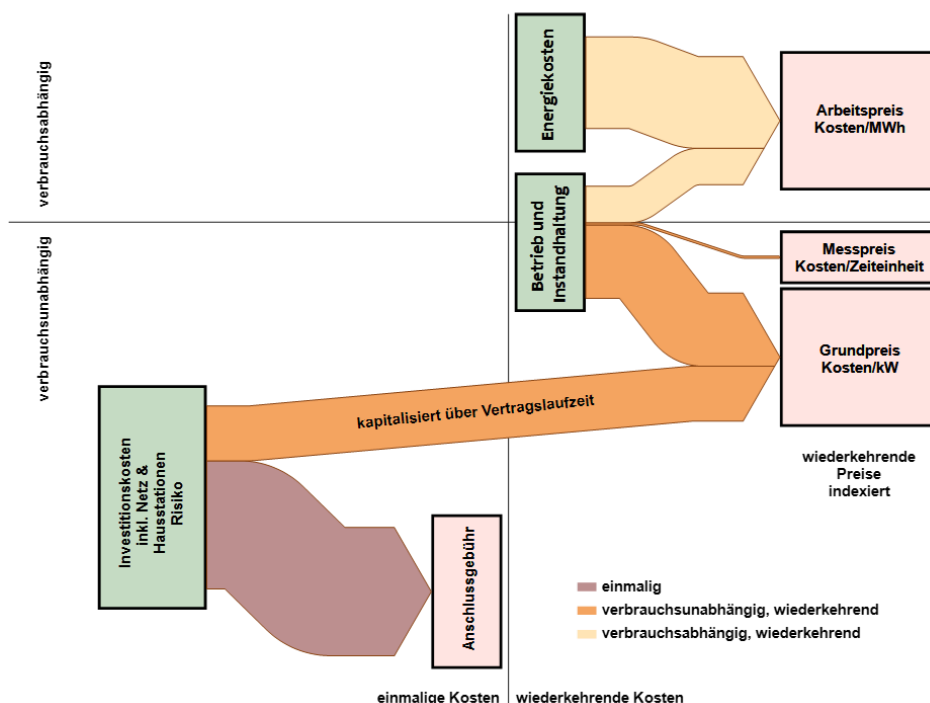


Bild 7.2 Aufteilung der Kosten auf die Tarifstruktur [39].

Im Projekt Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen [28] wurden Betriebsdaten von 52 Fernwärmenetzen in der Schweiz analysiert. Von insgesamt 28 Fernwärmenetzen waren Tarifmodelle zur Verfügung

gestellt worden, die in Tabelle 7.3 gemäss den oben eingeführten Begriffsdefinitionen ausgewertet wurden. Die 28 Tarifmodelle sind wie erwartet strukturiert. Das bedeutet, es wurden keine anderen Kostenanteile bzw.

Kostendefinitionen festgestellt, welche die oben eingeführte Tarifstruktur mit den drei Kostenanteilen ergänzen würden.

Die Zusammensetzung der 28 ausgewerteten Tarifmodelle ist im Bild 7.3 zu sehen. 75 % der Tarifmodelle verwenden alle drei Kostenanteile. 11 % der Tarifmodelle basieren auf einem Arbeitspreis und einer einmaligen Anschlussgebühr während 7 % der Tarifmodelle auf einem Arbeitspreis und einer jährlichen Grundgebühr basieren. Rund 7 % der Tarifmodelle verwenden nur einen Arbeitspreis.

Die Auswertung ist aufgrund der Datenlage nicht repräsentativ aber Tarifmodelle, welche nur einen Arbeitspreis erheben, machen keinen Unterschied zwischen fixen und variablen Kosten. Sie sind insbesondere bei der Deckung der Fixkosten einem erhöhtem Risiko ausgesetzt. Das ist vor allem in folgenden Fällen zu beachten:

- Wenn Kunden geringere Abnahmemengen als geplant aufweisen.
- Wenn bestehende Kunden infolge energetischer Sanierungen danach weniger Wärme benötigen.

In beiden Fällen wird weniger Energie verkauft und schmälert Deckungsbeitrag für die verbrauchsunabhängigen Kosten. Es ist daher wichtig, die Preise im Wärmeliefervertrag in verbrauchsunabhängige und verbrauchsabhängige Kostenanteile aufzuteilen. Das ist auch gut in Bild 7.3 erkennbar, in der die Verteilung der Kosten auf die Tarifstruktur dargestellt ist. Wird zum Beispiel auf eine einmalige Anschlussgebühr verzichtet, so sind die gesamten Investitionskosten inklusive Risikoanteil zu kapitalisieren und in den Grundpreis einzurechnen.

Tabelle 7.3 Auswertung verwendeter Begriffe in der Tarifgestaltung basierend auf dem Projekt Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen (Basis [28], ausgewertet 2020 in [222]).

| Begriffsdefinition        | Alternativ verwendete Begriffe    |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Einmalige Anschlussgebühr | Anschlussgebühr                   |
|                           | Anschlussbeitrag                  |
|                           | Anschlusspauschale                |
|                           | Anschlusskosten                   |
|                           | Pauschalbeitrag                   |
|                           | Baukosten-Beitrag                 |
| Jährlicher Grundpreis     | Grundpreis                        |
|                           | Jahresgrundgebühr                 |
|                           | Jahresgrundpreis                  |
|                           | Jahrespauschale                   |
|                           | Jährliche Grundgebühr             |
| Arbeitspreis              | Arbeitspreis                      |
|                           | Entgelt für bezogene Energiemenge |
|                           | Energiepreis                      |
|                           | Wärmepreis                        |
|                           | Wärmebezugspreis                  |
|                           | Wärmeenergiepreis                 |

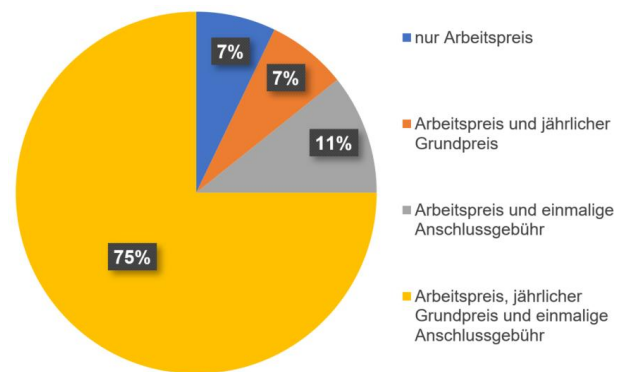


Bild 7.3 Auswertung der Zusammensetzung der 28 Tarifmodelle basierend auf dem Projekt Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen (Basis [28], ausgewertet 2020 in [222]).

### Alternative Tarifmodelle

Je nach Art der Wärmeerzeugung können die Wärmegestehungskosten durch das Temperaturniveau der Wärme erheblich beeinflusst werden. So steigt etwa der Energieverbrauch von Wärmepumpen, WKK-Anlagen und Holzheizwerken mit Abgaskondensation durch höhere Vorlauftemperaturen und noch verstärkt durch hohe Rücklauftemperaturen. Aus diesem Grund ist denkbar, dass auch für das Temperaturniveau verstärkt vertragliche Bedingungen eingeführt werden oder für die Vergütung berücksichtigt werden.

Ein möglicher Ansatz mit einem **«alternativen Tarifmodell»** ist, dass nicht nur die verbrauchte Energie, sondern auch das verbrauchte Volumen oder die mittlere Rücklauftemperatur in einer Verrechnungsperiode berücksichtigt wird. Somit wird ein Anreiz geschaffen, damit Kunden eine effiziente Hausanlage betreiben bzw. im Sanierungsfall entsprechend umbauen.

In [222] wurde die Umsetzbarkeit und die Praxistauglichkeit solcher alternativen Tarifmodelle untersucht. Mit den in der Praxis angewendeten alternativen Tarifmodellen wurden bisher gute Erfahrungen gemacht. Es hat zum Beispiel dazu beigetragen, dass Kunden ihre sekundären Wärmeabgabesysteme (Hauszentrale und Hausanlage) optimal betreiben oder Optimierungsmaßnahmen umsetzen. Die betriebswirtschaftlichen Ergebnisse bestätigten ebenfalls, dass die Umsetzung von alternativen Tarifmodellen den langfristigen wirtschaftlichen Betrieb nicht in Frage stellen. Daher sind alternative Tarifmodelle grundsätzlich zu empfehlen und deren Umsetzbarkeit zu prüfen.

Zudem erarbeitet Thermische Netze Schweiz einen Leitfaden für Betreiber zu Kosten und Tarifen in thermischen Netzen [223], welcher im Verlauf vom Jahr 2026 zur Verfügung stehen soll.

### 7.6.5 Preisänderungsklausel

Preisänderungsmöglichkeiten umfassen eine Preisänderungsklausel, die öffentliche Bekanntmachung und die Festpreisregelung. Nachfolgend wird nur auf die Preisänderungsklausel eingegangen, da diese in der Praxis am weitesten verbreitet ist und die beiden anderen Möglichkeiten gemäss [224] ungeeignet sind.

Die grundlegende Ausgestaltung einer automatischen Preisänderungsklausel ist unter §24 Abs.4 AVBFernwärmeV beschrieben [220]. Automatische Preisänderungsklauseln haben den Vorteil, dass Sie über viele Jahre hinweg die Kostenentwicklung bei den Gesteuungskosten nachbilden können. Allerdings ist die Konzeption von Preisänderungsklauseln sowohl in kalkulatorischer als auch in rechtlicher Hinsicht anspruchsvoll. Der Wärmelieferant muss dabei seine Investitions- und Refinanzierungskosten und auch die Kosten für die laufende Wärmbereitstellung berücksichtigen, was bei Vertragslaufzeiten von oft 10 Jahren und mehr anspruchsvoll ist (vgl. [224]).

In der Praxis erfolgt die Preisanpassung oft durch Indizes der eingesetzten Energieträger (z. B. Energieholz, Gas, etc.) und den Landesindex der Konsumentenpreise (LIK). Eine Preisänderungsklausel wird in der Regel auf den jährlichen Grundpreis und auf den Arbeitspreis angewendet. Die folgende Formel beschreibt das Beispiel einer Preisänderungsklausel für den Arbeitspreis eines thermischen Netzes mit den Energieträgern Holz (85%) und Gas (15%) und einer Gewichtung der Konsumentenpreise mit 20%:

$$\text{Arbeitspreis}_{\text{neu}} = 0.8 \left( 0.85 \frac{\text{IndexHolz}_{\text{neu}}}{\text{IndexHolz}_{\text{alt}}} + 0.15 \frac{\text{IndexGas}_{\text{neu}}}{\text{IndexGas}_{\text{alt}}} \right) + 0.2 \frac{\text{LIK}_{\text{neu}}}{\text{LIK}_{\text{alt}}}$$

Empfehlungen und Beispiele für Preisänderungsklauseln sind vielfältig. Hilfreiche Hinweise dazu geben ein Merkblatt von C.A.R.M.E.N.e.V. [225] und Dokumente der AGFW ([226], [227]).

## 7.7 Dokumentation

Eine saubere, nachgeführte und aktualisierte Finanzbuchhaltung, Dokumentation aller getätigten Investitionen und Abschreibungen sowie Abschreibungsdauern sind insbesondere bei der langen Nutzungsdauer und den damit verbundenen Personalwechseln sehr wichtig. Können Ausgaben in der Vergangenheit nicht mehr nachvollzogen werden, ist es schwierig gegenüber den Kunden, Aktionären, Banken, Gemeinden oder dem Preisüberwacher weitere Investitionen oder etwaige Tarifanpassungen zu rechtfertigen, wenn diese auch Kostendefizite aus der Erstellungsphase decken müssen.

## 8 Optimierung

Die Optimierung oder Betriebsoptimierung eines thermischen Netzes zielt darauf ab, die Effizienz, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit des Betriebs zu steigern. Sie umfasst somit sehr viele betriebliche Aspekte. Ein wichtiges Kriterium ist jedoch auch, und sollte nie vergessen gehen, dass die Behaglichkeitsanforderungen der Kunden zu jeder Zeit erfüllt werden. Als Gedankenbeispiel: Die Betriebsoptimierung einer Heizungsanlage oder Übergabestation zielt nicht per se darauf ab, die Raumtemperaturen zu reduzieren, sondern die erforderlichen Raumtemperaturen möglichst effizient zu erreichen.

Übliche Ziele einer Betriebsoptimierung eines thermischen Netzes sind:

- Senkung der Betriebskosten
- Erhöhung der Kundenzufriedenheit
- Energieeffizienz steigern
- Dekarbonisierung
- Reduktion von Emissionen
- Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien
- Erhöhung der Wertschöpfung.

Es gilt aber auch zu bedenken, je komplexer ein thermisches Netz ist, wie zum Beispiel die Anzahl der Wärmezentralen, Anzahl unterschiedlicher Energieträger(-preise), Anzahl Kunden mit eventuell unterschiedlichen Tarifmodellen und so weiter, nehmen die möglichen Betriebszustände exponentiell zu und umso mehr Messpunkte sind notwendig. Entsprechend werden in diesen Fällen moderne **digitale Werkzeuge** immer wichtiger, welche alle wichtigen Parameter in Echtzeit erfassen können und entsprechendes Fachpersonal für eine effiziente Umsetzung. Im Leitfaden zur Digitalisierung thermischer Netze [228] hat die IEA-DHC 2024 einen guten facettenreichen Überblick mit vielen Beispielen erarbeitet.

Nachfolgend werden folgende **Ansätze zur Betriebsoptimierung** in thermischen Netzen beschrieben:

- Wärmezentralen
- Übergangslösungen
- Mess- und Regelungstechnik
- Monitoring
- Temperaturanpassungen in best. Netzen
- Niedertemperatur-Kompatibilität
- Subnetze oder Inselösungen
- Anreiztarife für tiefe Rücklauftemperaturen
- Kundenseitige Optimierung
- Aktives Lastmanagement
- Digitaler Zwilling
- Dreileiter-Anschluss
- Einsatz thermischer Energiespeicher
- Güte der Kundenanlagen – Tiefe Rücklauftemperaturen

### 8.1 Wärmezentralen

Die Wärmezentralen sind das energetische Herz eines thermischen Netzes. Eine sorgfältige Planung, Auslegung, Betrieb und Betriebsoptimierung tragen wesentlich zur Gesamteffizienz und Wirtschaftlichkeit des Systems bei. Bereits mit einfachen Massnahmen lassen sich deutliche Effizienzsteigerungen und Betriebskostensenkungen erzielen.

#### 1. Effizienzorientierte Anlagenkonzeption:

- Bedarfsgerechte Dimensionierung: Überdimensionierte Wärmeerzeuger führen zu hohen Stillstandsverlusten und ineffizientem Teillastbetrieb. Eine präzise Lastganganalyse und allenfalls ein modularer Aufbau der Erzeuger (z. B. Kaskadenschaltung mehrerer kleiner Kessel oder Wärmepumpen) ermöglichen eine anpassungsfähige und effiziente Betriebsweise.
- Etappierter Ausbau: Bei erwarteter Netzerweiterung sollte die Wärmeversorgung modular erweiterbar sein. So lassen sich Investitionskosten staffeln und Effizienzverluste durch überdimensionierte Anlagenteile vermeiden.

#### 2. Pumpen und Hydraulik

- Einsatz modernster Pumpentechnologien: Hoch-effizienzpumpen mit drehzahlgeregelten EC-Motoren und Differenzdruckregelung passen die Förderleistung exakt an den momentanen Bedarf an und senken den Stromverbrauch erheblich.
- Hydraulische Optimierung: Geringe Druckverluste im Verteilnetz und in den Anlagenteilen in der Zentrale reduzieren den Pumpenstrom. Dies lässt sich durch sorgfältige Rohrleitungsführung, grosszügig dimensionierte Armaturen und den Verzicht auf unnötige Umlenkungen erreichen.
- Hydraulischer Abgleich: Eine mengenvariable Auslegung aller Kreise vermeidet unnötige Volumenström.

#### 3. Wärmedämmung und Verlustminimierung

- Lückenlose Wärmedämmung aller Rohrleitungen, Armaturen und Speicherflächen ist essenziell. Selbst kleine ungedämmte Flächen können erhebliche Wärmeverluste verursachen.
- Isolierung kritischer Bauteile wie Flanschverbindungen, Pumpengehäuse und Messstrecken wird oft vernachlässigt, bietet aber ein günstiges Einsparpotenzial und sind gemäss MuKEN [38] durchgehend zu dämmen.
- Minimierung von Standby- und Bereitschaftsverlusten bei Kesseln und Speicher durch optimierte Regelstrategie.

#### 4. Abwärmenutzung

- Wärmerückgewinnung aus Abgasen oder Abluft kann die Systemeffizienz deutlich erhöhen. Bei entsprechend guten Randbedingungen mit tiefen Rücklauftemperaturen sind Abgaswärmetauscher oder Kondensationswärmetauscher bei modernen Kesseln heute Stand der Technik.

- Nutzung interner Abwärmequellen (z. B. Kühlanlagen, Kompressoren, Schaltschränke) kann über einfache Wärmetauscherlösungen in das Heizsystem integriert werden.
- Rücklaufnutzung: Eine optimale Temperaturschichtung in thermischen Energiespeichern ermöglicht die Nutzung niedriger Rücklauftemperaturen, insbesondere in Verbindung mit Wärmepumpen oder solarthermischen Einbindungen.

## 5. Regelung und Betriebsführung

- Optimierte Regelstrategien reduzieren Taktverluste und verbessern die Jahresnutzungsgrade.
- Monitoring und Datenanalyse: Durch kontinuierliche Überwachung zentraler Betriebsparameter (Temperaturen, Volumenströme, Energieverbräuche) lassen sich Fehlfunktionen oder ungünstige Betriebszustände frühzeitig erkennen.
- Lastmanagement: Eine zeitliche Verschiebung von Wärmeerzeugung oder -abnahme kann Spitzenlasten glätten und die Wirtschaftlichkeit verbessern, wird im Kapitel 8.10 vertieft.

## 6. Nachhaltige Weiterentwicklung

- Integration erneuerbarer Wärmequellen und Energieträger (Solarthermie, Wärmepumpen, Biomasse) kann schrittweise erfolgen, wenn die thermischen, hydraulischen und regelungstechnischen Voraussetzungen geschaffen sind.
- Vorbereitung auf künftige Netzerweiterungen durch ausreichend dimensionierte Übergabepunkte und flexible Steuerungssysteme.

### Fazit:

Optimierungen in Wärmezentralen sind meist keine Grossinvestitionen, sondern das Ergebnis einer durchdachten und langfristigen Betrachtung in der Planung sowie im Betrieb.

## 8.2 Übergangslösungen

Es ist wichtig, potenzielle Kunden früh in den Prozess (Planung und Betrieb) einzubinden. Bei der Sanie-

rung/Erneuerung der bestehenden Heizung oder Kühlung sind potenzielle Kunden frühzeitig über die Möglichkeit eines Anschlusses an ein thermisches Netz zu informieren und es sind geeignete temporäre Wärme oder Kälteversorgungslösungen, sogenannte Übergangslösungen, anzubieten. Somit ist der Betreiber des thermischen Netzes konkurrenzfähig zu relativ schnell umsetzbaren individuellen (dezentralen) Lösungen und kann die Zeit überbrücken, bis das thermische Netz den Kunden zur Verfügung steht (siehe Bild 8.1).

Eine Übergangslösung ist daher nicht nur als technische Einrichtung zur Wärme- und Kälteversorgung zu sehen, sondern ist für den Kunden auch als eine Art Versorgungssicherheit zu betrachten. Diese frühzeitige Kundenbindung ist auch eine wirtschaftliche Notwendigkeit aus Sicht des Betreibers, weil es die zukünftige Anschlussdichte im Netz gewährleistet.

Konkret kann sich eine Übergangslösung an eine Einzelperson (für ein Gebäude), ein Areal mit mehreren Gebäuden oder ein ganzes «Stadtviertel» richten. Da es sich um eine vorübergehende Lösung handelt, in manchen Fällen auch fossile Energieträger zum Einsatz kommen, ist eine frühzeitige Planung zwingend notwendig (Bewilligungen, Installationszeiten, Bedingungen vor Ort etc.). Idealerweise wird diese Möglichkeit bereits im kommunalen Bebauungsplan vorgesehen.

Der im Projekt RES-DHC erarbeitete Leitfaden zu Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze [229] zeigt die Möglichkeiten von Übergangslösungen aus technischer, wirtschaftlicher, betrieblicher und rechtlicher Sicht auf. Die aufgearbeiteten Informationen sollen eine optimale Planung und eine gute Umsetzung unterstützen und dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit und den Ausbau thermischer Netze zu verbessern.

Im Bild 8.2 ist eine Übersicht und Kurzbeschreibung zu möglichen Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze zu sehen, welche im Leitfaden detailliert beschrieben sind. Weiter wurden im Rahmen des Projektes eine Übersicht zu Angeboten mobiler Energiezentralen (Heizen und Kühlen) [230] erstellt.

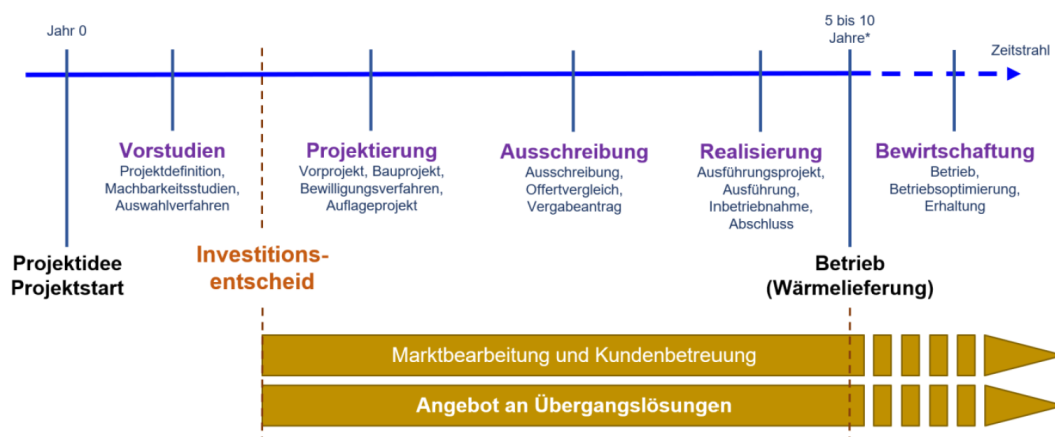


Bild 8.1 Zeitliche Einordnung des Angebots an Übergangslösungen im Planungs- und Betriebsablauf eines thermischen Netzes [229].

\* Schätzung, je nach Situation auch kürzer oder länger.

| Typ                           | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Aufwand          | Komplexität        | Dauer                   |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| <b>Erhalt der Anlage</b>      | Erhalt der bestehenden Energieerzeugungsanlage durch Wartung, Unterhalt und Instandsetzung bis die Versorgung durch das thermische Netz gewährleistet ist.                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Tief             | Einfach            | Kurz- bis mittelfristig |
| <b>Ersatz der Anlage</b>      | Ersatz der bestehenden Energieerzeugungsanlage durch eine adäquate Lösung ohne grössere bauliche Massnahmen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Tief bis Mittel  | Einfach bis Mittel | Kurz- bis mittelfristig |
| <b>Mobile Energiezentrale</b> | Mobile Energiezentrale für Heizung, Kühlung und Warmwasseraufbereitung.<br>Kommt in Frage, wenn die bestehende Energieerzeugungsanlage aus wirtschaftlichen oder betrieblichen Gründen weder erhalten noch ersetzt werden kann.<br>Weitere Informationen zu mobilen Energiezentralen sind in einem separaten Dokument zusammengestellt.                                                                                                     | Mittel bis Gross | Mittel bis Hoch    | Kurz- bis mittelfristig |
| <b>Gemeinschaftslösung</b>    | Grössere Energiezentrale als Übergangslösung für mehrere Gebäude, Areale, Quartiere oder auch für Grosskunden.<br>Bei Zeithorizonten von 10 Jahren und mehr sind auch WKK-Anlagen denkbar.<br>Sobald die Erschliessung mit dem thermischen Netz erstellt ist, kann diese Energiezentrale zum Beispiel als Spitzenlast- oder Notversorgung betrieben werden oder sie wird durch eine Hauptübergabestation ersetzt und komplett zurückgebaut. | Gross            | Hoch               | Mittel- bis langfristig |

Bild 8.2 Übersicht und Kurzbeschreibung zu Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze (Abbildung aus [231]).

### 8.3 Mess- und Regelungstechnik

Im Kapitel 0 wird eine Optimierungsmassnahme zur Beurteilung der Güte der Wärmeübertragung bei den Kunden vorgestellt, die mit nur wenigen Betriebsdaten auskommt. In der Regel erfordern die meisten Optimierungsansätze jedoch eine präzisere und umfassendere Erfassung von Betriebsdaten.

Das Planungshandbuch QM Holzheizwerke [39] beschreibt ausführlich die erforderliche Mess- und Regelungstechnik für Wärmenetze mit Holzfeuerungsanlagen. Diese Empfehlungen lassen sich weitgehend auf andere Formen der Wärme- oder Kälteerzeugung übertragen. Ergänzend dazu behandelt der Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [185] die nötige Mess- und Regelungstechnik speziell für Übergabestationen.

Entscheidend ist, dass die Betriebsoptimierung bereits in der Projektierungs- und Planungsphase mitgedacht wird. Dabei ist ein prozessorientiertes Vorgehen zentral: Es soll frühzeitig definiert werden, welche Betriebs-szenarien optimiert werden sollen, welche Mess- beziehungsweise Betriebsdaten dafür benötigt werden und wie diese erhoben werden können. Die entsprechende Messtechnik und Schnittstellen müssen im Projekt von Anfang an vorgesehen und umgesetzt werden.

Zusätzlich ist ein System zur Visualisierung der Betriebsdaten empfehlenswert. Es sollte ermöglichen, mehrere Betriebsparameter gleichzeitig über unterschiedliche Zeiträume hinweg darzustellen.

### 8.4 Monitoring

Auch die besten Betriebsdaten allein führen nicht automatisch zu einem optimalen Anlagenbetrieb. Entscheidend ist, dass die verfügbaren Daten regelmässig, zielgerichtet und systematisch ausgewertet und überprüft werden.

Moderne Systeme ermöglichen eine automatisierte Analyse der Betriebsdaten. Abweichungen von definierten Sollwerten können erkannt und aktiv gemeldet werden. So kann beispielsweise in einer Energiezentrale die Rücklauftemperatur gemessen und mit vergleichbaren Betriebsperioden verglichen werden. Wird dabei eine unzulässige Abweichung oder ein sich verschlechternder Trend festgestellt, kann das Betriebspersonal umgehend informiert werden. Auf diese Weise lassen sich suboptimale Betriebszustände frühzeitig erkennen und geeignete Korrekturmassnahmen einleiten.

Wie bereits erwähnt, ist ein prozessorientiertes Vorgehen zentral für eine erfolgreiche Betriebsoptimierung. Bereits in der Planungsphase sollte definiert werden:

- Welche Betriebszustände analysiert werden sollen.
- Welche Mess- bzw. Betriebsdaten dafür erforderlich sind.
- Wie diese Daten erhoben, verarbeitet und dargestellt werden können.
- Welche konkreten Handlungen bei Abweichungen ausgelöst werden müssen.

Ein hypothetisches Beispiel: Bei thermischen Netzen könnte eine automatisierte Mehrverbrauchsanalyse nach Kapitel 0 implementiert werden. Ein plötzlicher Anstieg des Mehrverbrauchs könnte auf einen Defekt wie ein fehlerhaftes Primärreguliertventil hinweisen. Eine langsame Zunahme hingegen könnte auf einen verschmutzten Wärmeübertrager deuten. In jedem Fall sollte eine Detektion eine vordefinierte Reaktion auslö-

sen – idealerweise im Rahmen eines klar strukturierten Prozesses mit eindeutigen Handlungsanweisungen.

## 8.5 Temperaturanpassungen in bestehenden Netzen

Wie in Kapitel 1.1 und 3.1 beschrieben, weisen bestehende thermische Netze aus historischen Gründen häufig hohe Betriebstemperaturen auf. Hohe Vorlauftemperaturen – etwa aus Hochtemperatur-Abwärme (z. B. Kehrlichtverwertungsanlagen) oder aus fossilen Wärmeerzeugern – stellten in der Vergangenheit kein Problem dar. Auch hohe Rücklauftemperaturen waren beim Auf- und Ausbau der Netze lange Zeit unkritisch.

Um jedoch vermehrt Abwärme aus Niedertemperaturquellen, Umweltwärme oder erneuerbare Energieträger effizient in bestehende Netze integrieren zu können, müssen die Vorlauftemperaturen systematisch reduziert werden. Damit die Versorgungssicherheit für alle bestehenden Kundinnen und Kunden gewährleistet bleibt, sollte in der Regel auch die Rücklauftemperatur mindestens im gleichen Umfang gesenkt werden. Dies ist jedoch weitaus herausfordernder und deutlich weniger einfach umzusetzen als die Absenkung der Vorlauftemperatur, wie dies im Kapitel 0 vertieft wird.

Die Erhaltung der Temperaturspreizung in einem bestehenden thermischen Verteilnetz ist jedoch entscheidend für die Aufrechterhaltung des erforderlichen Temperaturgefälles und damit der möglichen Übertragungsleistung. Abhängig von der Dimensionierung der Leitungen kann die Vorlauftemperatur deshalb nur in begrenztem Umfang gesenkt werden, ohne dass das Netz hydraulisch überlastet wird. Dabei sind insbesondere Systemdruckgrenzen, die Druckstufe des ungünstigsten Bauteils sowie empfohlene spezifische Druckverluste zu berücksichtigen.

Ein erster Schritt besteht darin, den effektiven Temperaturbedarf der angeschlossenen Kunden zu überprüfen. Die meisten heutigen Wärmeabgabesysteme funktionieren mit niedrigen Vorlauftemperaturen, oft unter 60 °C. Zu berücksichtigen sind dabei Anlagen zur Brauchwarmwasserbereitung und Zirkulationssysteme, die in der Regel auf eine Vorlauftemperatur von mindestens 60 °C angewiesen sind. Wird das Wärmeabgabesystem saniert, kann die Vorlauftemperatur in vielen Fällen gesenkt werden. Eine Herausforderung dabei ist, dass das Wärmeabgabesystem und Warmwasserbereitungsanlagen sich in der Regel im Eigentum der Kundschaft befindet – was die Anpassung erschweren kann. Zudem sollte die Auslegung der Übergabestation überprüft werden, da diese ursprünglich für hohe Vorlauftemperaturen ausgelegt wurden. Infolge dessen sind vielfach die Wärmeübertrager und teilweise weitere Komponenten zu ersetzen. Je nach Alter der Anlage, sollte eine Erneuerung in Betracht gezogen werden.

Die folgenden acht Punkte beschreiben Massnahmen zur Senkung der Vor- und Rücklauftemperaturen in thermischen Netzen [232]. Der Fokus liegt auf rechtlichen, institutionellen und technischen Massnahmen,

insbesondere auf der Gebäudeseite. Ziel ist eine effizientere Nutzung von Wärme, die Reduktion von Wärmeverteilungsverlusten sowie die Verbesserung der Integration erneuerbarer Energien.

1. Einführung einer **Bauverordnung für Niedertemperatur-Kompatibilität**: Neue und umfassend sanierte Gebäude sollen so geplant und ausgeführt werden, dass sie technisch auf den Betrieb mit Niedertemperatur-Fernwärme vorbereitet sind. Dies kann beispielsweise durch geeignete Auslegung von Heizflächen, hydraulische Systeme und Regelungstechnik sichergestellt werden.
2. Einführung von **Anreiztarifen** für tiefe Rücklauftemperaturen: Kunden sollen durch variable Tarifmodelle motiviert werden, ihre Anlagen auf tiefe Rücklauftemperaturen zu optimieren. Ziel ist eine hohe Effizienz des Gesamtsystems.
3. Investitionen in **intelligente Wärmezähler** (smart Meter): Moderne intelligente Wärmezähler ermöglichen ein detailliertes Energiemanagement, verbessern die Transparenz für Kundinnen und Kunden und sind Voraussetzung für dynamische Tarife. Sie fördern die Kommunikation zwischen Versorger und Kunden.
4. **Verlagerung des Übergabepunkts** auf die Sekundärseite: Durch die Verlagerung des Übergabepunkts auf die Sekundärseite übernimmt das Versorgungsunternehmen auch die Verantwortung für den Betrieb und Unterhalt der Übergabestation. Gleichzeitig erhält das Unternehmen direkten Zugriff auf relevante Betriebsdaten, was eine schnelle Fehlererkennung und gezielte Optimierung ermöglicht.
5. **Verbesserung der Gebäudehülle und Heizflächen**: Die Modernisierung von Fenster, Dach und Fassade reduziert den spezifischen Wärmebedarf deutlich. Dadurch sinken die erforderlichen Vorlauftemperaturen, was den Betrieb mit Niedertemperatur-Fernwärme erleichtert. Ebenfalls auf Gebäudeseite ist die Vergrößerung der Heizflächen in Betracht zu ziehen, dadurch resultieren tiefere Soll-Vorlauftemperaturen.
6. **Lokale Temperaturerhöhung** bei Spezialverbrauchern: Einzelne Verbraucher mit besonders hohem Temperaturbedarf (zum Beispiel Industrieanlagen oder Spitäler) können durch dezentrale Wärmeerzeugung wie zum Beispiel zusätzlicher Kessel oder Booster-Wärmepumpen lokal versorgt werden. So kann die Netztemperatur gesenkt werden, ohne den Anforderungen dieser Sonderfälle zu widersprechen. Dies trifft im Grundsatz auch auf die Warmwassererwärmung zu.
7. **Nutzung der Rücklauftemperatur** für Niedertemperaturverbraucher: Durch den Anschluss von Niedertemperaturverbrauchern an die Rücklaufleitung, zum Beispiel über ein Dreileiter-Anschluss, kann überschüssige Wärme aus dem Rücklauf sinnvoll weitergenutzt werden. Dies trägt zur Senkung der durchschnittlichen Rücklauftemperatur im Netz bei.
8. **Temporäre Erhöhung der Vorlauftemperatur** bei Bedarf: In kurzen Spitzenzeiten im Winter kann eine lokale Erhöhung der Vorlauftemperatur aus Niedertemperatur-Wärmequellen sinnvoll sein, um

Leistungsspitzen zu decken. Dies soll nur während den kältesten Winterstunden eine Option sein, um unnötige Investitionen in die Vergrößerung der Leitungsquerschnitte zu vermeiden. Diese Massnahme kann ganz allgemein bei Spitzenlasten in Betracht gezogen werden, solange die Auslegtemperaturen nicht oder nur ganz kurzfristig überschritten werden. Beim Ausreizen der Auslege- oder maximalen Betriebstemperatur ist jedoch der Einfluss auf die Langlebigkeit der Komponenten zu berücksichtigen, insbesondere ist dies bei PMR Leitungen der Fall (siehe auch [233]). Eine zeitweise Erhöhung der Vorlauftemperatur für Warmwassererwärmung ist ebenfalls eine Möglichkeit in Form von gestaffelten Zwangsladungen oder Ladefenster Lastspitzen zu vermeiden.

In den nachfolgenden Kapitel wird vertieft auf einzelne Themen eingegangen und weitere Aspekte ergänzt.

## 8.6 Niedertemperatur-Kompatibilität

Wenn in einem bestehenden thermischen Netz zukünftig das Temperaturniveau reduziert werden soll, sind Anlagen neuer Kunden bereits so zu konstruieren, dass diese mit den «neuen» Betriebsbedingungen optimal funktionieren. Dafür müssen oft die entsprechenden TAV/TAB angepasst werden. Der Hauptfokus sollte dabei auf der Auslegung und Hydraulik der Übergabestation liegen. Die Übergabestation sollte so dimensioniert werden, dass die Temperaturbedürfnisse der Sekundärseite mit einer möglichst tiefen Netz-Vorlauftemperatur erfüllt werden können. Wenn möglich sollte die Brauchwarmwasseraufbereitung primärseitig eingebunden werden, womit die Exergieverluste möglichst gering ausfallen (siehe dazu Kapitel 5.5.3).

## 8.7 Subnetze oder Insellösungen

In bestimmten Fällen, wie zum Beispiel beim Anschluss neuer Areale bis zu grösseren Gebieten, kann die Schaffung eines lokalen Mikronetzes oder eines sogenannten **Subnetzes**, welches an das Hauptnetz angeschlossen ist, eine geeignete Lösung sein. Das Subnetz wird dabei in der Regel mit tieferen Temperaturen betrieben. Je nach Situation am Einspeisepunkt ins Hauptnetz und den Temperaturanforderungen des Subnetzes ist sogar ein Dreileiteranschluss möglich (hauptsächliche Versorgung aus dem Rücklauf). Weitere Informationen dazu im Kapitel 0.

Ausserdem kann der schnelle Aufbau eines lokalen (temporären) Netzes dazu führen, dass Kunden schneller angeschlossen werden können, auch wenn der Anschluss ans Hauptnetz erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Teilweise werden diese **Insellösungen** anfangs mit fossilen Energien betrieben bis sie ans Hauptnetz angeschlossen werden. Es kann aber eine sehr gute Gelegenheit sein, lokale Energiequellen zu integrieren und gleich ein effizientes Subnetz zu erstellen.

In der Stadt Bern sind einige Stadtteile ans Hauptnetz ( $> 140^{\circ}\text{C}$ ) angeschlossen, welche eine viel geringere Vorlauftemperatur aufweisen ( $85^{\circ}\text{C}$ ). In Graz, Österreich, ist das Quartier Berliner Ring an ein lokales Netz angeschlossen, welches mit knapp 1000 MWh/a Solarenergie von den Dächern versorgt wird, während der Rest der Wärme aus dem Hauptnetz von Graz bezogen wird. Dieses Subnetz arbeitet mit Rücklauftemperaturen von 30 bis  $35^{\circ}\text{C}$ , während das Hauptnetz mit deutlich höheren Temperaturen arbeitet. Dasselbe gilt für das Wärmenetz in Crailsheim in Deutschland, wo ein besonderes Augenmerk auf die Qualität der Gebäudeinstallationen gelegt wurde, wodurch eine Rücklauftemperatur von  $40^{\circ}\text{C}$  erreicht wird [51].

## 8.8 Anreiztarife für tiefe Rücklauftemperaturen

Wie in [28] beschrieben, liegen die Gründe für erhöhte Rücklauftemperaturen zu 90% auf der Sekundärseite, etwa 60% entfallen dabei auf die sekundärseitige Wärmeverteilung und rund 30% auf das Brauchwarmwassersystem. Lediglich etwa 10% der Gründe sind primärseitige Mängel, welcher der Betreiber im Griff haben muss.

Da die relevanten Anlagenteile für tiefe Rücklauftemperaturen sich meistens im Besitz der Kunden befinden, haben diese auf den ersten Blick keinen direkten Benefit, wenn er seine Anlage erneuert und mithilfe das primärseitige Netz mit tiefen Rücklauftemperaturen zu optimieren. Denn ohne eine umfassende energetische Sanierung des Gebäudes oder des Prozesses, hat der Kunde in der Regel denselben Energie- und Leistungsbedarf wie vorher.

Ein Anreiz zur Verbesserung könnten dabei Rücklauftemperaturabhängige Tarifsysteme bieten, die ja nach Ausführung einen günstigeren oder einen teureren Wärmetarif berücksichtigen. Über die Möglichkeit und praktische Ausführung solcher Anreizsysteme wurde in [222] berichtet. Grundsätzlich empfehlen wir eine positive Herangehensweise mit einem belohnenden statt mit einem bestrafenden Anreizsystem. Weiter ist davon auszugehen, dass die allermeisten «schlechten» Wärmekunden (Wärmekunden mit hohen Rücklauftemperaturen) gar nicht wissen, dass ihre Anlage einen negativen Einfluss auf das Gesamtsystem hat. Eine niederschwellige und weitere Möglichkeit wäre daher, den Kunden mit konsequenter Anwendung der Mehrverbrauchsanalyse nach Kapitel 0 im Sinne eines Benchmarkings aufzuzeigen, wie Ihre Anlage im Vergleich zu anderen Kunden im Verbund funktionieren. In Zusammenhang mit Rücklauftemperaturabhängigen Tarifsystemen, ist davon auszugehen, dass die Handlungsbereitschaft der Kunden dadurch steigt.

## 8.9 Kundenseitige Optimierung

Durch energetische **Sanierung der Gebäudehüllen** (Fenster, Dach, Fassade etc.) oder der **Prozesse** sinkt der spezifische Energie- und Leistungsbedarf der entsprechenden Kunden, was sich auch auf die Vollkosten bei einem Anschluss an ein thermisches Netz auswirkt. Häufig wird dabei das Wärmeabgabesystem erneuert, hierbei sollte konsequent auf Niedertemperatursysteme gesetzt werden. Dies begünstigt den Einsatz erneuerbarer Energieträger und ermöglicht den Einsatz von Dreileiteranschlüssen (Kapitel 0).

Auch wenn das bisherige Wärmeabgabesystem bestehen bleibt, führen Sanierungen der Gebäudehüllen oder der Prozesse zu tieferem Energie- und Leistungsbedarf. Vielfach kann dadurch die sekundärseitige Vorlauftemperatur reduziert werden. Dabei ist bei bestehenden Kunden eines thermischen Netzes zu überprüfen, ob die Übergabestation noch zu den neuen Anforderungen passt. Im Idealfall wird auch die Wärmeübergabestation auf die neuen Bedingungen angepasst, sie dazu Kapitel 8.6.

Auf Gebäudeseite ist auch die Vergrößerung der Heizflächen in Betracht zu ziehen, dadurch resultieren ebenfalls tiefere Soll-Vorlauftemperaturen.

Ein weiterer Optimierungsansatz, ohne Eingriff in die Gebäudehülle, ist das **Spitzenlastmanagement direkt beim Kunden**. Dabei wird das Ziel verfolgt, der kundenseitige Wärme- und Leistungsbedarf ohne Komforteinbusse zu optimieren. In **Gewerbe- und Wohnbauten** wird dabei vor allem die bestehende Heizungsregulierung auf Basis von Wetterprognosedaten und Innenraumtemperaturen optimiert. Gemäss [234] führt dieser Ansatz in der Praxis zu deutlichen Leistungs- und Energieeinsparungen und es sind Heizkosteneinsparungen von 15 bis 20% möglich. In der **Industrie und bei Prozessen** hat sich die **Prozessintegration** als Lösungsansatz etabliert. Dabei werden mittels **Pinch-Analyse** alle Energieströme einer Unternehmung erfasst und anschliessend intelligent miteinander verknüpft [235]. So kann die Wärme von abzukühlenden Stoffströmen dazu verwendet werden, um andere Stoffströme zu erwärmen. Die Erfahrung zeigt, dass die Optimierung durch Verknüpfen von Energieströmen im Gesamtsystem meist eine höhere Effizienzsteigerung ermöglicht als die oft kostspielige Verbesserung der Wirkungsgrade einzelner Komponenten und Apparate. Mit dem Resultat einer optimalen Wärmeübertrager-Konstellation lassen sich der zusätzliche Energieeinsatz reduzieren und vielfach auch die Versorgung aus einem thermischen Netz ermöglichen, auch auf tiefem Temperaturniveau. Je nach Situation bietet die Pinch-Analyse die Möglichkeit Abwärme aus Prozessen optimal für ein thermisches Netz nutzbar zu machen.

## 8.10 Aktives Lastmanagement

Bei einem aktiven Lastmanagement werden folgende Ziele verfolgt:

- Den Leistungsbedarf der Kunden in Echtzeit managen und optimieren (siehe Kapitel 8.9).
- Den zukünftigen Leistungsbedarf der Kunden antizipieren.
- Die Wärme- oder Kälteproduktion möglichst effizient und mit optimalen Energiemix gestalten.

Mit einem guten Monitoring-System (Kapitel 8.4) sind periodische Lastspitzen, Kundenverhalten und der Einfluss auf die Wärmeerzeugung gut erkennbar. Zum Beispiel sollten kundenseitige Lastspitzen so verteilt und/oder verzögert werden, dass der Bedarf mit einer erneuerbaren Energiequelle in Kombination mit Energiespeicher abgedeckt werden kann und der Einsatz eines fossil betriebenen Spitzenlastkessel nicht erforderlich wird. Dies betrifft vielfach Warmwasserladungen bei den Kunden, welche je nach Situation mittels zeitlich parametrisierten oder zentral koordinierten Zwangsladungen optimiert werden können.

Auch die Gebäudeträgheit ist je nach Gebäudemasse und Wärmeabgabesystem ohne Komforteinbusse nutzbar und sollte entsprechend berücksichtigt werden. Bei Gebäude welche eine schwere Bauweise haben und Gebäude mit trägen Verteilsystemen (Fussbodenheizung) können sogar Phasen im Stundenbereich mit reduzierter Wärmeversorgung beheizt werden, ohne den Komfort der Nutzer merkbar einzuschränken.

Alternativ können direkt bei den Wärmekunden Wärmespeicher eingesetzt und zum Lastmanagement verwendet werden. In Phasen, in welchen der Kunde nicht die maximale Leistung erfordert, kann so der Wärmespeicher geladen und zur Spitzenlastdeckung verwendet werden. Derselbe Ansatz kann im grösseren Massstab auch in der Energiezentrale umgesetzt werden. Beispielhaft kann der Wärmespeicher in der Energiezentrale so dimensioniert werden, dass der Speicher in Phasen mit tiefem Bedarf geladen wird (zum Beispiel in den Nachtstunden), um die in vielen thermischen Netzen auftretende morgendliche Aufheizspitze zu brechen. Je nach Art der Wärmeerzeugung ist auch eine erhöhte Ladetemperatur prüfenswert. Mit einer höheren Ladetemperatur kann die Temperaturspreizung über den Speicher vergrössert und damit die Speicherkapazität erhöht werden (weitere Informationen und Möglichkeiten dazu in den Kapitel 2.6.5.9 und 0).

Aus den Betriebsdaten der Kunden und vorausschauenden Klimamodellen können entsprechende Bedarfsprognosen in Form von Algorithmen abgeleitet werden, welche direkt auf die optimale Produktionsplanung einfließen. Der Einsatz der Wärmeerzeuger sowie der Speicher (zentral oder im Netz selbst) kann so optimiert werden. Es gibt verschiedene Ansätze und Praxisbeispiele in diese Richtung.

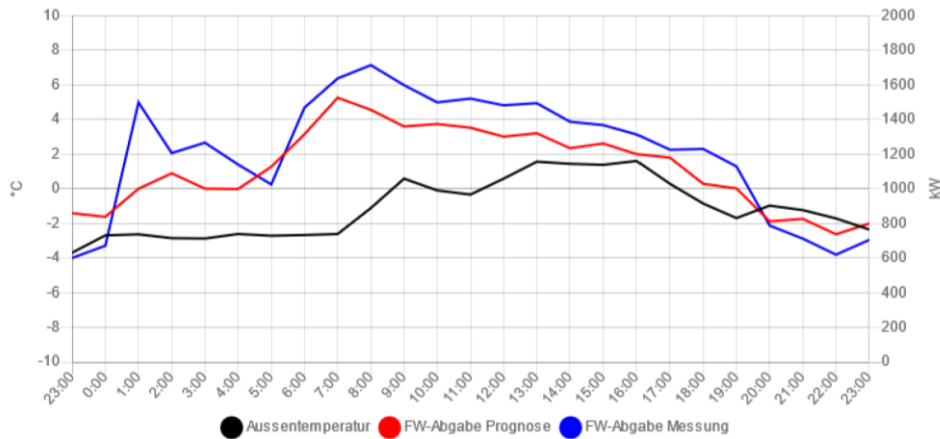


Bild 8.3 Prototyp Modell und Validierung des Algorithmus der AEW Energie AG [236].

Im Rahmen des Horizon 2020 EU-Projekts RES-DHC wurde ein Projekt von AEW Energie AG vorgestellt [236]. Die AEW betreibt in Mägenwil ein thermisches Netz mit hauptsächlich industriellen Kunden und mehreren Privathaushalten. Die Wärme wird durch einen Holzkessel und zwei erdgasbefeuerten Heizkessel bereitgestellt. Ein Speicher ist installiert, um kurzfristige Nachfrageschwankungen auszugleichen. Die Be- und Entladung des Speichers erfolgt aktuell entsprechend dem Wärmeverbrauch, ohne Rücksicht auf den zukünftigen Bedarf. In einem Projekt wurde das Ziel verfolgt, den zukünftigen Leistungsbedarf im Voraus zu bestimmen (Zeithorizont 6 bis 12 Stunden) und diesen bei der Regelung des Wärmespeichers und des Holzkessels zu berücksichtigen. In Zukunft wird die vorausschauende Leistungsbedarfsermittlung auf einem Ansatz der künstlichen Intelligenz (KI) basieren, und ein Regelalgorithmus wird die Speicherung verwalten (siehe Bild 8.3). Mit dem KI-Ansatz wird der Bedarf auf der Grundlage historischer Daten im Voraus ermittelt und in die Speicherbewirtschaftung mit einbezogen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass die Verbrauchsdaten in Echtzeit oder nahezu in Echtzeit vorliegen. Genaue Zahlen werden erst nach der vollständigen Umsetzung vorliegen. Die Einsparung von Erdgas wird auf etwa 200'000 kWh/a geschätzt, was etwa 50% des jährlichen Erdgasbedarfs entspricht. Dementsprechend kann der

erneuerbare Anteil (Holz) von 90% auf 95% gesteigert werden.

Als weiteres Beispiel sei hier der Zentral-Optimierte-Betrieb (ZOB) der St.Galler Stadtwerke zu nennen. Dank künstlicher neuronaler Netze und digitaler Zwillingstechnologie steigert der ZOB die Effizienz und sorgt für eine möglichst optimale Produktionsplanung (Merit-Order der Wärmeerzeuger). Dieser virtuelle Zwilling ist mehr als nur eine Kopie der physischen Infrastruktur; er ist ein dynamisches Modell, das stetig lernt und sich anpasst. Er optimiert die Energieverteilung in Echtzeit, ermöglicht den St. Galler Stadtwerken Prozesse in kurz- oder langfristigen Perioden zu simulieren, Ergebnisse vorherzusagen und Entscheidungen zu treffen, die sowohl die Zuverlässigkeit als auch die ökologische und ökonomische Verantwortung steigern. Mit dem ZOB haben die St.Galler Stadtwerke Neuland betreten und drei Softwaresysteme von drei Herstellern (Bild 8.4) miteinander zu einem synergetischen Gesamtsystem vereint. Es galt 150 Datenpunkte in die Datenflüsse zwischen den Systemen zu integrieren, neue Schnittstellen zu bilden und zu testen. Der ZOB ermöglicht den St.Galler Stadtwerken die Sparten Wärme, Strom und Mobilität zu vereinen sowie zukunftsorientiert und optimal zu bewirtschaften (vgl. [237], [238]).

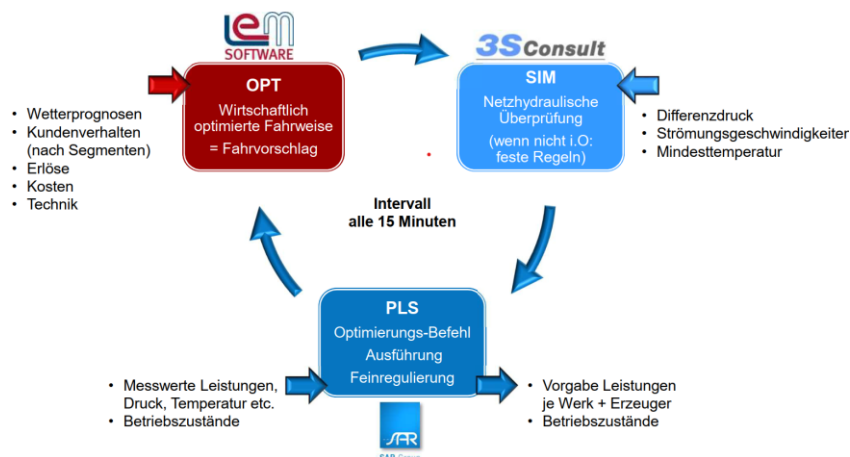
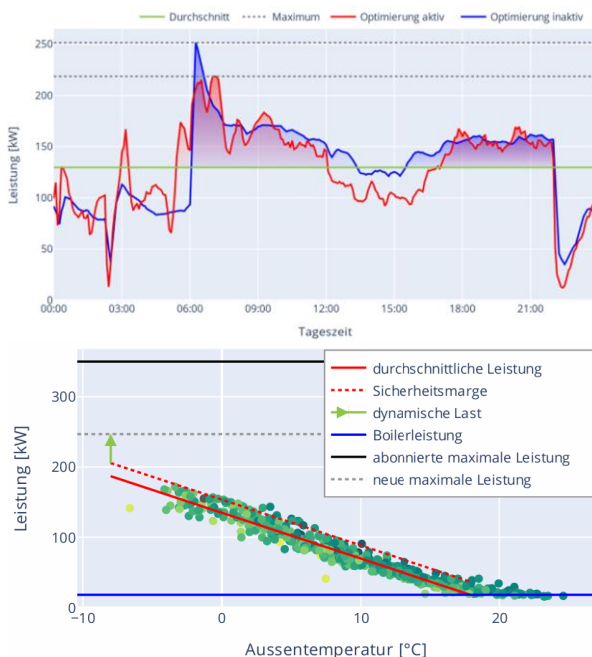


Bild 8.4 Funktion der Automatisierungspyramide des ZOB der Stadtwerke St.Gallen [237].

Als weiteres Beispiel hat Yuon Control AG gemeinsam mit Hoval AG ein von Energie 360° betriebenes städtisches Nahwärmenetz in Zürich optimiert [239]. Das Netz versorgt mehrere Gebäude über eine zentrale Heizungsanlage mit zwei Gasheizkesseln (je 450 kW). Durch die Implementierung einer prädiktiven Steuerung konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Lastspitzen reduziert um 33 % (Bild 8.5 oben)
- Mittlere Anschlussleistung um 26 % gesenkt (Bild 8.5 unten)
- Jährlicher Energieverbrauch um rund 39'400 kWh reduziert.
- Rücklauftemperaturen um bis zu 8 °C gesenkt.

Die Optimierung basiert auf digitalen Gebäudemodellen, Wetterprognosen und einer KI-gestützten Regelung, welche die Heizung und die Warmwassererwärmung vorausschauend steuert. Das System arbeitet vollautomatisch, ist modular und kompatibel mit gängigen Regelsystemen, wodurch es leicht auf andere Netze übertragbar ist.



**Bild 8.5** Optimierung am Beispiel eines Nahwärmenetzes in Zürich [239].  
Oben: Reduktion der Lastspitzen dargestellt bei einem Tagesablauf bei einer mittleren Aussentemperatur von 4,6°C  
Unten: Reduktion der mittleren Anschlussleistung in Funktion der Aussentemperatur.

## 8.11 Digitaler Zwilling

Ein digitaler Zwilling ist ein digitales Modell eines thermischen Netzes teilweise inklusive Energiezentrale(n), Pumpen und weiteren wichtigen Komponenten für eine möglichst reale Abbildung des realen Netzes. Der digitale Zwilling ist unerlässlich für ein aktives Lastmanagement gemäss Kapitel 8.10. Mit einem digitalen Zwilling werden diverse Ziele verfolgt:

- Einsatz als Planungsinstrument: Zum Beispiel können rasch Massnahmen zum Lösen von Netzengpässen simuliert und einander gegenübergestellt werden.
- Einsatz zur Betriebsunterstützung und Optimierung: Fehlfunktionen der Infrastruktur erkennen und mit der aktuellen Regelstrategie abgleichen und optimieren. Anpassungen an der Regelstrategie können an einem digitalen Zwilling getestet werden, bevor diese in die Praxis übertragen werden.
- Einsatz zur Produktionsplanung: Simulation eines optimalen Anlagenbetriebs nach technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten (Merit-Order nach variablen Wärmegestehungskosten oder nach CO<sub>2</sub>-intensität, falls die ökologische Optimierung im Vordergrund steht). Das Ziel ist eine möglichst exakte Bestimmung des zukünftigen Last- und Temperaturbedarf, zum Beispiel für die nächsten 6 bis 24 Stunden. Dies bedingt einerseits historische Messdaten und andererseits möglichst gute Prognosedaten (siehe Bild 8.3 und Bild 8.4).

Mit der Entwicklung hin zu immer komplexeren thermischen Netzen mit der Integration diverser Energieträger sowie der Sektorkopplung, werden numerische Simulationen zu einem unverzichtbaren Werkzeug. Es sind aber immer noch Menschen respektive Fachleute wie Ingenieure, Gebäudetechniker oder Betriebsfachleute die mit kritischem Blick und Erfahrung die Ergebnisse interpretieren und die richtigen Entscheidungen treffen. Eine wichtige Voraussetzung ist auch die Anpassung und stetige Validierung der Simulation an die realen Gegebenheiten.

## 8.12 Dreileiter-Anschluss

Bei jedem Neuanschluss an ein thermisches Netz sollte geprüft werden, ob ein Dreileiter-Anschluss möglich und sinnvoll ist. Wie in Bild 8.6 ersichtlich, wird ein Kunde dabei mit einer Vorlaufleitung und zwei Rücklaufleitungen erschlossen. Die Versorgung des Wärmekunden erfolgt dabei so lange und so oft wie möglich direkt aus dem Rücklauf des Netzes. Dazu muss die Soll-Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite um mindestens die Grädigkeit des Wärmeübertragers tiefer sein als die vorherrschende Netz-Rücklauftemperatur. Als Beispiel kann ein Wohngebäude mit einer Fussbodenheizung in reinen Heizphasen direkt aus dem Netz-Rücklauf versorgt werden, nur in den Brauchwarmwasserladephase wird wärmeres Wasser aus dem Netz-Vorlauf eingespritzt.

Es ist zu beachten, dass ein Dreileiter-Anschluss nur möglich respektive sinnvoll ist, wenn im Netz-Rücklauf genügend Massenstrom vorherrscht, um den Wärmekunden zu versorgen.

Mit einem oder mehreren solchen Dreileiter-Anschlüssen, kann die resultierende Netz-Rücklauftemperatur in der Energiezentrale deutlich reduziert werden. Je nach Art der Wärmeerzeugung führt eine tiefere Netz-Rücklauftemperatur zu einem effizienteren Betrieb der Wärmeerzeugung.

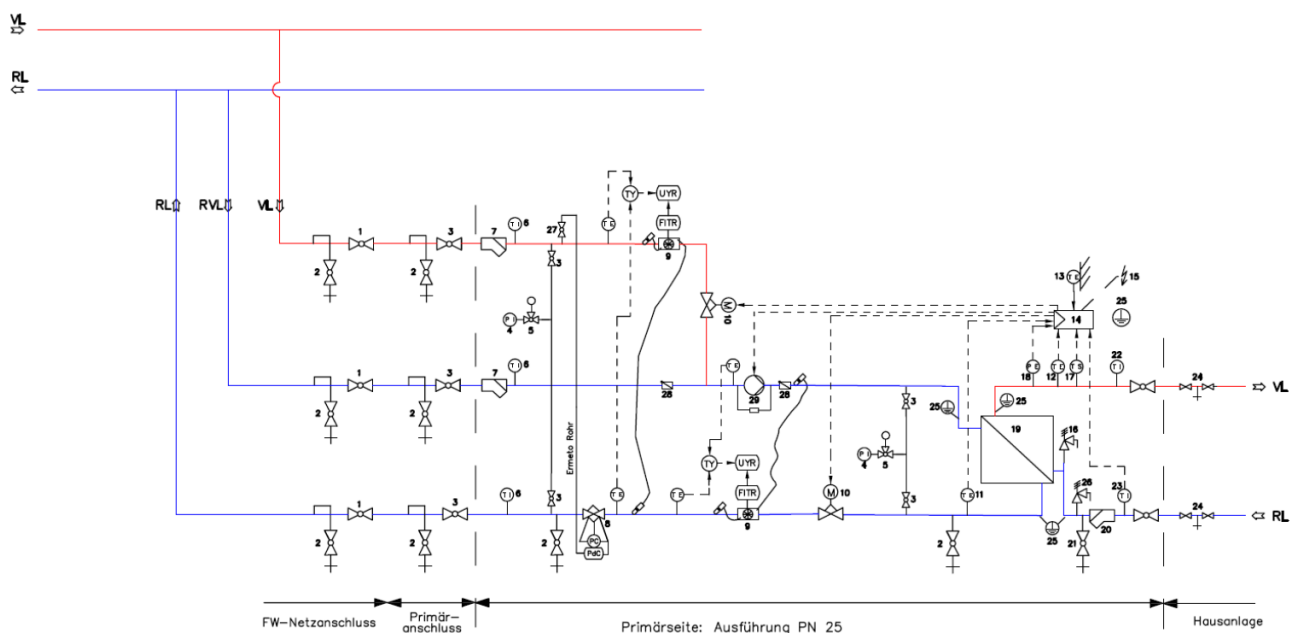


Bild 8.6 Schema eines Dreileiter-Anschlusses für Kunden mit niedrigem Temperaturniveau im Wärmeverbund der Salzburg AG in Salzburg, Österreich [240].

## 8.13 Einsatz thermischer Energiespeicher

Der Einsatz von zentralen und/oder dezentralen Wärmespeicher haben in einem thermischen Netz eine Vielzahl von Vorteile.

- Auffangen von Lastspitzen und Lastabsenkungen
- Überbrücken von Netz-Engpässen
- Glätten des Tageslastgangs (siehe Bild 8.7)
- Sektorkopplung (z.B. Power-to-Heat)
- Entkopplung von Last und Produktion (Vermeidung von Start/Stop-Betrieb der Produktionsanlagen).

Wie im Kapitel 8.10 beschrieben, können **dezentrale Speicher beim Kunden** helfen, dass der Spitzenlastbedarf eines Kunden (zum Beispiel kurzer, hoher Prozesswärmebedarf) nicht direkt auf das thermische Netz übertragen werden. Wenn dies bereits in der Planung berücksichtigt werden kann, hilft dies Investitionskosten durch kleinere Rohrleitungsdimensionen einzusparen. Eine nachträgliche Installation hilft dabei die Transportkapazität eines bestehenden Netzes zu erhöhen, respektive Engpässe zu entschärfen.

Zu beachten ist der zusätzliche Platzbedarf beim Kunden für den Speicher und Komponenten wie Pumpen, Ventile, Wärmeübertrager etc.

**Dezentrale Speicher im Netz** können grundsätzlich an jedem Standort in einem thermischen Netz installiert werden. Üblicherweise werden sie aus folgenden Gründen vorgesehen:

- Entlastung eines Netzengpasses und damit Erhöhung der Transportkapazität des entsprechenden Netzabschnittes.
- Versorgung weiterer Gebiete oder Areale, ohne die Leistungsdimensionen zu erhöhen.

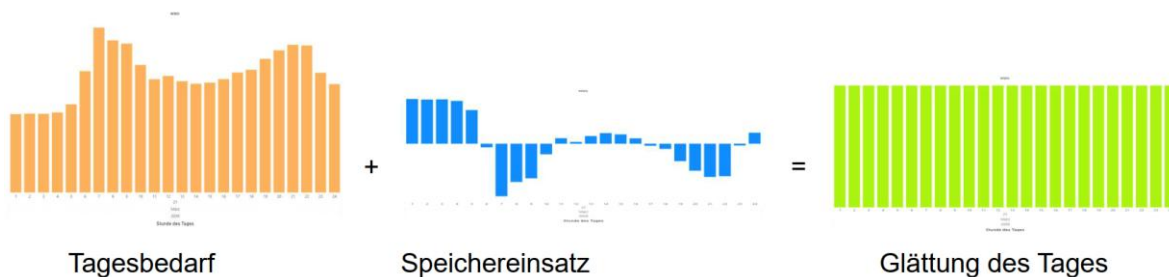


Bild 8.7 Schematische Darstellung von Tagesbedarf, Speichereinsatz und das überlagerte Resultat als «Glättung des Tageslastgangs» [241].

- Effiziente und hydraulisch entkoppelte Einbindung dezentraler Wärmeerzeuger.
- Vergrößerung der Gesamt-Speicherkapazität, wenn am Standort der Energiezentrale kein Platz zur Verfügung steht.

Gegenüber dezentralen Wärmespeicher beim Kunden ist bei dezentralen Wärmespeicher im Netz der benötigte Platzbedarf sicher eine grössere Herausforderung, da diese in der Regel deutlich grössere Volumen benötigen und raumplanerisch sowie architektonisch (städttebaulich) gut integriert werden müssen.

**Zentrale Wärmespeicher** bieten in Abhängigkeit ihrer Speicherkapazität eine Vielzahl von Optimierungsmöglichkeiten:

- Glätten des Tageslastgangs
- Vermeidung von Start/Stop-Betrieb der Wärmeerzeugung
- Zeitliche Verschiebung von Energieanfall und Energiebedarf
- Integration von Abwärmequellen
- Sektorkopplung, Nutzung von Überschussstrom durch Power-to-Heat.

Auch bei zentralen Wärmespeicher ist der benötigte Platzbedarf zu beachten. Je nach Grösse und Aufgabe benötigen grosse Wärmespeicher viel Platz und sind raumplanerisch sowie architektonisch (städttebaulich) gut zu integrieren.

Die Dimensionierung des Speichervolumens und die Auslegung der Anschlussleitungen erfolgt in allen Fällen anhand der jeweiligen Anwendung und Anforderungen (benötigte Energiemenge, maximaler Leistungsbedarf und Dauer des maximalen Leistungsbedarfs). Ebenso ist auf eine optimale Be- und Entladestrategie zu achten. Grundlegende Informationen und Hinweise zur Integration in thermische Netze sind im Kapitel 2.6.4 und 2.6.5 zu finden.

## 8.14 Güte der Kundenanlagen – Tiefe Rücklauftemperaturen

### 8.14.1 Motivation

Die Analyse und Optimierung der Kundeneinbindung ist nur bei bestehenden thermischen Netzen möglich und verfolgt das Ziel, dass die Kundenanlagen zu jedem Zeitpunkt eine möglichst optimale und effiziente Wärmeübertragung aufweisen. Das bedeutet, dass bei Wärme- oder Kältebezug das Vorlaufwasser möglichst gut abgekühlt respektive aufgewärmt wird, also eine möglichst **grosse Temperaturspreizung** erreicht wird.

Ein thermisches Netz mit optimaler Temperaturspreizung weist minimale Wärmeverluste auf und es muss minimal Wasser im Verteilnetz befördert werden. Dadurch kann der Brennstoffeinsatz und der Strombedarf für die Umwälzpumpen minimal gehalten werden. Gleichzeitig kann in einem bestehenden Verteilnetz, bei gegebenen Nennweiten, mehr Leistung übertragen werden.

Das nachfolgend beschriebene Methode wurde in einem internationalen Forschungsprojekt [242] vorgestellt und angewendet. Die Anwendung der Methode wurde zudem im Rahmen einer Praxiserhebung an drei thermischen Netzen in der Schweiz [243] erfolgreich durchgeführt und das Vorgehen dokumentiert. Dabei konnte der Nutzen bei relativ geringem Aufwand in der Praxis gut aufgezeigt werden. Der Aufwand für die während dem Projekt in der Schweiz umgesetzten Optimierungsmassnahmen waren nach zwei bis vier Jahren amortisiert. Zudem ermöglichten diese Massnahmen im Leitungsabschnitt von der Zentrale bis zum jeweiligen Kunden weitere Anschlusskapazitäten von 100 kW respektive 80 kW, womit das Entwicklungspotenzial und die Wirtschaftlichkeit des thermischen Netzes weiter erhöht wurden.

### 8.14.2 Methode

Um zu bestimmen, welche Kunden den grössten Einfluss auf die primäre Rücklauftemperatur haben, wird in erster Linie die als **Mehrverbrauch** bezeichnete Wassermenge bestimmt. Dieser methodische Ansatz erfasst die Güte der Kundenanlagen. Eine Rangierung der Kunden nach dem Mehrverbrauch hilft dem Betreiber den Fokus auf die wichtigsten (schlechtesten) Kunden zu richten. In einem weiteren Schritt kann dadurch auch der Einfluss eines jeden einzelnen Kunden auf die gesamte primäre Rücklauftemperatur bestimmt werden und ermöglicht das Optimierungspotenzial für das gesamte Netz abzuschätzen.

Für diese Qualitative und Quantitative Auswertung ist lediglich eine **Auswertung** der verkauften **Energie-menge** und der benötigten **Wassermenge** in einem bestimmten Betrachtungszeitraum notwendig.

Grosse Kunden sind für die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich wichtiger als kleine, bei der Analyse der Güte der Wärmeübertragung gilt das natürlich auch. Es sind jedoch immer sämtliche Kunden zu berücksichtigen. Da

sehr schlechte Kundenanlagen, auch wenn diese nur eine kleine Bezugsleistung aufweisen, vielfach einfacher zu optimieren sind (low hanging fruits).

#### 8.14.2.1 Grundlagen

Die Grundgleichung der Wärmelehre bildet die Basis für die Berechnung des Mehrverbrauches und den daraus berechneten Einfluss auf die Rücklauftemperatur.

$$Q = m c_p \Delta T = V \rho c_p \Delta T$$

Bei gegebener Energiemenge  $Q$  und wenn die Dichte  $\rho$  und die spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums  $c_p$  im Betrachtungszeitraum als konstant angenommen werden, ist die Temperaturspreizung  $\Delta T$  umgekehrt proportional zum übertragenen Volumen  $V$  und es gilt:

$$\Delta T \sim \frac{1}{V}$$

Zur Bewertung der Kunden werden somit aus den Wärmezählerdaten gemäss Bild 8.8 die Wärmemengen  $Q$  und die Wassermengen  $V$  über den Betrachtungszeitraum erfasst und ausgewertet.

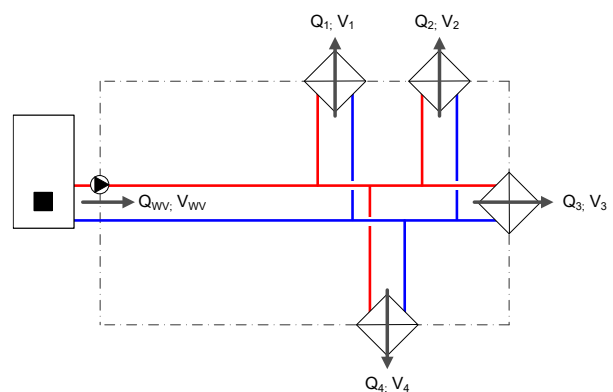


Bild 8.8 Schematische Darstellung der Kennwerte für die Aufzeichnung der Wärmezählerdaten mit einem Wärmeerzeuger mit Hauptgruppe für die Wärmeverteilung WV und vier Kunden V1 bis V4.

Ideal ist eine kontinuierliche Erfassung der Daten mit einer monatlichen (automatisierten) Auswertung. Somit können frühzeitig Trends, Ereignisse oder Mängel festgestellt werden. Natürlich ist auch eine quartalsweise, halbjährliche oder jährliche Auswertung und Beurteilung möglich, dabei werden plötzlich auftretende Ereignisse oder Mängel in der Regel aber zu spät erkannt.

Wenn die Daten manuell erhoben oder zum ersten Mal ausgewertet werden, wird eine Auswertung über mindestens ein Quartal in der Heizperiode empfohlen.

### 8.14.2.2 Mehrverbrauch

Der Mehrverbrauch ist das Wasservolumen, das im Vergleich zu einer Referenz-Temperaturspreizung zu viel über die Übergabestation geflossen ist (Bild 8.9).

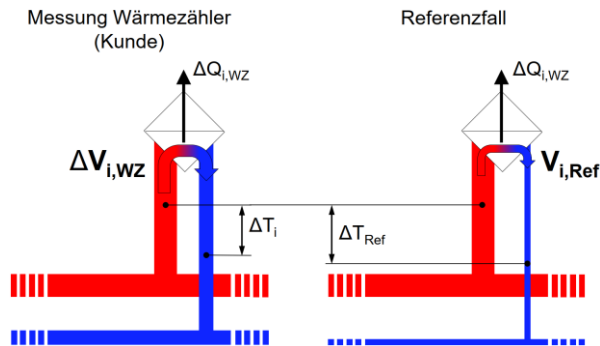


Bild 8.9 Darstellung des Mehrverbrauchs für einen Kunden durch den Vergleich der Wärmehändlerdaten bei einer Referenz-Temperaturspreizung.

Das Volumen des Mehrverbrauchs für den Kunden  $i$  berechnet sich somit aus der Differenz des gemessenen Volumens und dem idealen Volumen wie folgt:

$$V_{i,MV} = \Delta V_{i,WZ} - V_{i,REF}$$

Mehrverbrauch = WZ-Daten – Referenz Wert

Das gemessene Volumen für den Kunden  $i$  im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmehändlers zum End-Zeitpunkt ( $t_1$ ) abzüglich dem Stand des Wärmehändlers zum Start-Zeitpunkt ( $t_0$ ) wie folgt:

$$\Delta V_{i,WZ} = V_{i,WZ}(t_1) - V_{i,WZ}(t_0)$$

Das ideale Volumen für den Kunden  $i$  im betrachteten Zeitraum bei der Referenz-Temperaturspreizung berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Wärmemengen-Differenz für den Kunden  $i$  zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Referenz-Temperaturspreizung wie folgt:

$$V_{i,REF} = \frac{\Delta Q_{i,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T_{REF}}$$

Die *Referenz-Temperaturspreizung* sollte auf der maximalen Temperaturspreizung der Temperaturangaben von Vor- und Rücklauf der Technischen Anschlussvorschriften (TAV) beruhen. Sind keine TAV vorhanden, ist als Referenz-Temperaturspreizung ein hoher, wenn möglich realistischer Wert als Referenz zu wählen.

Die gemessene Wärmemengen-Differenz für den Kunden  $i$  im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmehändlers zum End-Zeitpunkt ( $t_1$ ) abzüglich dem Stand des Wärmehändlers zum Start-Zeitpunkt ( $t_0$ ) wie folgt:

$$\Delta Q_{i,WZ} = Q_{i,WZ}(t_1) - Q_{i,WZ}(t_0)$$

### 8.14.2.3 Einfluss auf die Rücklauftemperatur

Die alleinige Bewertung des Mehrverbrauchs genügt in der Regel für eine qualitative Beurteilung der Güte der Kundenanlagen und als Indikator für die Notwendigkeit einer Optimierung.

Von besonderem Interesse ist jedoch auch eine qualitative Größenordnung, und zwar, wie sich eine optimale Kundenanlage auf das Gesamtnetz auswirken würde. Diese rein hypothetische Aussage kann zum Beispiel über den Einfluss auf die Rücklauftemperatur erbracht werden. Dabei wird der Einfluss auf die Rücklauftemperatur für jeden Kunden durch eine Temperaturdifferenz dargestellt, welche beschreibt, um wie viel die Temperatur des gesamten primären Rücklaufes sinkt, wenn dieser Kunde im Betrachtungszeitraum mit der (optimalen) Referenz-Temperaturspreizung betrieben worden wäre (Bild 8.10).

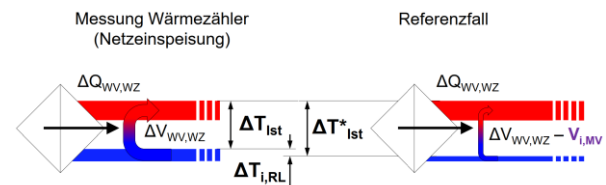


Bild 8.10 Darstellung der Temperaturspreizung und der Volumenströme vor Optimierung (links) und nach Optimierung (rechts) eines Kunden.

Der Wert berechnet sich aus der Differenz der mittleren Temperaturspreizung aus den Wärmehändlerdaten des Hauptzählers und der mittleren Temperaturspreizung mit optimierter Übergabestation des Kunden wie folgt:

$$\Delta T_{i,RL} = \Delta T_{IST} - \Delta T_{IST}^*$$

Die mittlere Temperaturspreizung aus den Wärmehändlerdaten des Hauptzählers berechnet sich aus dem Verhältnis der Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum wie folgt:

$$\Delta T_{IST} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot V_{WV,WZ}}$$

Die mittlere Temperaturspreizung mit optimierter Übergabestation berechnet sich aus dem Verhältnis der Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum zu der Dichte des Wassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Differenz der Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum abzüglich dem Mehrverbrauch für den Kunden  $i$  wie folgt:

$$\Delta T_{IST}^* = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot (V_{WV,WZ} - V_{i,MV})}$$

Die Wärmemengen-Differenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt ( $t_1$ ) abzüglich dem Stand des Wärmezählers zum Start-Zeitpunkt ( $t_0$ ) wie folgt:

$$\Delta Q_{WV,WZ} = Q_{WV,WZ}(t_1) - Q_{WV,WZ}(t_0)$$

Die Volumendifferenz für den Hauptzähler im betrachteten Zeitraum berechnet sich aus der Differenz des Standes des Wärmezählers zum End-Zeitpunkt ( $t_1$ ) abzüglich dem Stand des Wärmezählers zum Start-Zeitpunkt ( $t_0$ ) wie folgt:

$$\Delta V_{WV,WZ} = V_{WV,WZ}(t_1) - V_{WV,WZ}(t_0)$$

Zusammengefasst ergibt sich für den Einfluss auf die Rücklauftemperatur folgende Gleichung:

$$\Delta T_{i,RL} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p \cdot V_{WV,WZ}} \left( \frac{1}{\Delta V_{WV,WZ}} - \frac{1}{\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV}} \right)$$

### 8.14.3 Vorgehen

Das gesamtheitliche Vorgehen zur Optimierung der Kundenanlagen kann in folgende drei Aufgabebereiche eingeteilt werden, welche im Idealfall als chronologische Arbeitsschritte durchgeführt werden:

1. Datenerfassung und Auswertung
2. Beurteilung
3. Umsetzung und Erfolgskontrolle

Nachfolgend wird detailliert auf die drei Arbeitsschritte eingegangen.

#### 8.14.3.1 Datenerfassung und Auswertung

Für die **Datenerfassung** müssen Wärmezählerdaten für einen gewissen Betrachtungszeitraum vorliegen. Diese werden im Idealfall zentral erfasst und liegen archiviert vor. Minimal müssen der Stand der Wärmemenge und der Stand der Wassermenge erfasst werden. Liegen keine Daten vor oder nur die Wärmemengen, müssen die notwendigen Daten vor der ersten Auswertung noch erfasst werden.

Der ideale **Betrachtungszeitraum** ist abhängig von der Datenlage, ob die Auswertung zum ersten Mal gemacht wird oder wie die Daten erfasst und ausgewertet werden können:

- Bei einer ersten Auswertung empfiehlt sich mindestens die Heizperiode auszuwerten, da angenommen werden kann, dass alle Kunden am Netz versorgt werden und somit auch alle ausgewertet werden können.
- Nach der ersten Auswertung empfiehlt sich eine periodische Auswertung. Damit können Trends dargestellt und Defekte oder sonstige Ereignisse schnell erkannt werden.

Wichtig ist, dass dies als **Prozess etabliert** wird, egal ob es monatlich, quartalsweise, halbjährlich oder nur einmal im Jahr ausgewertet wird.

Denn, sollten keine anderweitigen Überwachungseinrichtungen zur Kontrolle der korrekten Funktionalität der Übergabestation eingerichtet sein, kann es Monate bis Jahre dauern, bis entsprechende Fehlfunktionen erkannt werden.

Die Berechnung und **Auswertung** des Mehrverbrauchs und die Bestimmung des Einflusses auf die Rücklauftemperatur erfolgen am einfachsten in einer Tabellenkalkulation. Die folgenden Ausführungen basieren auf der Excel-Tabelle *Mehrverbrauch* [244] anhand eines fiktiven thermischen Netzes.

Die Excel-Tabelle umfasst im ersten Abschnitt einen Eingabebereich für Annahmen und Ausgangslage (Bild 8.11, oben), in dem folgende Eingabegrößen (rot) festzulegen sind:

- Referenz-Temperaturspreizung
- Spez. Wärmekapazität Wasser
- Dichte Wasser
- Ableszeitraum Wärmezähler Start
- Ableszeitraum Wärmezähler Ende

Im gleichen Abschnitt (Bild 8.11, unten) werden folgenden berechneten Größen (blau) ausgegeben, die aus den Eingabegrößen und den Wärmezählerdaten bestimmt werden:

- Ableszeitraum  $t$  in Tagen
- Ableszeitraum  $t$  Stunden
- Gesamte Wärmemenge
- Gesamte Wassermenge
- Mittlere Temperaturspreizung

**Annahmen und Ausgangslage**

|                              |                     |            |
|------------------------------|---------------------|------------|
| Referenz-Temperaturspreizung | K                   | 30         |
| spez. Wärmekapazität         | kJ/(kg K)           | 4.185      |
| Dichte Wasser                | kg/m <sup>3</sup>   | 980        |
| Beurteilungsperiode          |                     |            |
| Start                        | Datum               | 31.01.2016 |
| Ende                         | Datum               | 30.05.2016 |
| Anzahl Tage                  | d                   | 120        |
| Anzahl Stunden               | h                   | 2880       |
| Gesamte Wärmemenge           | kWh/t**             | 1'848'043  |
| Gesamte Wassermenge          | m <sup>3</sup> /t** | 63'853     |
| mittlere Temperaturspreizung | K                   | 25.4       |

\*\* t bezieht sich auf die definierte Betrachtungsperiode.

Hier die Gesamte Wärmemenge aller Wärmeabnehmer; Formeleingabe möglich  
Hier die Gesamte Wassermenge aller Wärmeabnehmer; Formeleingabe möglich

Bild 8.11 Excel-Tabelle *Mehrverbrauch* zur Auswertung von Mehrverbrauch und Einfluss der Rücklauftemperatur. Ausschnitt mit Eingabegrößen und berechneten Größen der Annahmen und Definition der Ausgangslage für ein fiktives thermisches Netz.

In einem weiteren Eingabebereich werden (aufbereitete) Wärmezählerdaten der Kunden eingefügt. Aus diesen und den Eingabegrößen werden der Mehrverbrauch und der Einfluss auf die Rücklauftemperatur bestimmt (siehe Bild 8.12).

Die fünf ersten Spalten mit gelbem Hintergrund (Bild 8.12) sind für die Dateneingabe der aufbereiteten Wärmezählerdaten der Kunden reserviert. Die Wärmezählerdaten müssen in einem separaten Dokument vorbereitet und danach in das Dokument kopiert werden. Die Aufbereitung erfolgt nach folgenden Kriterien:

- **Kunden-Nummer:** Zum Beispiel Zähler-Nummer des Wärmezählers, welches eine eindeutige und unverwechselbare Zuordnung ermöglicht.
- **Kunde Beschreibung:** Eindeutige und unverwechselbare Bezeichnung des Kunden.
- **Abonnierte Leistung:** Angabe der Anschlussleistung in kW zur Plausibilisierung der Eingabedaten anhand der Vollbetriebsstundenzahl. Diese Eingabe ist nicht zwingend erforderlich für die Bestimmung des Mehrverbrauchs.
- **Wärmemenge:** übertragene Wärmemenge in kWh im Betrachtungszeitraum.
- **Wassermenge:** durchströmte Wassermenge in m<sup>3</sup> im Betrachtungszeitraum.

In den nachfolgenden Spalten (Bild 8.12) werden folgende Werte für jeden Kunden berechnet:

- **Vollbetriebsstundenzahl:** Berechnet die jährliche Vollbetriebsstundenzahl der Kundenanlage. Vorsicht: Der Wert wird auf ein Jahr hochgerechnet, falls der Ableszeitraum kürzer als ein Jahr (8760

Stunden) ist, kann es zu einer Fehlinterpretation kommen. Dieser Berechnungsschritt dient lediglich zur Plausibilisierung der Wärmezählerdaten und hat keinen Einfluss auf die Berechnung des Mehrverbrauchs.

- **Mehrverbrauch:** Zeigt die Ergebnisse für den Mehrverbrauch nach Kapitel 8.14.2.2.
- **Mittlere Temperaturspreizung:** Für den Betrachtungszeitraum wird die mittlere Temperaturspreizung der Kundenanlage berechnet.
- **Einfluss auf primäre Rücklauftemperatur:** Zeigt die Ergebnisse für den Einfluss auf die Rücklauftemperatur nach Kapitel 8.14.2.3.
- **Gewichteter Mehrverbrauch:** Der gewichtete Mehrverbrauch berücksichtigt zusätzlich die mittlere Temperaturspreizung im Betrachtungszeitraum der Kundenanlage, indem der Mehrverbrauch durch die mittlere Temperaturspreizung dividiert wird. Damit können eher kleinere aber sehr schlechte Kundenanlagen besser erkannt werden. Denn sehr schlechte Kundenanlagen, auch wenn diese nur eine kleine Bezugsleistung aufweisen, sind vielfach einfacher zu optimieren.
- **Klassierung:** Die beiden Spalten der Klassierung ermöglichen die Kundenanlagen nach dem *Mehrverbrauch* oder nach dem *gewichteten Mehrverbrauch* in eine Rangfolge zu bringen.

Die Ergebnisse der Rangierung dienen dem Betreiber den **Fokus** auf die wirklich «schlechten» Kundenanlagen zu legen.

| Kunden Nummer | Kunde Beschreibung                           | abonnierte Leistung (Anschlussleistung) | Wärmemenge | Wassermenge          | Vollbetriebsstundenzahl* | Mehrverbrauch        | Mittlere Temperaturspreizung | Klassierung | Einfluss auf primäre Rücklauftemperatur | Klassierung | gewichteter Mehrverbrauch |
|---------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|------------|----------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------------|-------------|---------------------------|
| ~             | ~                                            | kW                                      | kWh/lt**   | m <sup>3</sup> /lt** | h/a                      | m <sup>3</sup> /lt** | K                            | ~           | °C                                      | ~           | m <sup>3</sup> /(t** K)   |
| 20            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 20 | 375                                     | 299'890    | 12'563               | 2'432                    | 3'788.51             | 21.0                         | 1           | 1.6                                     | 3           | 180.84                    |
| 19            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 19 | 275                                     | 157'535    | 7'863                | 1'742                    | 3'253.68             | 17.6                         | 2           | 1.4                                     | 2           | 185.01                    |
| 30            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 30 | 18                                      | 15'412     | 2'547                | 2'804                    | 2'096.06             | 5.3                          | 3           | 0.9                                     | 1           | 394.63                    |
| 43            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 43 | 65                                      | 60'787     | 2'398                | 2'845                    | 618.93               | 22.3                         | 4           | 0.2                                     | 4           | 27.81                     |
| 29            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 29 | 75                                      | 81'245     | 2'774                | 3'295                    | 397.15               | 25.7                         | 5           | 0.2                                     | 5           | 15.45                     |
| 33            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 33 | 31                                      | 27'976     | 1'144                | 2'745                    | 325.35               | 21.5                         | 6           | 0.1                                     | 6           | 15.16                     |
| 38            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 38 | 141                                     | 127'429    | 4'015                | 2'749                    | 286.85               | 27.9                         | 7           | 0.1                                     | 8           | 10.30                     |
| 27            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 27 | 30                                      | 33'210     | 1'256                | 3'367                    | 284.41               | 23.2                         | 8           | 0.1                                     | 7           | 12.26                     |
| 39            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 39 | 61                                      | 63'688     | 2'074                | 3'176                    | 210.55               | 27.0                         | 9           | 0.1                                     | 10          | 7.81                      |
| 15            | Wärmeabnehmer/Consummateure/Heat customer 15 | 30                                      | 23'597     | 892                  | 2'392                    | 201.58               | 23.2                         | 10          | 0.1                                     | 9           | 8.68                      |

Bild 8.12 Excel-Tabelle Mehrverbrauch zur Auswertung von Mehrverbrauch und Einfluss der Rücklauftemperatur. Abgebildet sind die zehn schlechtesten Kunden für ein fiktives thermisches Netz.

### 8.14.3.2 Beurteilung

Auf Basis der Datenauswertung können die «schlechtesten» Kundenanlagen ermittelt werden. Das weitere Vorgehen besteht darin, die Ursache(n) für den hohen Mehrverbrauch respektive für die hohen Rücklauftemperaturen zu eruieren, Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten und umzusetzen.

Eine Begehung vor Ort ist dabei zwingend notwendig. Anwesend sollten mindestens der Kunde bzw. eine Vertretung des Kunden sowie eine zuständige Person des Versorgungsunternehmens sein, welche über das notwendige Fachwissen im Bereich thermische Netze und Gebäudetechnik mitbringen. Bei Bedarf sind externe Fachpersonen hinzuzuziehen.

Nach einer Untersuchung der Internationalen Energieagentur (IEA) sind dabei drei Kategorien der Anlagentechnik verantwortlich für die Mängel [242]:

1. Die sekundärseitige Wärmeverteilung ist für rund 60% der Störungen verantwortlich.
2. Auf die Brauchwarmwassererwärmung entfallen rund 30% der Mängel.
3. Für die restlichen 10% der Mängel sind die Übergabestationen mit primär- und sekundärseitigen Komponenten verantwortlich.

Typische Gründe sind falsch ausgelegte oder nicht sachgerecht installierte Komponenten, Verschleiss und Defekte aufgrund von Alterung sowie ungeeignete Einstellungen der Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Als konkrete Ursachen für Fehlfunktionen kommen häufig defekte Ventilsteuerungen, defekte Antriebe, undichte

Ventile, ungeeignete Regler-Einstellungen sowie eine unpassende hydraulische Einbindung auf der Primär- und/oder Sekundärseite der Kundenanlage in Frage.

Entsprechende **Empfehlungen zur hydraulischen Einbindung der Kundenanlage** bei einem Anschluss an ein thermisches Netz, also der sogenannten Sekundärseite, ist im Kapitel 5.7 detailliert beschrieben.

Das Ziel der Begehung und Beurteilung ist schlussendlich, die Grundlagen für das weitere Vorgehen zu erarbeiten. Auf Basis der Vor-Ort-Begehung, der geführten Gespräche und den Unterlagen wird ein detaillierter Bericht erstellt. Dieser enthält technische und betriebliche Optimierungsvorschläge sowie eine Kosten-Nutzen-Analyse. Der Bericht dient anschliessend als fundierte Entscheidungsgrundlage für Umsetzungsmassnahmen.

### 8.14.3.3 Umsetzung und Erfolgskontrolle

Für die Umsetzung von Optimierungsmassnahmen ist entscheidend, in welchem Verantwortungsbereich diese liegen.

Massnahmen auf der **Primärseite** können in der Regel vom Betreiber der Anlage eigenständig umgesetzt werden, sofern dadurch die Versorgungssicherheit auf der Sekundärseite nicht wesentlich beeinträchtigt wird.

Anders gestaltet sich die Situation bei Optimierungen auf der **Sekundärseite**. Hier besteht häufig ein Ziel- und Interessenkonflikt: Eine verbesserte Temperaturspreizung nützt in erster Linie dem Betreiber des thermischen Netzes, während die Verantwortung und die Kosten für die Umsetzung beim Kunden liegen. Zwar können auf der Sekundärseite ein reduzierter Pumpaufwand sowie geringere Verteilverluste erwartet werden, die daraus resultierenden Kosteneinsparungen sind jedoch meist gering. Eine vorzeitige Sanierung der bestehenden Installationen ist dadurch oft nicht wirtschaftlich begründbar.

Daher sollten im Vorfeld folgende Punkte geprüft werden:

- Bestehen festgelegte Mindestanforderungen an Vor- und Rücklauftemperaturen, die Temperaturspreizung sowie an die Einbindung der Sekundärseite gemäss gültigen TAV?
- Ist eine Sanierung der sekundärseitigen Installationen in nächster Zeit geplant oder notwendig?
- Ist eine Kostenbeteiligung an den Optimierungsmassnahmen möglich und vorteilhaft?

### 8.14.3.4 Empfehlungen zum Vorgehen

Die Analyse der Kundeneinbindung anhand des Mehrverbrauchs lässt sich grundsätzlich einfach umsetzen. Dafür ist lediglich eine Auswertung der gemessenen Wärme- und Wassermengen aus den Wärmezählern der Kundenanlagen erforderlich.

Im Gegensatz dazu ist die Beurteilung und Umsetzung konkreter Optimierungsmassnahmen eine wesentlich komplexere Aufgabe, die nicht unterschätzt werden darf. Sie erfordert Grundlagenwissen in Thermo- und Fluid-dynamik, Praxiserfahrung mit thermischen Netzen sowie Kenntnisse in der Gebäudetechnik.

Im nachfolgenden Kasten sind die wichtigsten Empfehlungen und Hinweise für die praktische Umsetzung zusammengefasst.

Die in Tabelle 8.1 dargestellten Aufgaben und Verantwortlichkeiten dienen dem Betreiber als Hilfsmittel zur optimalen Ressourcenzuteilung während des Optimierungsprozesses. Abhängig vom technischen Stand der Infrastruktur sowie dem intern verfügbaren Know-how kann die Umsetzung entweder in Eigenregie erfolgen oder sollte durch eine (externe) Fachperson begleitet werden.

- Die Analyse des Mehrverbrauchs ist als kontinuierlicher Prozess im Betrieb zu etablieren.
- Alle Wärmezählerdaten sind an einem zentralen Ort zu erfassen und zu archivieren. Dies erleichtert sowohl die Datenauswertung als auch die Fakturierung. Für eine vollständige Analyse müssen sowohl die Wärmemenge in kWh als auch das Wasser- bzw. Volumen in m<sup>3</sup> zwingend erfasst werden.
- Die Auswertung des Mehrverbrauchs sollte regelmässig erfolgen – idealerweise monatlich oder quartalsweise. Dadurch lassen sich Trends frühzeitig erkennen sowie Defekte oder andere Auffälligkeiten schnell identifizieren.
- Bei manueller Datenerhebung oder einer Erstausswertung empfiehlt sich eine Auswertungsperiode von mindestens einem Quartal während der Heizsaison.
- Für die Analyse eignet sich eine einfache Tabellenkalkulation (z. B. Excel). Es ist mit einem gewissen Initialaufwand zu rechnen. Sind die erforderlichen Daten jedoch verfügbar und gut aufbereitet, ist der Zeitaufwand gering.
- Je nach betrieblicher Infrastruktur ist eine automatisierte Auswertung anzustreben, um Aufwand und Fehlerquellen zu minimieren.
- Für die Beurteilung der Kundenanlage ist erfahrenes Fachpersonal erforderlich. Alternativ können auch externe Fachpersonen beigezogen werden. In Zusammenarbeit mit dem Kunden ist die Ist-Situation aufzunehmen, um daraus geeignete Optimierungsmassnahmen abzuleiten.
- Eine Kosten-Nutzen-Analyse der geplanten Massnahmen wird empfohlen. Dies unterstützt Entscheidungsträger dabei, die wirtschaftlich und technisch sinnvollste Lösung zu identifizieren.
- Optimierungsmassnahmen auf der Primärseite können vom Betreiber in der Regel schnell und eigenverantwortlich umgesetzt werden – vorausgesetzt, die Versorgungssicherheit auf der Sekundärseite bleibt gewährleistet.
- Massnahmen auf der Sekundärseite liegen grundsätzlich in der Verantwortung des Kunden. Dabei ist zu prüfen ob Mindestanforderungen gemäss TAV eingehalten werden, wann eine Sanierung der sekundärseitigen Installationen geplant oder notwendig ist sowie ob eine Kostenbeteiligung des Versorgers möglich und sinnvoll ist.
- Nach Umsetzung der Massnahmen ist eine Erfolgskontrolle durchzuführen, um die Wirksamkeit der Optimierung zu überprüfen und gegebenenfalls nachzubessern.

Tabelle 8.1 Vorgehen und Verantwortlichkeiten zur Analyse und Optimierung der Kundeneinbindung mit der Methode Mehrverbrauch.

| Was                                   | Beschreibung                                                                                                                          | Wer                                                  |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Datenerfassung und Auswertung</b>  | Wärmezählerdaten erfassen                                                                                                             | <b>Betreiber</b> / Fachperson*                       |
|                                       | Mehrverbrauch und Einfluss auf die Rücklauftemperatur bestimmen                                                                       | Betreiber / <b>Fachperson*</b>                       |
|                                       | Kunden nach Mehrverbrauch und gewichtetem Mehrverbrauch rangieren                                                                     | Betreiber / <b>Fachperson*</b>                       |
| <b>Beurteilung</b>                    | Auf Basis der Auswertung die schlechtesten Kunden für eine vertiefte Beurteilung bestimmen.                                           | <b>Betreiber</b> / <b>Fachperson*</b>                |
|                                       | Beurteilung der Ist-Situation der schlechtesten Kunden vor Ort                                                                        | <b>Betreiber</b> / <b>Fachperson*</b> / <b>Kunde</b> |
|                                       | Ableitung von Optimierungsmassnahmen                                                                                                  | Betreiber / <b>Fachperson*</b>                       |
|                                       | Gewichtung der Optimierungsmassnahmen anhand von Nutzen und Aufwand                                                                   | Betreiber / <b>Fachperson*</b>                       |
| <b>Umsetzung und Erfolgskontrolle</b> | Zuständigkeiten klären                                                                                                                | <b>Betreiber</b> / <b>Kunde</b>                      |
|                                       | Güterabwägung der Kostenübernahme oder Kostenbeteiligung falls Optimierungsmassnahme die Sekundärseite betrifft (Zuständigkeit Kunde) | <b>Betreiber</b>                                     |
|                                       | Optimierungsmassnahmen umsetzen                                                                                                       | <b>Betreiber</b> / <b>Kunde</b>                      |
|                                       | Erfolgskontrolle durchführen                                                                                                          | <b>Betreiber</b> / <b>Fachperson*</b>                |

\* interne oder externe Fachperson für thermische Netze und Gebäudetechnik.

# Anhang

## 9 Stoffwerte von Wasser

Tabelle 9.1 Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand [245].

| Temperatur<br>°C | Dampfdruck<br>bar | Dichte<br>kg/m <sup>3</sup> | Spezifische Wärmekapazität<br>J/(kg K) | Wärmeleitfähigkeit<br>W/(m K) | Kinematische Viskosität<br>10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s |
|------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 0                | 0.0061            | 999.79                      | 4'220                                  | 0.562                         | 1.792                                                         |
| 0.01             | 0.0061            | 999.79                      | 4'220                                  | 0.562                         | 1.792                                                         |
| 5                | 0.0087            | 999.92                      | 4'205                                  | 0.572                         | 1.518                                                         |
| 10               | 0.0123            | 999.65                      | 4'196                                  | 0.582                         | 1.306                                                         |
| 15               | 0.0171            | 999.05                      | 4'189                                  | 0.591                         | 1.139                                                         |
| 20               | 0.0234            | 998.16                      | 4'185                                  | 0.600                         | 1.003                                                         |
| 25               | 0.0317            | 997.00                      | 4'182                                  | 0.608                         | 0.893                                                         |
| 30               | 0.0425            | 995.61                      | 4'180                                  | 0.615                         | 0.801                                                         |
| 35               | 0.0563            | 994.00                      | 4'179                                  | 0.622                         | 0.724                                                         |
| 40               | 0.0738            | 992.18                      | 4'179                                  | 0.629                         | 0.658                                                         |
| 45               | 0.0959            | 990.18                      | 4'179                                  | 0.635                         | 0.602                                                         |
| 50               | 0.1235            | 988.01                      | 4'180                                  | 0.641                         | 0.554                                                         |
| 55               | 0.1576            | 985.67                      | 4'181                                  | 0.646                         | 0.511                                                         |
| 60               | 0.1995            | 983.18                      | 4'183                                  | 0.651                         | 0.474                                                         |
| 65               | 0.2504            | 980.53                      | 4'185                                  | 0.655                         | 0.442                                                         |
| 70               | 0.3120            | 977.75                      | 4'188                                  | 0.660                         | 0.413                                                         |
| 75               | 0.3860            | 974.83                      | 4'192                                  | 0.663                         | 0.388                                                         |
| 80               | 0.4742            | 971.78                      | 4'196                                  | 0.667                         | 0.365                                                         |
| 85               | 0.5787            | 968.60                      | 4'200                                  | 0.670                         | 0.344                                                         |
| 90               | 0.7018            | 965.30                      | 4'205                                  | 0.673                         | 0.326                                                         |
| 95               | 0.8461            | 961.89                      | 4'211                                  | 0.676                         | 0.309                                                         |
| 100              | 1.0142            | 958.35                      | 4'217                                  | 0.678                         | 0.294                                                         |
| 110              | 1.4338            | 950.95                      | 4'230                                  | 0.681                         | 0.268                                                         |
| 120              | 1.9867            | 943.11                      | 4'246                                  | 0.684                         | 0.246                                                         |
| 130              | 2.7026            | 934.83                      | 4'265                                  | 0.685                         | 0.228                                                         |
| 140              | 3.6150            | 926.13                      | 4'286                                  | 0.685                         | 0.212                                                         |
| 150              | 4.7610            | 917.01                      | 4'310                                  | 0.684                         | 0.199                                                         |
| 160              | 6.1814            | 907.45                      | 4'338                                  | 0.682                         | 0.188                                                         |
| 170              | 7.9205            | 897.45                      | 4'369                                  | 0.679                         | 0.178                                                         |
| 180              | 10.0260           | 887.01                      | 4'406                                  | 0.675                         | 0.169                                                         |
| 190              | 12.5500           | 876.08                      | 4'447                                  | 0.670                         | 0.162                                                         |
| 200              | 15.5470           | 864.67                      | 4'494                                  | 0.663                         | 0.155                                                         |

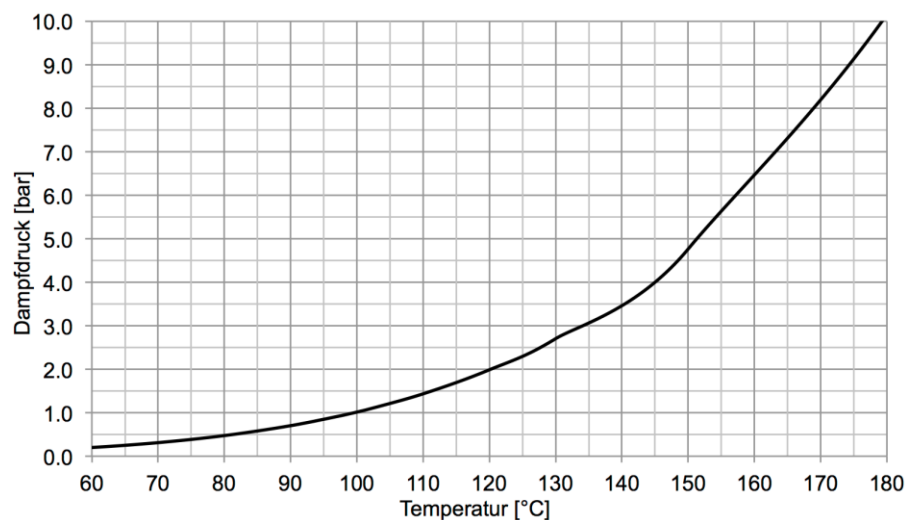


Bild 9.1 Dampfdruck von Wasser im Sättigungszustand gemäss Tabelle 9.1.

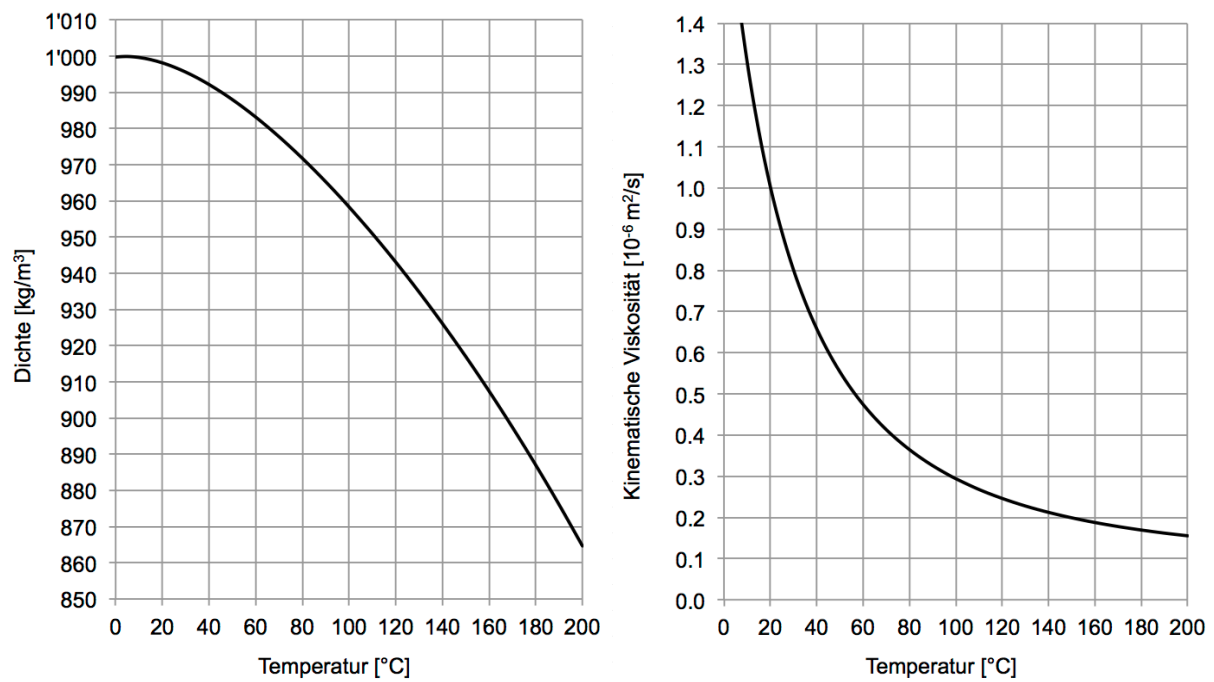


Bild 9.2 Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand gemäss Tabelle 9.1.  
Links Dichte, Rechts Kinematische Viskosität

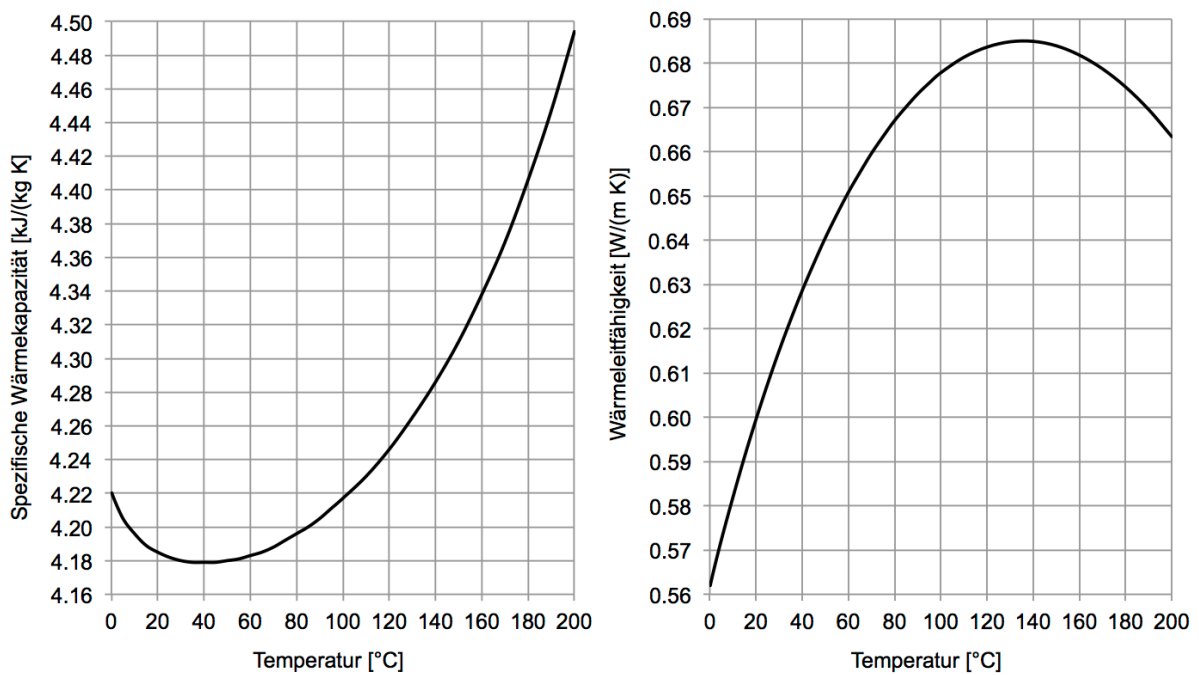


Bild 9.3 Stoffwerte von Wasser im Sättigungszustand gemäss Tabelle 9.1.  
Links Spezifische Wärmekapazität, Rechts Wärmeleitfähigkeit

## 10 Kenngrößen Rohrsysteme

### 10.1 Übertragungsleistung bei verschiedenen Temperaturspreizungen

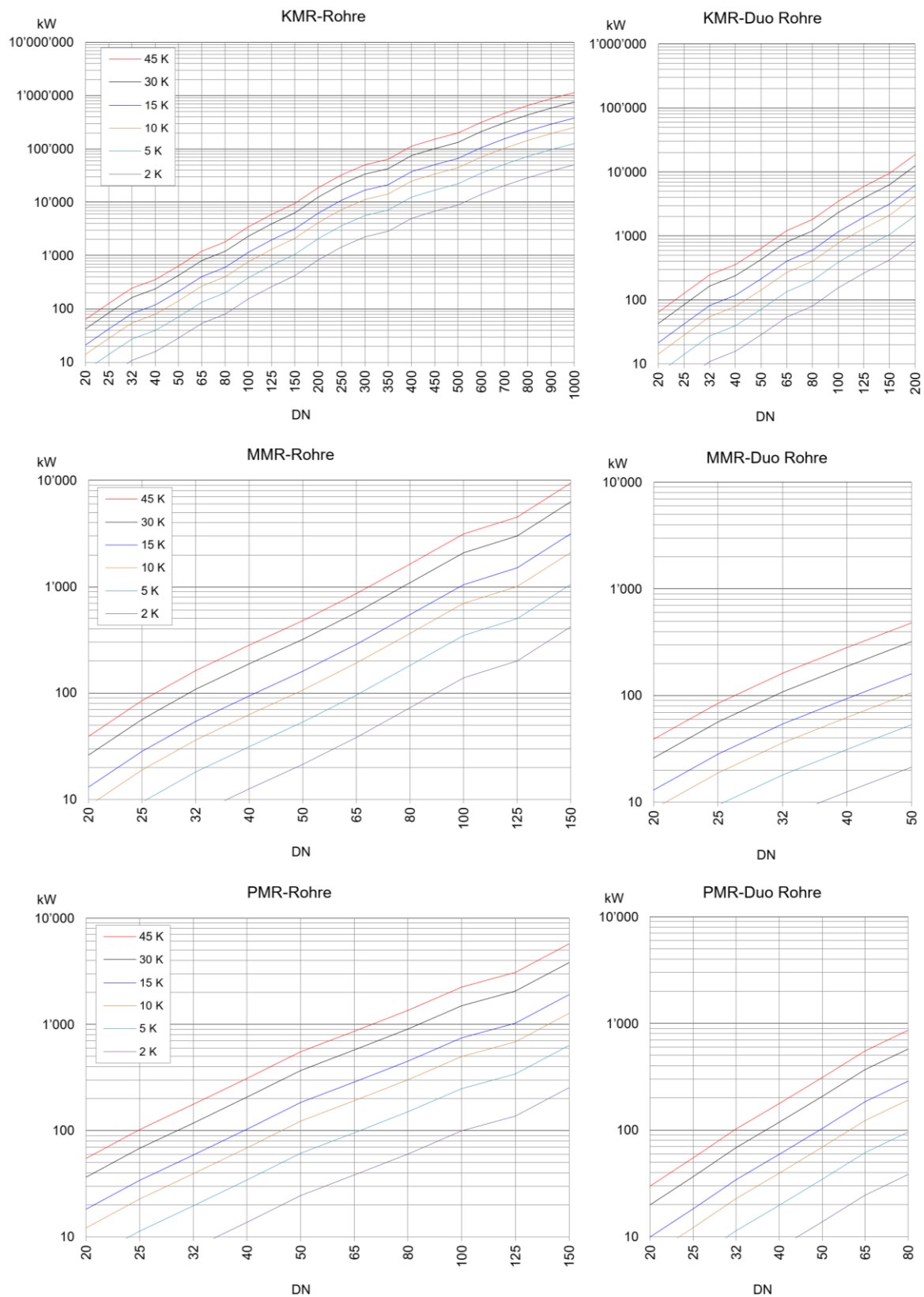


Bild 10.1 Richtwerte für mögliche Übertragungsleistungen bei Temperaturspreizungen von 2, 5, 10, 15, 30 und 45 K bei einem spezifischen Druckverlust von 300 Pa/m für die Rohrsysteme KMR, MMR (Wellrohr) und PMR.

## 10.2 R-Wert-Tafel für nahtlose Stahlrohre

Die folgenden Tabellen wurden aus dem Planungshandbuch QM-Holzheizwerke (Ausgabe 2008 [246]) entnommen und stellen den spezifischen Druckverlust pro Meter Rohrleitung (R-Wert) dar. Für jeden R-Wert wurden für die Nennweiten DN 25, DN 32, DN 40, DN 50, DN 65, DN 80, DN 100, DN 125, DN 150, DN 200 und DN 250 zusätzlich die folgenden Werte berechnet:

- Massenstrom kg/h
- mittlere Strömungsgeschwindigkeit m/s (in der Tabelle mit Geschwindigkeit bezeichnet)
- dynamischer Druck Pa (in der Tabelle mit Staudruck bezeichnet)

Die Tabellen wurden mit folgenden Konstanten berechnet:

- Wassertemperatur 70°C
- Dichte 977,7 kg/m<sup>3</sup>
- Kinematische Viskosität 4,14 E-7 m<sup>2</sup>/s
- Rohrrauheit 0,01 mm
- Rohrinneindurchmesser DIN 2448 für nahtlose Stahlrohre

Aus dem spezifischen Druckverlust der Rohrleitung pro Meter Leitungslänge (R-Wert), der folgendermassen berechnet wird,

$$R = \frac{\lambda}{d_i} \frac{\rho_w}{2} w^2$$

kann die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $w$  bestimmt werden.

$$w = \sqrt{\frac{d_i}{\lambda} \frac{2}{\rho_w} R}$$

Die Berechnung des Rohrwiderstandsbeiwertes der Rohrströmung (Lambda-Wert) erfolgte dabei iterativ nach der Gleichung von Colebrook für eine turbulente Strömung im Rohr:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{k}{d_i} \frac{1}{3.71} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

Der Massenstrom und der dynamische Druck werden mit folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\dot{m} = w \rho_w d_i^2 \frac{\pi}{4}$$

$$p_{dyn} = w^2 \frac{\rho_w}{2}$$

| Nennweite DN [mm]          |                       | 25    | 32    | 40    | 50    | 65    | 80     | 100    | 125    | 150    | 200     | 250     |
|----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Rohr-Innendurchmesser [mm] |                       | 28.5  | 37.2  | 43.1  | 54.5  | 70.3  | 82.5   | 107.1  | 131.7  | 159.3  | 206.5   | 260.4   |
| R [Pa/m]                   |                       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |         |         |
| 10                         | Massenstrom [kg/h]    | 303   | 626   | 933   | 1'759 | 3'490 | 5'363  | 10'786 | 18'731 | 31'092 | 61'957  | 114'561 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.135 | 0.164 | 0.182 | 0.214 | 0.255 | 0.285  | 0.34   | 0.391  | 0.443  | 0.526   | 0.611   |
|                            | Staudruck [Pa]        | 8.9   | 13    | 16    | 22    | 32    | 40     | 57     | 75     | 96     | 135     | 183     |
| 12                         | Massenstrom [kg/h]    | 336   | 694   | 1'034 | 1'948 | 3'864 | 5'936  | 11'930 | 20'708 | 34'360 | 68'436  | 126'485 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.15  | 0.181 | 0.201 | 0.237 | 0.283 | 0.315  | 0.376  | 0.432  | 0.49   | 0.581   | 0.675   |
|                            | Staudruck [Pa]        | 11    | 16    | 20    | 28    | 39    | 49     | 69     | 91     | 117    | 165     | 223     |
| 14                         | Massenstrom [kg/h]    | 367   | 757   | 1'128 | 2'124 | 4'211 | 6'466  | 12'989 | 22'539 | 37'385 | 74'428  | 137'511 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.164 | 0.198 | 0.22  | 0.259 | 0.308 | 0.344  | 0.41   | 0.47   | 0.533  | 0.631   | 0.734   |
|                            | Staudruck [Pa]        | 13    | 19    | 24    | 33    | 46    | 58     | 82     | 108    | 139    | 195     | 263     |
| 16                         | Massenstrom [kg/h]    | 396   | 817   | 1'216 | 2'289 | 4'535 | 6'962  | 13'980 | 24'251 | 40'214 | 80'033  | 147'821 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.177 | 0.213 | 0.237 | 0.279 | 0.332 | 0.37   | 0.441  | 0.506  | 0.573  | 0.679   | 0.789   |
|                            | Staudruck [Pa]        | 15    | 22    | 27    | 38    | 54    | 67     | 95     | 125    | 161    | 225     | 304     |
| 18                         | Massenstrom [kg/h]    | 424   | 873   | 1'299 | 2'445 | 4'842 | 7'431  | 14'916 | 25'868 | 42'884 | 85'319  | 157'540 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.189 | 0.228 | 0.253 | 0.298 | 0.354 | 0.395  | 0.47   | 0.539  | 0.611  | 0.724   | 0.84    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 17    | 25    | 31    | 43    | 61    | 76     | 108    | 142    | 183    | 256     | 345     |
| 20                         | Massenstrom [kg/h]    | 450   | 926   | 1'378 | 2'593 | 5'133 | 7'877  | 15'805 | 27'403 | 45'419 | 90'336  | 166'764 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.2   | 0.242 | 0.268 | 0.316 | 0.376 | 0.419  | 0.498  | 0.572  | 0.647  | 0.766   | 0.89    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 20    | 29    | 35    | 49    | 69    | 86     | 121    | 160    | 205    | 287     | 387     |
| 22                         | Massenstrom [kg/h]    | 475   | 977   | 1'454 | 2'734 | 5'412 | 8'302  | 16'654 | 28'868 | 47'839 | 95'124  | 175'563 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.212 | 0.255 | 0.283 | 0.333 | 0.396 | 0.441  | 0.525  | 0.602  | 0.682  | 0.807   | 0.937   |
|                            | Staudruck [Pa]        | 22    | 32    | 39    | 54    | 77    | 95     | 135    | 177    | 227    | 318     | 429     |
| 24                         | Massenstrom [kg/h]    | 499   | 1'026 | 1'527 | 2'870 | 5'679 | 8'711  | 17'468 | 30'273 | 50'157 | 99'711  | 183'992 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.222 | 0.268 | 0.297 | 0.35  | 0.416 | 0.463  | 0.551  | 0.631  | 0.715  | 0.846   | 0.982   |
|                            | Staudruck [Pa]        | 24    | 35    | 43    | 60    | 84    | 105    | 148    | 195    | 250    | 350     | 471     |
| 26                         | Massenstrom [kg/h]    | 522   | 1'074 | 1'597 | 3'001 | 5'936 | 9'103  | 18'251 | 31'624 | 52'387 | 104'121 | 192'095 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.233 | 0.281 | 0.311 | 0.365 | 0.434 | 0.484  | 0.576  | 0.66   | 0.747  | 0.883   | 1.02    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 26    | 39    | 47    | 65    | 92    | 114    | 162    | 213    | 273    | 381     | 513     |
| 28                         | Massenstrom [kg/h]    | 545   | 1'119 | 1'664 | 3'127 | 6'184 | 9'482  | 19'007 | 32'928 | 54'538 | 108'375 | 199'909 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.243 | 0.293 | 0.324 | 0.381 | 0.453 | 0.504  | 0.599  | 0.687  | 0.777  | 0.919   | 1.07    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 29    | 42    | 51    | 71    | 100   | 124    | 176    | 231    | 295    | 413     | 556     |
| 30                         | Massenstrom [kg/h]    | 566   | 1'163 | 1'730 | 3'249 | 6'424 | 9'849  | 19'738 | 34'188 | 56'618 | 112'488 | 207'462 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.252 | 0.304 | 0.337 | 0.396 | 0.47  | 0.523  | 0.622  | 0.713  | 0.807  | 0.954   | 1.11    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 31    | 45    | 55    | 77    | 108   | 134    | 189    | 249    | 318    | 445     | 599     |
| 35                         | Massenstrom [kg/h]    | 618   | 1'268 | 1'885 | 3'539 | 6'994 | 10'719 | 21'472 | 37'179 | 61'551 | 122'237 | 225'363 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.275 | 0.332 | 0.367 | 0.431 | 0.512 | 0.57   | 0.677  | 0.775  | 0.877  | 1.04    | 1.2     |
|                            | Staudruck [Pa]        | 37    | 54    | 66    | 91    | 128   | 159    | 224    | 294    | 376    | 526     | 707     |
| 40                         | Massenstrom [kg/h]    | 666   | 1'367 | 2'031 | 3'811 | 7'527 | 11'534 | 23'094 | 39'975 | 66'162 | 131'346 | 242'084 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.297 | 0.357 | 0.395 | 0.464 | 0.551 | 0.613  | 0.728  | 0.834  | 0.943  | 1.11    | 1.29    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 43    | 62    | 76    | 105   | 148   | 184    | 259    | 340    | 435    | 607     | 815     |
| 45                         | Massenstrom [kg/h]    | 712   | 1'459 | 2'168 | 4'067 | 8'030 | 12'302 | 24'624 | 42'611 | 70'508 | 139'931 | 257'837 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.317 | 0.382 | 0.422 | 0.495 | 0.588 | 0.654  | 0.777  | 0.889  | 1.01   | 1.19    | 1.38    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 49    | 71    | 87    | 120   | 169   | 209    | 295    | 386    | 494    | 689     | 925     |
| 50                         | Massenstrom [kg/h]    | 755   | 1'548 | 2'299 | 4'311 | 8'509 | 13'032 | 26'076 | 45'113 | 74'632 | 148'074 | 272'775 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.336 | 0.405 | 0.448 | 0.525 | 0.623 | 0.693  | 0.822  | 0.941  | 1.06   | 1.26    | 1.46    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 55    | 80    | 98    | 135   | 190   | 235    | 331    | 433    | 553    | 771     | 1'035   |
| 55                         | Massenstrom [kg/h]    | 796   | 1'632 | 2'423 | 4'543 | 8'965 | 13'728 | 27'461 | 47'499 | 78'565 | 155'838 | 287'015 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.355 | 0.427 | 0.472 | 0.553 | 0.656 | 0.73   | 0.866  | 0.991  | 1.12   | 1.32    | 1.53    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 61    | 89    | 109   | 150   | 210   | 260    | 367    | 480    | 613    | 854     | 1'146   |
| 60                         | Massenstrom [kg/h]    | 836   | 1'713 | 2'543 | 4'766 | 9'402 | 14'396 | 28'789 | 49'786 | 82'332 | 163'272 | 300'649 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.372 | 0.448 | 0.495 | 0.581 | 0.688 | 0.765  | 0.908  | 1.04   | 1.17   | 1.39    | 1.6     |
|                            | Staudruck [Pa]        | 68    | 98    | 120   | 165   | 232   | 286    | 403    | 527    | 673    | 938     | 1'258   |

Bild 10.2 R-Werte von 10-60 Pa/m.

| Nennweite DN [mm]          |                       | 25    | 32    | 40    | 50    | 65     | 80     | 100    | 125    | 150     | 200     | 250     |
|----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Rohr-Innendurchmesser [mm] |                       | 28.5  | 37.2  | 43.1  | 54.5  | 70.3   | 82.5   | 107.1  | 131.7  | 159.3   | 206.5   | 260.4   |
| R [Pa/m]                   |                       |       |       |       |       |        |        |        |        |         |         |         |
| 65                         | Massenstrom [kg/h]    | 874   | 1'791 | 2'658 | 4'981 | 9'823  | 15'038 | 30'065 | 51'983 | 85'953  | 170'417 | 313'748 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.389 | 0.468 | 0.518 | 0.607 | 0.719  | 0.799  | 0.948  | 1.08   | 1.23    | 1.45    | 1.67    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 74    | 107   | 131   | 180   | 253    | 312    | 439    | 575    | 734     | 1'022   | 1'370   |
| 70                         | Massenstrom [kg/h]    | 911   | 1'866 | 2'769 | 5'188 | 10'229 | 15'657 | 31'296 | 54'103 | 89'443  | 177'303 | 326'373 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.406 | 0.488 | 0.539 | 0.632 | 0.749  | 0.832  | 0.987  | 1.13   | 1.28    | 1.5     | 1.74    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 81    | 116   | 142   | 195   | 274    | 339    | 476    | 622    | 795     | 1'106   | 1'482   |
| 75                         | Massenstrom [kg/h]    | 947   | 1'939 | 2'877 | 5'388 | 10'622 | 16'256 | 32'486 | 56'152 | 92'818  | 183'959 | 338'572 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.422 | 0.507 | 0.56  | 0.656 | 0.777  | 0.864  | 1.02   | 1.17   | 1.32    | 1.56    | 1.81    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 87    | 126   | 153   | 211   | 295    | 365    | 513    | 670    | 856     | 1'191   | 1'595   |
| 80                         | Massenstrom [kg/h]    | 982   | 2'009 | 2'981 | 5'583 | 11'002 | 16'836 | 33'640 | 58'137 | 96'087  | 190'405 | 350'386 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.437 | 0.525 | 0.581 | 0.68  | 0.805  | 0.895  | 1.06   | 1.21   | 1.37    | 1.62    | 1.87    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 93    | 135   | 165   | 226   | 317    | 391    | 550    | 719    | 917     | 1'275   | 1'708   |
| 85                         | Massenstrom [kg/h]    | 1'016 | 2'078 | 3'083 | 5'771 | 11'372 | 17'400 | 34'759 | 60'064 | 99'259  | 196'662 | 361'850 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.452 | 0.543 | 0.6   | 0.703 | 0.832  | 0.925  | 1.1    | 1.25   | 1.41    | 1.67    | 1.93    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 100   | 144   | 176   | 242   | 339    | 418    | 587    | 767    | 979     | 1'361   | 1'822   |
| 90                         | Massenstrom [kg/h]    | 1'049 | 2'145 | 3'181 | 5'955 | 11'731 | 17'948 | 35'849 | 61'938 | 102'345 | 202'744 | 372'994 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.467 | 0.561 | 0.62  | 0.725 | 0.859  | 0.954  | 1.13   | 1.29   | 1.46    | 1.72    | 1.99    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 107   | 154   | 188   | 257   | 360    | 445    | 625    | 816    | 1'041   | 1'446   | 1'936   |
| 95                         | Massenstrom [kg/h]    | 1'081 | 2'210 | 3'277 | 6'134 | 12'082 | 18'482 | 36'909 | 63'763 | 105'349 | 208'666 | 383'843 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.481 | 0.578 | 0.638 | 0.747 | 0.884  | 0.982  | 1.16   | 1.33   | 1.5     | 1.77    | 2.05    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 113   | 163   | 199   | 273   | 382    | 472    | 662    | 865    | 1'102   | 1'532   | 2'050   |
| 100                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'112 | 2'273 | 3'371 | 6'308 | 12'424 | 19'003 | 37'944 | 65'542 | 108'279 | 214'441 | 394'420 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.495 | 0.594 | 0.656 | 0.768 | 0.909  | 1.01   | 1.2    | 1.37   | 1.54    | 1.82    | 2.1     |
|                            | Staudruck [Pa]        | 120   | 173   | 211   | 289   | 404    | 499    | 700    | 913    | 1'165   | 1'618   | 2'164   |
| 110                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'172 | 2'396 | 3'552 | 6'646 | 13'084 | 20'009 | 39'942 | 68'979 | 113'935 | 225'587 | 414'836 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.522 | 0.626 | 0.692 | 0.809 | 0.958  | 1.06   | 1.26   | 1.44   | 1.62    | 1.91    | 2.21    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 133   | 192   | 234   | 320   | 448    | 553    | 776    | 1'012  | 1'290   | 1'790   | 2'394   |
| 120                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'230 | 2'514 | 3'726 | 6'969 | 13'716 | 20'974 | 41'856 | 72'270 | 119'350 | 236'257 | 434'373 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.548 | 0.657 | 0.726 | 0.849 | 1      | 1.11   | 1.32   | 1.51   | 1.7     | 2       | 2.32    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 147   | 211   | 257   | 352   | 493    | 607    | 852    | 1'111  | 1'415   | 1'964   | 2'625   |
| 130                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'286 | 2'627 | 3'893 | 7'280 | 14'325 | 21'900 | 43'695 | 75'433 | 124'553 | 246'505 | 453'137 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.573 | 0.687 | 0.758 | 0.887 | 1.05   | 1.16   | 1.38   | 1.57   | 1.78    | 2.09    | 2.42    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 160   | 230   | 281   | 384   | 537    | 662    | 928    | 1'210  | 1'541   | 2'138   | 2'857   |
| 140                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'340 | 2'736 | 4'055 | 7'580 | 14'911 | 22'794 | 45'468 | 78'481 | 129'567 | 256'381 | 471'214 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.597 | 0.715 | 0.79  | 0.923 | 1.09   | 1.21   | 1.43   | 1.64   | 1.85    | 2.17    | 2.51    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 174   | 250   | 305   | 417   | 582    | 717    | 1'005  | 1'310  | 1'668   | 2'312   | 3'089   |
| 150                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'392 | 2'842 | 4'211 | 7'870 | 15'478 | 23'658 | 47'182 | 81'426 | 134'412 | 265'921 | 488'675 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.62  | 0.743 | 0.82  | 0.958 | 1.13   | 1.26   | 1.49   | 1.7    | 1.92    | 2.26    | 2.61    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 188   | 270   | 329   | 449   | 627    | 773    | 1'082  | 1'410  | 1'795   | 2'488   | 3'322   |
| 160                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'443 | 2'944 | 4'362 | 8'151 | 16'028 | 24'495 | 48'842 | 84'279 | 139'104 | 275'158 | 505'581 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.642 | 0.77  | 0.849 | 0.993 | 1.17   | 1.3    | 1.54   | 1.76   | 1.98    | 2.33    | 2.7     |
|                            | Staudruck [Pa]        | 202   | 290   | 353   | 482   | 673    | 829    | 1'160  | 1'510  | 1'922   | 2'664   | 3'556   |
| 170                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'492 | 3'044 | 4'509 | 8'423 | 16'561 | 25'307 | 50'453 | 87'048 | 143'657 | 284'120 | 521'980 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.664 | 0.796 | 0.878 | 1.03  | 1.21   | 1.35   | 1.59   | 1.82   | 2.05    | 2.41    | 2.78    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 216   | 309   | 377   | 514   | 718    | 884    | 1'238  | 1'611  | 2'050   | 2'840   | 3'791   |
| 180                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'539 | 3'140 | 4'652 | 8'689 | 17'080 | 26'097 | 52'019 | 89'739 | 148'082 | 292'830 | 537'917 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.686 | 0.821 | 0.906 | 1.06  | 1.25   | 1.39   | 1.64   | 1.87   | 2.11    | 2.48    | 2.87    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 230   | 329   | 401   | 547   | 764    | 940    | 1'316  | 1'712  | 2'178   | 3'017   | 4'026   |
| 190                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'586 | 3'235 | 4'791 | 8'947 | 17'586 | 26'866 | 53'545 | 92'359 | 152'390 | 301'309 | 553'429 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.706 | 0.846 | 0.933 | 1.09  | 1.29   | 1.43   | 1.69   | 1.93   | 2.17    | 2.56    | 2.95    |
|                            | Staudruck [Pa]        | 244   | 350   | 425   | 580   | 810    | 997    | 1'394  | 1'814  | 2'307   | 3'194   | 4'261   |

Bild 10.3 R-Werte von 65-190 Pa/m.

| Nennweite DN [mm]          |                       | 25    | 32    | 40     | 50     | 65     | 80     | 100     | 125     | 150     | 200     | 250       |
|----------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Rohr-Innendurchmesser [mm] |                       | 28.5  | 37.2  | 43.1   | 54.5   | 70.3   | 82.5   | 107.1   | 131.7   | 159.3   | 206.5   | 260.4     |
| R [Pa/m]                   |                       |       |       |        |        |        |        |         |         |         |         |           |
| 200                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'631 | 3'327 | 4'927  | 9'200  | 18'078 | 27'617 | 55'032  | 94'914  | 156'590 | 309'574 | 568'549   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.727 | 0.87  | 0.959  | 1.12   | 1.32   | 1.47   | 1.74    | 1.98    | 2.23    | 2.63    | 3.03      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 258   | 370   | 450    | 614    | 856    | 1'053  | 1'472   | 1'916   | 2'436   | 3'372   | 4'497     |
| 220                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'719 | 3'504 | 5'189  | 9'687  | 19'030 | 29'066 | 57'903  | 99'846  | 164'696 | 325'524 | 597'722   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.766 | 0.916 | 1.01   | 1.18   | 1.39   | 1.54   | 1.83    | 2.08    | 2.35    | 2.76    | 3.19      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 287   | 410   | 499    | 680    | 949    | 1'167  | 1'630   | 2'120   | 2'695   | 3'728   | 4'971     |
| 240                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'803 | 3'675 | 5'440  | 10'153 | 19'941 | 30'453 | 60'651  | 104'565 | 172'453 | 340'783 | 625'628   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.803 | 0.961 | 1.06   | 1.24   | 1.46   | 1.62   | 1.91    | 2.18    | 2.46    | 2.89    | 3.34      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 315   | 451   | 549    | 748    | 1'042  | 1'281  | 1'789   | 2'325   | 2'954   | 4'086   | 5'446     |
| 260                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'884 | 3'839 | 5'682  | 10'602 | 20'817 | 31'786 | 63'292  | 109'099 | 179'903 | 355'435 | 652'420   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.839 | 1     | 1.11   | 1.29   | 1.52   | 1.69   | 2       | 2.28    | 2.56    | 3.02    | 3.48      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 344   | 492   | 599    | 815    | 1'135  | 1'395  | 1'948   | 2'531   | 3'215   | 4'444   | 5'922     |
| 280                        | Massenstrom [kg/h]    | 1'962 | 3'997 | 5'915  | 11'034 | 21'662 | 33'070 | 65'836  | 113'467 | 187'080 | 369'548 | 678'223   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.874 | 1.04  | 1.15   | 1.34   | 1.59   | 1.76   | 2.08    | 2.37    | 2.67    | 3.13    | 3.62      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 373   | 534   | 649    | 883    | 1'229  | 1'510  | 2'107   | 2'738   | 3'477   | 4'804   | 6'400     |
| 300                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'038 | 4'149 | 6'140  | 11'452 | 22'477 | 34'311 | 68'294  | 117'686 | 194'012 | 383'177 | 703'139   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.908 | 1.08  | 1.2    | 1.39   | 1.65   | 1.82   | 2.15    | 2.45    | 2.77    | 3.25    | 3.75      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 403   | 575   | 699    | 951    | 1'323  | 1'626  | 2'268   | 2'945   | 3'739   | 5'165   | 6'879     |
| 350                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'217 | 4'512 | 6'674  | 12'443 | 24'410 | 37'251 | 74'114  | 127'673 | 210'417 | 415'427 | 762'085   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 0.987 | 1.18  | 1.3    | 1.52   | 1.79   | 1.98   | 2.34    | 2.66    | 3       | 3.52    | 4.07      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 477   | 680   | 826    | 1'123  | 1'561  | 1'916  | 2'671   | 3'466   | 4'398   | 6'071   | 8'080     |
| 400                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'385 | 4'850 | 7'173  | 13'367 | 26'214 | 39'995 | 79'543  | 136'989 | 225'716 | 445'494 | 817'029   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.06  | 1.27  | 1.4    | 1.63   | 1.92   | 2.13   | 2.51    | 2.86    | 3.22    | 3.78    | 4.36      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 551   | 786   | 954    | 1'296  | 1'800  | 2'209  | 3'076   | 3'990   | 5'061   | 6'982   | 9'287     |
| 450                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'542 | 5'169 | 7'643  | 14'238 | 27'912 | 42'577 | 84'653  | 145'754 | 240'107 | 473'771 | 868'692   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.13  | 1.35  | 1.49   | 1.73   | 2.04   | 2.26   | 2.67    | 3.04    | 3.42    | 4.02    | 4.63      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 627   | 893   | 1'083  | 1'470  | 2'041  | 2'503  | 3'484   | 4'517   | 5'727   | 7'897   | 10'499    |
| 500                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'692 | 5'471 | 8'089  | 15'064 | 29'522 | 45'025 | 89'493  | 154'056 | 253'737 | 500'545 | 917'603   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.2   | 1.43  | 1.58   | 1.83   | 2.16   | 2.39   | 2.82    | 3.21    | 3.62    | 4.25    | 4.9       |
|                            | Staudruck [Pa]        | 703   | 1'000 | 1'213  | 1'645  | 2'283  | 2'799  | 3'894   | 5'047   | 6'396   | 8'814   | 11'715    |
| 550                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'835 | 5'760 | 8'514  | 15'851 | 31'056 | 47'356 | 94'104  | 161'962 | 266'715 | 526'035 | 964'162   |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.26  | 1.51  | 1.66   | 1.93   | 2.27   | 2.52   | 2.97    | 3.38    | 3.8     | 4.46    | 5.14      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 779   | 1'108 | 1'344  | 1'822  | 2'526  | 3'097  | 4'306   | 5'578   | 7'067   | 9'735   | 12'933    |
| 600                        | Massenstrom [kg/h]    | 2'972 | 6'036 | 8'920  | 16'604 | 32'524 | 49'587 | 98'514  | 169'524 | 279'127 | 550'410 | 1'008'679 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.32  | 1.58  | 1.74   | 2.02   | 2.38   | 2.64   | 3.11    | 3.54    | 3.98    | 4.67    | 5.38      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 856   | 1'217 | 1'475  | 1'999  | 2'771  | 3'396  | 4'719   | 6'111   | 7'740   | 10'658  | 14'155    |
| 650                        | Massenstrom [kg/h]    | 3'103 | 6'301 | 9'311  | 17'328 | 33'934 | 51'730 | 102'749 | 176'784 | 291'042 | 573'806 | 1'051'402 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.38  | 1.65  | 1.81   | 2.11   | 2.48   | 2.75   | 3.24    | 3.69    | 4.15    | 4.87    | 5.61      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 934   | 1'326 | 1'607  | 2'177  | 3'016  | 3'695  | 5'133   | 6'645   | 8'414   | 11'583  | 15'380    |
| 700                        | Massenstrom [kg/h]    | 3'230 | 6'557 | 9'688  | 18'025 | 35'292 | 53'793 | 106'828 | 183'776 | 302'515 | 596'332 | 1'092'534 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.44  | 1.71  | 1.89   | 2.2    | 2.58   | 2.86   | 3.37    | 3.83    | 4.31    | 5.06    | 5.83      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 1'012 | 1'436 | 1'740  | 2'356  | 3'262  | 3'996  | 5'549   | 7'181   | 9'091   | 12'511  | 16'607    |
| 750                        | Massenstrom [kg/h]    | 3'353 | 6'804 | 10'052 | 18'699 | 36'603 | 55'787 | 110'767 | 190'527 | 313'592 | 618'078 | 1'132'239 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.49  | 1.78  | 1.96   | 2.28   | 2.68   | 2.96   | 3.49    | 3.97    | 4.47    | 5.24    | 6.04      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 1'090 | 1'547 | 1'873  | 2'535  | 3'509  | 4'298  | 5'965   | 7'719   | 9'769   | 13'440  | 17'836    |
| 800                        | Massenstrom [kg/h]    | 3'471 | 7'044 | 10'404 | 19'351 | 37'874 | 57'716 | 114'579 | 197'061 | 324'312 | 639'122 | 1'170'658 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.55  | 1.84  | 2.03   | 2.36   | 2.77   | 3.07   | 3.61    | 4.11    | 4.62    | 5.42    | 6.25      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 1'168 | 1'657 | 2'007  | 2'715  | 3'757  | 4'600  | 6'383   | 8'257   | 10'448  | 14'370  | 19'067    |
| 850                        | Massenstrom [kg/h]    | 3'587 | 7'276 | 10'746 | 19'984 | 39'106 | 59'588 | 118'277 | 203'398 | 334'708 | 659'527 | 1'207'908 |
|                            | Geschwindigkeit [m/s] | 1.6   | 1.9   | 2.09   | 2.43   | 2.86   | 3.17   | 3.73    | 4.24    | 4.77    | 5.59    | 6.44      |
|                            | Staudruck [Pa]        | 1'247 | 1'768 | 2'141  | 2'896  | 4'005  | 4'903  | 6'802   | 8'797   | 11'129  | 15'303  | 20'299    |

Bild 10.4 R-Werte von 200-850 Pa/m.

### 10.3 Abmessungen und spezifische Wärmeverluste für KMR-, MMR- und PMR-Rohre

Die folgenden Tabellenwerte und Diagramme dienen als grobe Übersicht zu verfügbaren Rohrsystemen und Nennweiten sowie für eine erste überschlagsmässige Abschätzung der zu erwartenden Wärmeverluste.

Für die Erstellung der folgenden Tabellen wurden Daten von Brugg Rohrsystem AG, Isoplus und Logstor (Kingspan) verwendet. Die Liste der Hersteller ist nicht abschliessend und es wird keine Haftung für die Richtigkeit der Werte abgegeben. Es liegt in der Verantwortung des Bauherren und Planers die projektspezifischen Werte für das jeweilig eingesetzte Rohrsystem zu erheben und die Rohrsysteme vorschriftsmässig einzusetzen (Stichwort MuKEn [38]).

Tabelle 10.1 Kunststoffverbundmantelrohr **KMR**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN1000.

| Nennweite | Medium-Innenrohr  |            |                  |                   | Aussendurchmesser Mantelrohr (DS = Dämmstärke) |      |      | Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter |         |         |
|-----------|-------------------|------------|------------------|-------------------|------------------------------------------------|------|------|--------------------------------------------|---------|---------|
|           | Aussendurchmesser | Wandstärke | Innendurchmesser | Volumen Innenrohr | DS1                                            | DS2  | DS3  | DS1                                        | DS2     | DS3     |
| DN        | mm                | mm         | mm               | l/m               | mm                                             | mm   | mm   | W/(m K)                                    | W/(m K) | W/(m K) |
| 20        | 26.9              | 2.65       | 21.60            | 0.37              | 90                                             | 110  | 125  | 0.256                                      | 0.223   | 0.206   |
| 25        | 33.7              | 2.60       | 28.50            | 0.64              | 90                                             | 110  | 125  | 0.308                                      | 0.262   | 0.239   |
| 32        | 42.4              | 2.60       | 37.20            | 1.09              | 110                                            | 125  | 140  | 0.318                                      | 0.285   | 0.261   |
| 40        | 48.3              | 2.60       | 43.10            | 1.46              | 110                                            | 125  | 140  | 0.363                                      | 0.320   | 0.290   |
| 50        | 60.3              | 2.90       | 54.50            | 2.33              | 125                                            | 140  | 160  | 0.405                                      | 0.358   | 0.315   |
| 65        | 76.1              | 2.90       | 70.30            | 3.88              | 140                                            | 160  | 180  | 0.474                                      | 0.402   | 0.354   |
| 80        | 88.9              | 3.20       | 82.50            | 5.35              | 160                                            | 180  | 200  | 0.492                                      | 0.422   | 0.374   |
| 100       | 114.3             | 3.60       | 107.10           | 9.01              | 200                                            | 225  | 250  | 0.518                                      | 0.441   | 0.389   |
| 125       | 139.7             | 3.60       | 132.50           | 13.79             | 225                                            | 250  | 280  | 0.596                                      | 0.505   | 0.434   |
| 150       | 168.3             | 4.00       | 160.30           | 20.18             | 250                                            | 280  | 315  | 0.699                                      | 0.570   | 0.478   |
| 200       | 219.1             | 4.50       | 210.10           | 34.67             | 315                                            | 355  | 400  | 0.760                                      | 0.603   | 0.499   |
| 250       | 273.0             | 5.00       | 263.00           | 54.33             | 400                                            | 450  | 500  | 0.739                                      | 0.591   | 0.501   |
| 300       | 323.9             | 5.60       | 312.70           | 76.80             | 450                                            | 500  | 580  | 0.841                                      | 0.670   | 0.521   |
| 350       | 355.6             | 5.60       | 344.40           | 93.16             | 500                                            | 560  | 630  | 0.821                                      | 0.648   | 0.531   |
| 400       | 406.4             | 6.30       | 393.80           | 121.80            | 560                                            | 630  | 730  | 0.869                                      | 0.671   | 0.522   |
| 450       | 457.2             | 6.30       | 444.60           | 155.25            | 630                                            | 670  | 800  | 0.875                                      | 0.757   | 0.545   |
| 500       | 508.0             | 6.30       | 495.40           | 192.75            | 710                                            | 800  | 900  | 0.849                                      | 0.656   | 0.536   |
| 600       | 610.0             | 7.10       | 595.80           | 278.80            | 800                                            | 900  | 1000 | 1.016                                      | 0.754   | 0.613   |
| 700       | 711.0             | 8.00       | 695.00           | 379.37            | 900                                            | 1000 | 1100 | 1.144                                      | 0.848   | 0.687   |
| 800       | 813.0             | 8.80       | 795.40           | 496.89            | 1000                                           | 1100 | 1200 | 1.275                                      | 0.943   | 0.761   |
| 900       | 914.0             | 10.00      | 894.00           | 627.72            | 1100                                           | 1200 | —    | 1.397                                      | 1.033   | —       |
| 1000      | 1016.0            | 11.00      | 994.00           | 776.00            | 1200                                           | 1300 | —    | 1.523                                      | 1.124   | —       |

Tabelle 10.2 Kunststoffverbundmantelrohr **KMR-Duo**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN200.

| Nennweite | Medium-Innenrohr  |            |                  |                   | Aussendurchmesser Mantelrohr (DS = Dämmstärke) |     |     | Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter |         |         |
|-----------|-------------------|------------|------------------|-------------------|------------------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------------|---------|---------|
|           | Aussendurchmesser | Wandstärke | Innendurchmesser | Volumen Innenrohr | DS1                                            | DS2 | DS3 | DS1                                        | DS2     | DS3     |
| DN        | mm                | mm         | mm               | l/m               | mm                                             | mm  | mm  | W/(m K)                                    | W/(m K) | W/(m K) |
| 20        | 26.9              | 2.60       | 21.70            | 0.37              | 125                                            | 140 | 160 | 0.174                                      | 0.154   | 0.135   |
| 25        | 33.7              | 2.60       | 28.50            | 0.64              | 140                                            | 160 | 180 | 0.195                                      | 0.165   | 0.147   |
| 32        | 42.4              | 2.60       | 37.20            | 1.09              | 160                                            | 180 | 200 | 0.216                                      | 0.184   | 0.163   |
| 40        | 48.3              | 2.60       | 43.10            | 1.46              | 160                                            | 180 | 200 | 0.263                                      | 0.216   | 0.187   |
| 50        | 60.3              | 2.90       | 54.50            | 2.33              | 200                                            | 225 | 250 | 0.254                                      | 0.211   | 0.184   |
| 65        | 76.1              | 2.90       | 70.30            | 3.88              | 225                                            | 250 | 280 | 0.312                                      | 0.253   | 0.212   |
| 80        | 88.9              | 3.20       | 82.50            | 5.35              | 250                                            | 280 | 315 | 0.363                                      | 0.278   | 0.226   |
| 100       | 114.3             | 3.60       | 107.10           | 9.01              | 315                                            | 355 | 400 | 0.362                                      | 0.275   | 0.224   |
| 125       | 139.7             | 3.60       | 132.50           | 13.79             | 400                                            | 450 | 500 | 0.331                                      | 0.258   | 0.218   |
| 150       | 168.3             | 4.00       | 160.30           | 20.18             | 450                                            | 500 | 560 | 0.413                                      | 0.310   | 0.248   |
| 200       | 219.1             | 4.50       | 210.10           | 34.67             | 560                                            | 630 | 710 | 0.473                                      | 0.328   | 0.257   |

Tabelle 10.3 Metallmediumrohr **MMR**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN150.

| Nennweite | Medium-Innenrohr   |            |                   |                   | Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke) |           | Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter |           |
|-----------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----------|
|           | Aussen-durchmesser | Wandstärke | Innen-durchmesser | Volumen Innenrohr | Standard                                  | Verstärkt | Standard                                   | Verstärkt |
| DN        | mm                 | mm         | mm                | l/m               | mm                                        | mm        | W/(m K)                                    | W/(m K)   |
| 20        | 25.5               | 0.3        | 22.00             | 0.38              | –                                         | 91.0      | –                                          | 0.221     |
| 25        | 34.0               | 0.3        | 30.00             | 0.71              | –                                         | 111       | –                                          | 0.239     |
| 32        | 43.8               | 0.4        | 38.90             | 1.19              | –                                         | 126       | –                                          | 0.264     |
| 40        | 54.5               | 0.5        | 48.50             | 1.85              | –                                         | 126       | –                                          | 0.319     |
| 50        | 66.5               | 0.5        | 60.00             | 2.83              | –                                         | 142       | –                                          | 0.351     |
| 65        | 85.6               | 0.60       | 75.80             | 4.51              | –                                         | 162       | –                                          | 0.394     |
| 80        | 109.2              | 0.80       | 98.00             | 7.54              | 162.0                                     | 182.0     | 0.562                                      | 0.473     |
| 100       | 142.9              | 0.90       | 127.00            | 12.67             | –                                         | 202       | –                                          | 0.607     |
| 125       | 147.0              | 1.00       | 147.00            | 16.97             | –                                         | 220       | –                                          | 0.684     |
| 150       | 197.5              | 1.20       | 197.50            | 30.64             | –                                         | 310       | –                                          | 0.635     |

Tabelle 10.4 Metallmediumrohr **MMR-Duo**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN50

| Nennweite | Medium-Innenrohr   |            |                   |                   | Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke) |           | Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter |           |
|-----------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----------|
|           | Aussen-durchmesser | Wandstärke | Innen-durchmesser | Volumen Innenrohr | Standard                                  | Verstärkt | Standard                                   | Verstärkt |
| DN        | mm                 | mm         | mm                | l/m               | mm                                        | mm        | W/(m K)                                    | W/(m K)   |
| 20        | 25.5               | 0.3        | 22.00             | 0.38              | 111                                       | –         | 0.170                                      | –         |
| 25        | 34.0               | 0.3        | 30.00             | 0.71              | 126                                       | –         | 0.210                                      | –         |
| 32        | 43.8               | 0.4        | 38.90             | 1.19              | 142                                       | –         | 0.250                                      | –         |
| 40        | 54.5               | 0.5        | 48.50             | 1.85              | 162                                       | –         | 0.280                                      | –         |
| 50        | 66.5               | 0.5        | 60.00             | 2.83              | 182                                       | –         | 0.290                                      | –         |

Tabelle 10.5 Kunststoffmediumrohr **PMR**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN150.

| Nennweite | Medium-Innenrohr   |            |                   |                   | Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke) |           | Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter |           |
|-----------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----------|
|           | Aussen-durchmesser | Wandstärke | Innen-durchmesser | Volumen Innenrohr | Standard                                  | Verstärkt | Standard                                   | Verstärkt |
| DN        | mm                 | mm         | mm                | l/m               | mm                                        | mm        | W/(m K)                                    | W/(m K)   |
| 20        | 25.0               | 2.30       | 20.40             | 0.33              | 75                                        | 90        | 0.238                                      | 0.212     |
| 25        | 32.0               | 2.90       | 26.20             | 0.54              | 75                                        | 90        | 0.289                                      | 0.251     |
| 32        | 40.0               | 3.70       | 32.60             | 0.83              | 90                                        | 110       | 0.299                                      | 0.255     |
| 40        | 50.0               | 4.60       | 40.80             | 1.31              | 110                                       | 125       | 0.307                                      | 0.276     |
| 50        | 63.0               | 5.80       | 51.40             | 2.07              | 125                                       | 140       | 0.340                                      | 0.306     |
| 65        | 75.0               | 6.80       | 61.40             | 2.96              | 140                                       | 160       | 0.365                                      | 0.320     |
| 80        | 90.0               | 8.20       | 73.60             | 4.25              | 160                                       | 180       | 0.386                                      | 0.342     |
| 100       | 110.0              | 10.00      | 90.00             | 6.36              | 180                                       | 200       | 0.429                                      | 0.380     |
| 125       | 125.0              | 11.40      | 102.20            | 8.20              | 180                                       | 200       | 0.511                                      | 0.442     |
| 150       | 160.0              | 14.60      | 130.80            | 13.44             | 250                                       | –         | 0.460                                      | –         |

Tabelle 10.6 Kunststoffmediumrohr **PMR-Duo**: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20 – DN80.

| Nennweite | Medium-Innenrohr   |            |                   |                   | Aussendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke) |           | Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter |           |
|-----------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----------|
|           | Aussen-durchmesser | Wandstärke | Innen-durchmesser | Volumen Innenrohr | Standard                                  | Verstärkt | Standard                                   | Verstärkt |
| DN        | mm                 | mm         | mm                | l/m               | mm                                        | mm        | W/(m K)                                    | W/(m K)   |
| 20        | 20.0               | 2.00       | 16.00             | 0.20              | 75                                        | 90        | 0.174                                      | 0.139     |
| 25        | 25.0               | 2.30       | 20.40             | 0.33              | 90                                        | 110       | 0.177                                      | 0.139     |
| 32        | 32.0               | 2.90       | 26.20             | 0.54              | 110                                       | 125       | 0.190                                      | 0.159     |
| 40        | 40.0               | 3.70       | 32.60             | 0.83              | 125                                       | 140       | 0.215                                      | 0.179     |
| 50        | 50.0               | 4.60       | 40.80             | 1.31              | 160                                       | 180       | 0.200                                      | 0.169     |
| 65        | 63.0               | 5.80       | 51.40             | 2.07              | 180                                       | 200       | 0.240                                      | 0.199     |
| 80        | 75.0               | 6.80       | 61.40             | 2.96              | 200                                       | –         | 0.275                                      | –         |

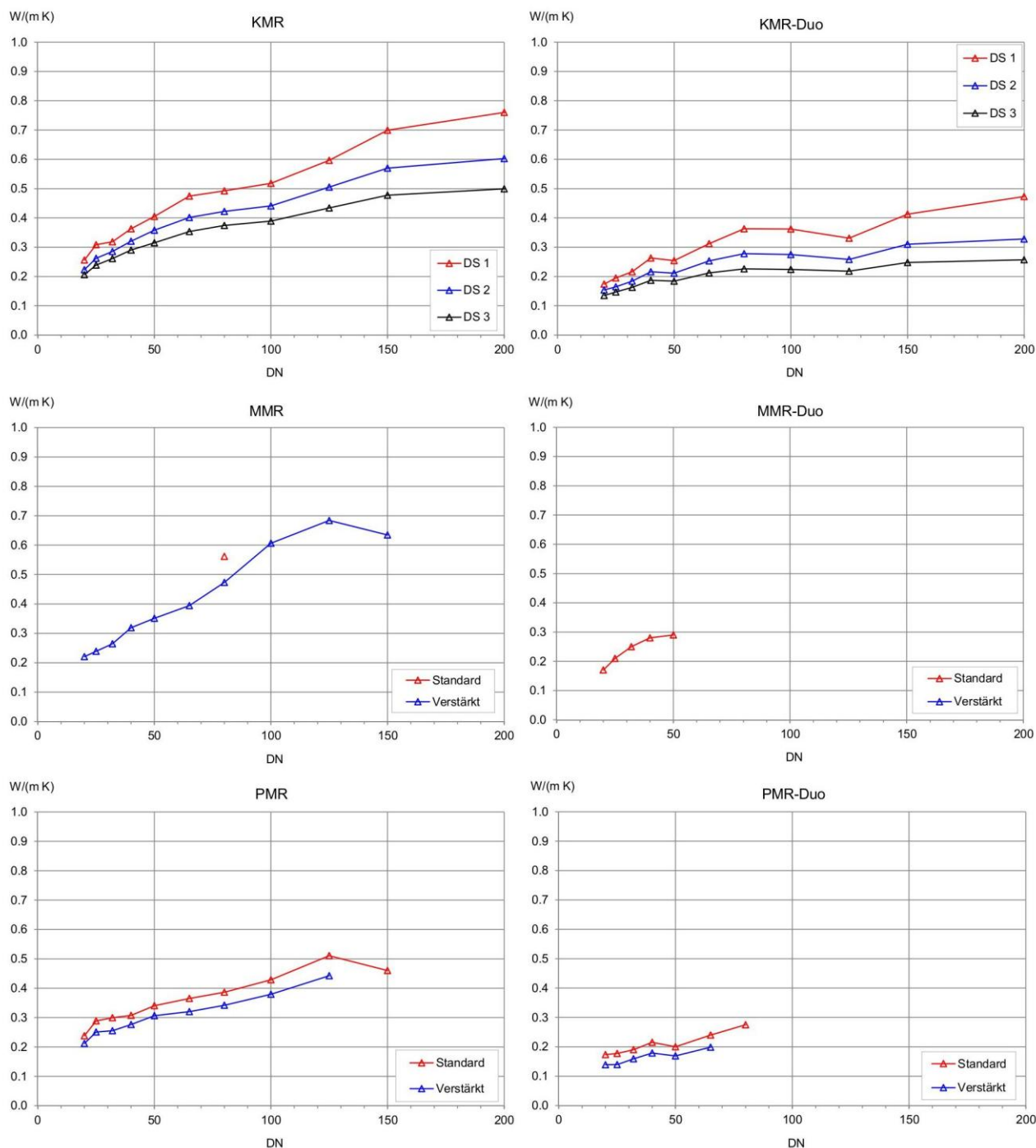


Bild 10.5

Spezifische Wärmeverluste pro Trassenmeter Rohrleitung DN 20 bis DN 200 für KMR-, MMR- und PMR-Leitungen gemäss Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.6. Auf der rechten Seite sind jeweils die gängigen Doppelrohr-Ausführungen aufgeführt.

Die Wärmeverluste bei den Einzelrohren wurden gemäss Kapitel 4.7.3 und nachfolgend aufgeführten Parameter berechnet. Die Angaben zu den Doppelrohr-Ausführungen wurden den Produktinformationen folgender Firmen entnommen: Brugg Rohrsystem AG, Isoplus und Logstor (Kingspan). Die Liste der Hersteller ist nicht abschliessend und es wird keine Haftung für die Richtigkeit der Werte abgegeben.

Parameter für die Berechnung der Wärmeverluste bei den Einzelrohren:

- Wärmeleitfähigkeit Boden  $\lambda_{Bo} = 1.2 \text{ W/(m K)}$
- Wärmeleitfähigkeit Dämmmaterial  $\lambda_D = 0.027 \text{ W/(m K)}$
- mittlere Überdeckungshöhe  $h_U = 0.8 \text{ m}$
- lichter Rohrabstand  $a = 0.2 \text{ m}$ .

## 11 Richtpreise Leitungsbau

Die Richtpreise der Kosten für den Leitungsbau wurden erhoben und widerspiegeln die Preissituation mit Stand 2025. Das zur Verfügung gestellte Zahlenmaterial stammt von Hersteller/Lieferanten von Rohrsystemen, Planungsbüros, Energieversorgungsunternehmen und Leitungsbaufirmen. Für die erhobenen Richtpreise wird keine Gewähr abgegeben. Nichtsdestotrotz, sollen die aktualisierten Richtpreise dabei helfen, in einem frühen Planungsstand (Vorstudie, Machbarkeitsstudie) eine gute Kostenschätzung für das Verteilnetz zu erhalten.

Die Richtpreise beinhalten alle aufgeführten Leistungen gemäss Zusammenstellung in Tabelle 11.1 und umfassen grundsätzlich alle anfallenden Arbeiten für den Bau des Verteilnetzes (Material, Verlegung, Tiefbau etc.). Je nach Rohrsystem, Verlegemethode und Verlegesituation treffen nicht alle der Tabelle 11.1 aufgeführten Leistungen zu oder sind andere zu ergänzen (bei PMR müssen zum Beispiel keine Schweissnähte kontrolliert werden).

Tabelle 11.1 Zusammenstellung der inbegriffenen Leistungen für die erhobenen Richtpreise. Je nach Rohrsystem, Verlegemethode und Verlegesituationen treffen nicht alle der aufgeführten Leistungen zu.

| Rohrleitungsbau                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Tiefbau                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Bemerkungen                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vor- und Rücklauf je 1 m</li> <li>- 1/10 Bogenpreisanteil</li> <li>- 5 % T-Stückanteil</li> <li>- 1/6 Anteil Muffen</li> <li>- 10 % für Mauerdichtringe, Dehnungszonen, Rohrunterlagen und Schweissmaterial</li> <li>- 1/100 Preisanteil für Überwachungsanlage, vertragen und verschweissen der Rohre</li> <li>- Druckprobe</li> <li>- Kontrolle der Schweissnähte</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aushub gemäss Unterlagen</li> <li>- 30 % wegführen des Aushubmaterials</li> <li>- Spriessen des Grabens</li> <li>- Erstellen des Sandbettes</li> <li>- Einsanden der Rohre</li> <li>- Verfüllen des Grabens</li> <li>- Wiederherstellen der Erdoberfläche</li> <li>- Strassenbeläge</li> <li>- Umlegen von Werksleitungen</li> <li>- Verkehrsregelung</li> </ul> | <p>DN20 – DN150 Dämmstärke 3<br/>DN200 – DN500 Dämmstärke 2</p> <p>In der Regel exklusiv Kabelschutzrohre und Kabelzugschächte, da immer weniger verwendet.</p> |

Im Bild 11.1 sind als Überblick sowie als Vergleich die **mittleren Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter** für die Rohrsysteme KMR, MMR, PMR und PE-Rohre für die Nennweiten DN 20 bis DN 300 dargestellt. Einerseits ist die Kostenspanne der unterschiedlichen Rohrsysteme zu erkennen und andererseits das Angebot der Leitungsdimensionen, wobei bei KMR und PE-Rohre das Angebot an verfügbaren Nennweiten über DN 600 hinausgeht.

Im Bild 11.2 sind die **Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter** der verschiedenen Rohrsystem einzeln dargestellt. Der Streubereich der Kosten, dargestellt als grauer Balken, zeigt die ganze Bandbreite des zur Verfügung gestellten Zahlenmaterial. So stehen zum Beispiel bei KMR deutlich mehr Zahlenmaterial zur Verfügung als es zum Beispiel bei PMR-, MMR- oder PE-Rohren der Fall ist. Der Streubereich der Kosten ist jedoch auch als Bandbreite für die Verlegung in **Flur** (ländliches Umfeld, offenes Gelände, unbefestigte Oberfläche) als untere Grenze und für die Verlegung in **Strasse** (urbanes Umfeld, befestigte Oberfläche, diverse Sparten im Untergrund, komplexerer Bau etc.) als obere Grenze zu verstehen. Der Mittelwert, dargestellt als blauer Rhombus, wird einfachheitshalber als arithmetischer Mittelwert berechnet.

In der Tabelle 11.2 bis Tabelle 11.5 sind die Verlegekosten tabellarisch aufgeführt.

**Erläuterungen:** Aufgrund der relativ schwachen Datenlage sind die erhobenen und berechneten Werte nicht repräsentativ im statistischen Sinne. Die Datenlage bei KMR ist jedoch am besten, da es das am häufigsten eingesetzte Rohrsystem ist und von sechs unterschiedlichen Quellen diverse Angaben vorliegen. Die Datenlage bei MMR und PMR ist deutlich geringer, es liegen von zwei respektive drei unterschiedlichen Quellen diverse Angaben vor. Bei PE-Rohren liegen Angaben von lediglich einer Quelle diverse Angaben vor. Die Bandbreite bei allen Rohrsystemen entspricht der Angabe der Quellen beim Einsatz in ländlicher Umgebung als Minimalwert und beim Einsatz in urbaner Umgebung als Maximalwert. Die Bandbreite repräsentiert somit ungefähr den zu erwartenden Kostenbereich für unterschiedliche Bausituationen. Der Mittelwert ist der arithmetische Mittelwerte vom Maximal- und Minimalwert. Wie bereits erwähnt, werden für die erhobenen Richtpreise keine Gewähr abgegeben.

Da sich Preise für Material und Arbeit stetig ändern und der Planungsprozess zwischen Vorstudie bis Ausführung mehrere Jahre dauern kann, sind allfällige Anpassungen der Kosten nicht unüblich. Für Tiefbauarbeiten sind zudem saisonale Unterschiede möglich und in der Ausführung kommt es mitunter zu kurzfristigen Anpassungen auf der Baustelle (Kurzentschlossene, unerwartete Situationen im Untergrund und damit zusammenhängende Trassenanpassungen, Rohrstatik etc.).

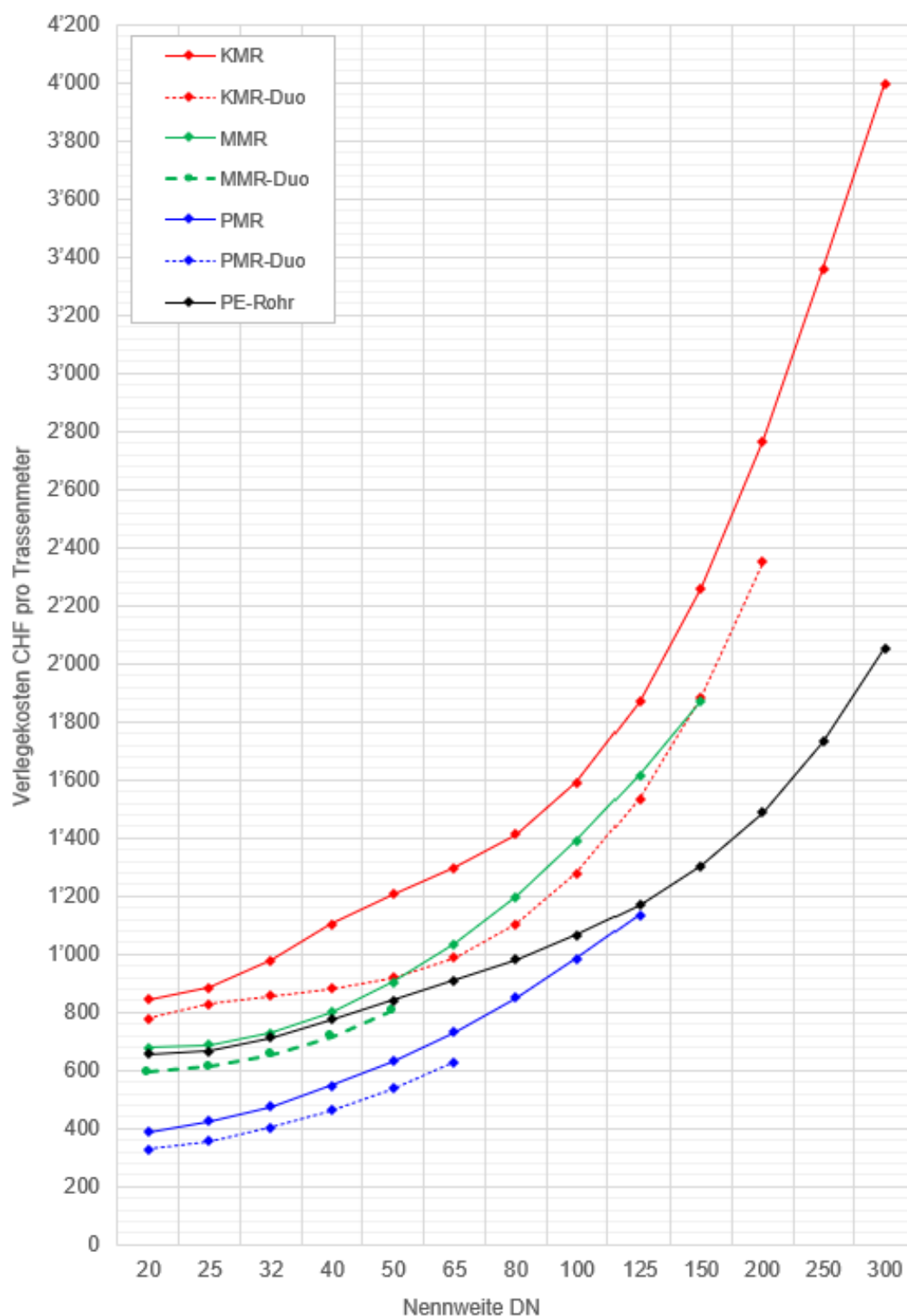


Bild 11.1 Überblick mittlerer Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter für Nennweiten DN 20 bis DN 300. Die PE-Rohre haben zwar keine Wärmedämmung und sind günstiger als andere (vorisolierte) Rohrsysteme. In der Gesamtbetrachtung sind diese aber durch den Einsatz in vorwiegend urbanem Umfeld dennoch deutlich teurer als PMR Leitungen, welche fast ausschliesslich in ländlichem Umfeld mit deutlich günstigeren Baubedingungen eingesetzt werden.

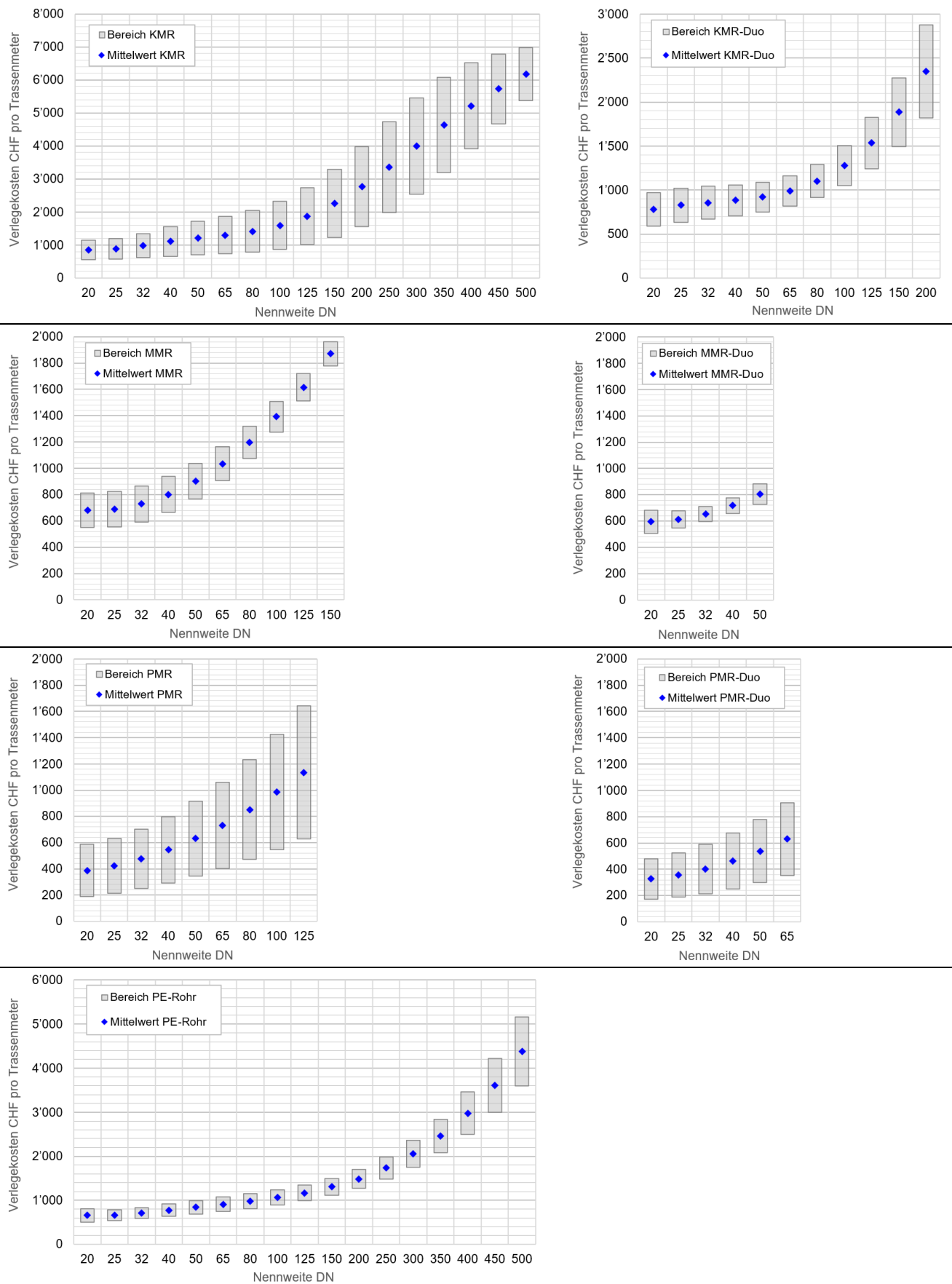


Bild 11.2 Bandbreite und Mittelwerte der Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter für Nennweiten bis DN 500 für die Rohrsysteme KMR, MMR, PMR und PE-Rohre, wo vorhanden auch Doppelrohre (Duo).

Tabelle 11.2 Richtpreise der Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter für **KMR** und **KMR-Duo**.

| Nennweite<br>DN | KMR  |         |            | KMR-Duo |         |            |
|-----------------|------|---------|------------|---------|---------|------------|
|                 | Flur | Strasse | Mittelwert | Flur    | Strasse | Mittelwert |
| 20              | 547  | 1143    | 845        | 588     | 971     | 779        |
| 25              | 569  | 1200    | 885        | 635     | 1020    | 828        |
| 32              | 614  | 1340    | 977        | 672     | 1042    | 857        |
| 40              | 659  | 1550    | 1105       | 707     | 1057    | 882        |
| 50              | 697  | 1718    | 1207       | 752     | 1089    | 920        |
| 65              | 733  | 1863    | 1298       | 818     | 1159    | 988        |
| 80              | 782  | 2042    | 1412       | 914     | 1291    | 1103       |
| 100             | 865  | 2316    | 1591       | 1053    | 1506    | 1279       |
| 125             | 1007 | 2730    | 1868       | 1243    | 1827    | 1535       |
| 150             | 1229 | 3293    | 2261       | 1496    | 2276    | 1886       |
| 200             | 1552 | 3981    | 2766       | 1822    | 2876    | 2349       |
| 250             | 1987 | 4730    | 3358       |         |         |            |
| 300             | 2537 | 5456    | 3996       |         |         |            |
| 350             | 3190 | 6070    | 4630       |         |         |            |
| 400             | 3918 | 6511    | 5214       |         |         |            |
| 450             | 4671 | 6778    | 5725       |         |         |            |
| 500             | 5378 | 6982    | 6180       |         |         |            |

Tabelle 11.3 Richtpreise der Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter für **MMR** und **MMR-Duo**.

| Nennweite<br>DN | MMR  |         |            | MMR-Duo |         |            |
|-----------------|------|---------|------------|---------|---------|------------|
|                 | Flur | Strasse | Mittelwert | Flur    | Strasse | Mittelwert |
| 20              | 549  | 811     | 680        | 508     | 681     | 594        |
| 25              | 555  | 824     | 690        | 547     | 677     | 612        |
| 32              | 593  | 867     | 730        | 596     | 709     | 653        |
| 40              | 664  | 937     | 801        | 657     | 778     | 718        |
| 50              | 768  | 1037    | 902        | 729     | 884     | 806        |
| 65              | 905  | 1164    | 1035       |         |         |            |
| 80              | 1074 | 1321    | 1198       |         |         |            |
| 100             | 1277 | 1506    | 1391       |         |         |            |
| 125             | 1512 | 1720    | 1616       |         |         |            |
| 150             | 1780 | 1962    | 1871       |         |         |            |
| 200             |      |         |            |         |         |            |
| 250             |      |         |            |         |         |            |
| 300             |      |         |            |         |         |            |
| 350             |      |         |            |         |         |            |
| 400             |      |         |            |         |         |            |
| 450             |      |         |            |         |         |            |
| 500             |      |         |            |         |         |            |

Tabelle 11.4 Richtpreise der Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter für **PMR** und **PMR-Duo**.

| Nennweite<br>DN | PMR  |         |            | PMR-Duo |         |            |
|-----------------|------|---------|------------|---------|---------|------------|
|                 | Flur | Strasse | Mittelwert | Flur    | Strasse | Mittelwert |
| 20              | 188  | 588     | 388        | 173     | 482     | 328        |
| 25              | 215  | 633     | 424        | 189     | 526     | 357        |
| 32              | 251  | 703     | 477        | 215     | 590     | 402        |
| 40              | 294  | 798     | 546        | 251     | 675     | 463        |
| 50              | 345  | 918     | 631        | 298     | 780     | 539        |
| 65              | 404  | 1062    | 733        | 355     | 905     | 630        |
| 80              | 471  | 1230    | 851        |         |         |            |
| 100             | 546  | 1424    | 985        |         |         |            |
| 125             | 629  | 1642    | 1135       |         |         |            |
| 150             |      |         |            |         |         |            |
| 200             |      |         |            |         |         |            |
| 250             |      |         |            |         |         |            |
| 300             |      |         |            |         |         |            |
| 350             |      |         |            |         |         |            |
| 400             |      |         |            |         |         |            |
| 450             |      |         |            |         |         |            |
| 500             |      |         |            |         |         |            |

Tabelle 11.5 Richtpreise der Verlegekosten in CHF pro Trassenmeter für **PE-Rohre**.

| Nennweite<br>DN | PE-Rohr |         |            |
|-----------------|---------|---------|------------|
|                 | Flur    | Strasse | Mittelwert |
| 20              | 507     | 806     | 657        |
| 25              | 539     | 791     | 665        |
| 32              | 583     | 840     | 711        |
| 40              | 635     | 915     | 775        |
| 50              | 690     | 995     | 843        |
| 65              | 749     | 1074    | 911        |
| 80              | 814     | 1152    | 983        |
| 100             | 892     | 1238    | 1065       |
| 125             | 989     | 1347    | 1168       |
| 150             | 1113    | 1495    | 1304       |
| 200             | 1274    | 1701    | 1487       |
| 250             | 1482    | 1981    | 1732       |
| 300             | 1749    | 2356    | 2053       |
| 350             | 2083    | 2843    | 2463       |
| 400             | 2497    | 3460    | 2978       |
| 450             | 2997    | 4225    | 3611       |
| 500             | 3593    | 5160    | 4376       |

## 12 Richtpreise Übergabestationen

Für die Minimalanforderungen an eine Übergabestation gemäss Kapitel 5.4.6 sind für Anschlussleistungen von 10 kW, 25 kW, 50 kW, 100 kW und 200 kW die Investitionskosten in Form von Richtpreisen (Bruttopreise) von folgenden Firmen erhoben worden (Stand September 2025): Fahrer AG, isoplus (Schweiz) AG, und SYSBO AG. Die Erhebung ist nicht repräsentativ noch vollständig was weitere Hersteller und Lieferanten anbelangt. Für die erhobenen Richtpreise wird keine Gewähr abgegeben.

Die Investitionskosten in Tabelle 12.1 sind für eine erste Abschätzung, während effektive Kosten je nach Situation, Anforderung, Losgrösse etc. abweichen können. Das Bild 12.1 zeigt die Investitionskosten in Abhängigkeit der Anschlussleistung, wobei Minimal- und Maximalwerte sowie der Mittelwert der erhobenen Daten eingetragen sind. Das Bild 12.2 zeigt die spezifischen Investitionskosten in Abhängigkeit der Anschlussleistung. In dieser Darstellung ist der Skaleneffekt (economies-of-scale) gut erkennbar. Wesentliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Fabrikaten betreffen die Ausführung (Wandmontage im Kasten oder offen auf Gestell) sowie die Ausführung und Anwendungs- und Bedienungsmöglichkeiten einzelner Komponenten (Regler, Aussentemperaturfühler etc.), welche sich teilweise in den Investitionskosten widerspiegeln.

Die **Leistungen** für die Investitionskosten setzen sich folgendermassen zusammen:

- Komponenten gemäss Kapitel 5.4.6.2 (ohne sekundärseitige Komponenten wie Sicherheitsventil (9), Expansion (10) und Schmutzfänger (5))
- geprüft, geliefert und montiert
- ohne Elektroinstallationen und Verrohrung an Primär- und Sekundärnetz
- inkl. Inbetriebnahme.

Neben der definierten Minimalanforderung an die Ausrüstung gemäss Kapitel 5.4.6.2 werden folgende technischen **Randbedingungen** erfüllt:

- Nenndruck PN 16
- Maximale Betriebstemperatur: 110°C
- Vorlauftemperatur Winter: 80°C
- Vorlauftemperatur Sommer: 70°C
- Maximale primäre Rücklauftemperatur im Heizbetrieb: 50°C
- Maximale Rücklauf-Grädigkeit im Heizbetrieb: 3 K
- Maximaler Druckabfall Übergabestation: 80 kPa
- Maximaler Differenzdruck im Netz: 5 bar.

Tabelle 12.1 Investitionskosten (Richtpreise) absolut und spezifisch dargestellt für eine Standard-Übergabestation nach Minimalanforderung als Minimal-, Maximal- und Mittelwert aus Angaben von fünf Herstellern und Lieferanten.

| Kosten                                          | Anschlussleistung in kW | Minimalwert | Maximalwert | Mittelwert |
|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------|-------------|------------|
| <b>Investitionskosten</b> in CHF                | 10                      | 5'496       | 6'900       | 6'365      |
|                                                 | 25                      | 5'556       | 7'000       | 6'452      |
|                                                 | 50                      | 5'774       | 8'200       | 7'058      |
|                                                 | 100                     | 8'452       | 11'000      | 10'084     |
|                                                 | 200                     | 11'857      | 18'500      | 15'786     |
| <b>Spezifische Investitionskosten</b> in CHF/kW | 10                      | 550         | 690         | 637        |
|                                                 | 25                      | 222         | 280         | 258        |
|                                                 | 50                      | 115         | 164         | 141        |
|                                                 | 100                     | 85          | 110         | 101        |
|                                                 | 200                     | 59          | 93          | 79         |

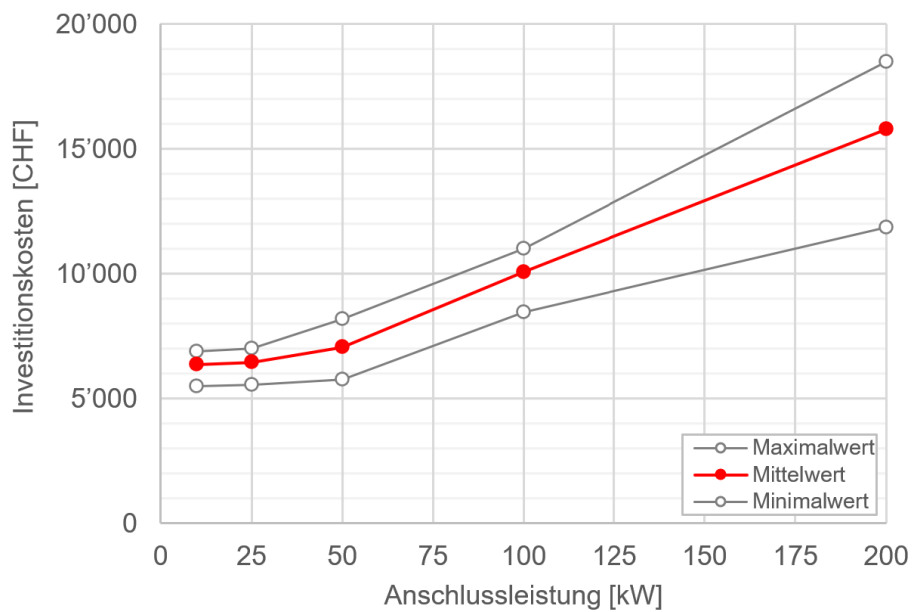


Bild 12.1 Investitionskosten in Abhängigkeit der Anschlussleistung für eine Übergabestation gemäss oben aufgeführten Leistungen und Randbedingungen.

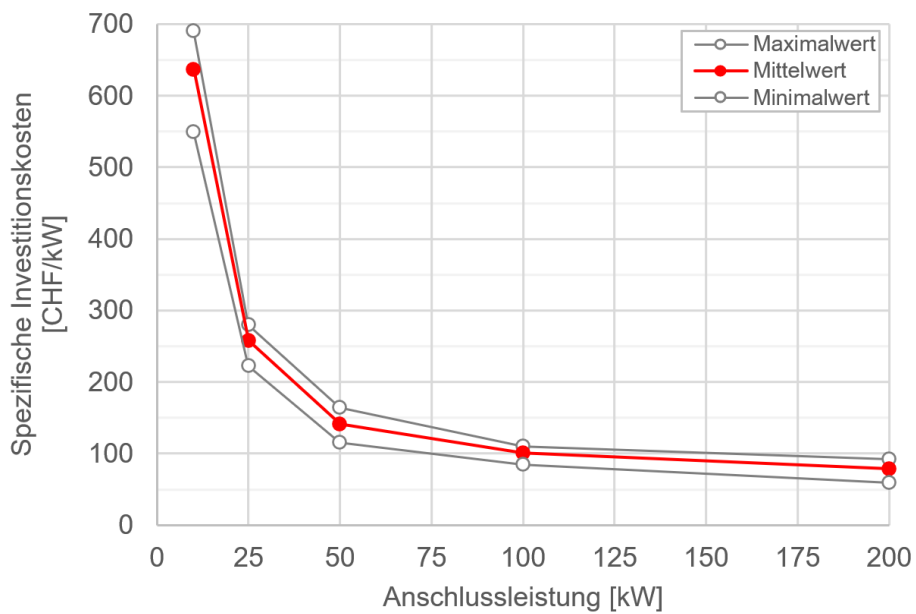


Bild 12.2 Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit der Anschlussleistung für eine Übergabestation gemäss oben aufgeführten Leistungen und Randbedingungen.

## 13 Symbole für Installationen

In der folgenden Tabelle sind die in diesem Planungshandbuch verwendeten Symbole dargestellt. Die Symbole basieren auf der SIA 410 [247].

Tabelle 13.1 Verwendete Symbole nach SIA 410 [247].

| Symbol | Beschreibung                                         | Symbol | Beschreibung                                    |
|--------|------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|
|        | Dreiwegventil mit Motorantrieb                       |        | Schmutzfänger                                   |
|        | Durchgangsventil mit Motorantrieb                    |        | Druckanzeige                                    |
|        | Drosselarmatur mit Druckmessstutzen                  |        | Temperaturanzeige                               |
|        | Differenzdruckunabhängiges Regelventil (Kombiventil) |        | Wärmezähler                                     |
|        | Rückschlagventil                                     |        | Fühler (Temperatur und Druck)                   |
|        | Absperrarmatur                                       |        | Pumpe                                           |
|        | Strahlpumpe mit Stellgerät                           |        | Heizkreis                                       |
|        | Sicherheitsventil federbelastet                      |        | Regler                                          |
|        | Entleerung                                           |        | Wärmeübertrager (Plattenwärmeübertrager)        |
|        | Warmwasserspeicher                                   |        | Warmwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager |

## 14 Formelzeichen und Indizes

| Zeichen         | Bedeutung                                      | Einheit                  |
|-----------------|------------------------------------------------|--------------------------|
| A               | Fläche, Oberfläche                             | m <sup>2</sup>           |
| AD              | Anschlussdichte                                | MWh/(a m)                |
| a               | Annuitätsfaktor                                | %/a                      |
| a               | Abstand Wellrohr                               | m                        |
| a               | lichter Rohrabstand                            | m                        |
| c <sub>p</sub>  | spezifische Wärmekapazität                     | kJ/(kg K); J/(kg K)      |
| d               | Durchmesser                                    | m                        |
| DN              | Nenndurchmesser (Nominal Diameter)             | –                        |
| DS              | Dämmstärke                                     | –                        |
| E               | Energie                                        | MWh, kWh                 |
| E               | Elastizitätsmodul                              | N/mm <sup>2</sup>        |
| EBF             | Energiebezugsfläche                            | m <sup>2</sup>           |
| f               | Faktor                                         | –                        |
| f <sub>el</sub> | Gewichtungsfaktor für Elektrizität             | –                        |
| g               | Fallbeschleunigung                             | m/s <sup>2</sup>         |
| g               | Gleichzeitigkeitsfaktor                        | –                        |
| H               | Förderhöhe                                     | m; mWS                   |
| h               | Höhe, Tiefe                                    | m                        |
| I               | Investitionskosten                             | CHF                      |
| i               | Kapitalzinssatz                                | %/a                      |
| K               | Jährliche Kosten                               | CHF/a                    |
| k               | Rohrrauheit                                    | mm                       |
| k               | spezifische Kosten                             | Rp./kWh                  |
| k <sub>v</sub>  | Durchflussskennwert bei Ventilen               | m <sup>3</sup> /s · √bar |
| k <sub>vs</sub> | Durchflussskennwert bei voll geöffnetem Ventil | m <sup>3</sup> /s · √bar |
| L               | Trassenlänge (Vor- und Rücklauf parallel)      | m                        |
| L               | Hauptrohrlänge                                 | m                        |
| L <sub>A</sub>  | Ausladelänge                                   | m                        |
| l               | Länge                                          | m                        |
| m               | Masse                                          | kg                       |
| $\dot{m}$       | Massenstrom                                    | kg/s                     |
| M               | Moment                                         | Nm; Nmm                  |
| $\dot{M}$       | Nachspeisemassenstrom Expansion                | kg/s                     |
| n               | Anzahl; Kalkulationsdauer                      | –                        |
| n               | Kalkulationsdauer                              | a                        |
| P               | Leistung (i.d.R. elektrisch)                   | kW                       |

| Zeichen              | Bedeutung                                                                                                                                | Einheit                                       |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| P                    | Preis                                                                                                                                    | Rp./kWh                                       |
| P <sub>V</sub>       | Ventilautorität                                                                                                                          | –                                             |
| PS                   | maximaler Betriebsdruck                                                                                                                  | bar                                           |
| p                    | Druck                                                                                                                                    | bar, Pa, kPa                                  |
| Δp                   | Druckunterschied, Druckabfall                                                                                                            | bar, Pa, kPa                                  |
| Δp <sub>V100</sub>   | Druckabfall über dem Ventil bei 100 % Durchfluss                                                                                         | bar, Pa, kPa                                  |
| Δp <sub>V0</sub>     | Druckabfall über dem Ventil bei 0 % Durchfluss, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt                                                     | bar, Pa, kPa                                  |
| Δp <sub>var100</sub> | Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss                                                                                    | bar, Pa, kPa                                  |
| Q                    | Jährliche Wärmemenge                                                                                                                     | MWh/a, kWh/a                                  |
| q <sub>h</sub>       | spezifischer Heizwärmebedarf                                                                                                             | MJ/(m <sup>2</sup> a), kWh/(m <sup>2</sup> a) |
| q <sub>ww</sub>      | spezifischer Wärmebedarf für Warmwasser                                                                                                  | MJ/(m <sup>2</sup> a), kWh/(m <sup>2</sup> a) |
| $\dot{Q}$            | thermische Leistung                                                                                                                      | MW, kW                                        |
| $\dot{q}$            | spezifische thermische Leistung                                                                                                          | W/m                                           |
| $\dot{q}_{v,L}$      | spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung                                                                                   | W/(m K)                                       |
| r                    | Radius                                                                                                                                   | m                                             |
| Re                   | Reynolds-Zahl                                                                                                                            | –                                             |
| R <sub>e</sub>       | Streckgrenze                                                                                                                             | N/mm <sup>2</sup>                             |
| R <sub>m</sub>       | Zugfestigkeit                                                                                                                            | N/mm <sup>2</sup>                             |
| S                    | Sicherheitsfaktor                                                                                                                        | –                                             |
| S <sub>e</sub>       | Sicherheitsfaktor auf Streckgrenze                                                                                                       | –                                             |
| S <sub>m</sub>       | Sicherheitsfaktor auf Zugfestigkeit                                                                                                      | –                                             |
| s                    | horizontaler Rohrabstand; Wandstärke (Rohr, Zylinder)                                                                                    | m                                             |
| s                    | Wandstärke (Rohr, Zylinder)                                                                                                              | m                                             |
| s <sub>e</sub>       | Bestell-Rohrwandstärke                                                                                                                   | m                                             |
| s <sub>v</sub>       | rechnerische Rohrwandstärke                                                                                                              | m                                             |
| T                    | Temperatur; Teilstrang                                                                                                                   | °C                                            |
| T                    | Teilstrang                                                                                                                               | –                                             |
| t                    | Zeit                                                                                                                                     | h                                             |
| ΔT                   | Temperaturspreizung                                                                                                                      | K                                             |
| ΔT <sup>*IST</sup>   | mittlere (berechnete) Temperaturspreizung im Netz in K, wenn der untersuchte Verbraucher mit Referenz-Temperaturspreizung betrieben wird | K                                             |
| U                    | Wärmedurchgangskoeffizient                                                                                                               | W/(m <sup>2</sup> K)                          |
| U                    | Umfang                                                                                                                                   | m                                             |
| V                    | Volumen                                                                                                                                  | m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /a            |
| ΔV                   | Volumenänderung (Expansionsvolumen)                                                                                                      | m <sup>3</sup> , m <sup>3</sup> /a            |
| $\dot{V}$            | Volumenstrom                                                                                                                             | m <sup>3</sup> /s                             |
| W                    | Widerstandsmoment                                                                                                                        | N/mm <sup>3</sup>                             |

| Zeichen   | Bedeutung                               | Einheit              |
|-----------|-----------------------------------------|----------------------|
| w         | Strömungsgeschwindigkeit                | m/s                  |
| $\alpha$  | Wärmeübergangskoeffizient               | W/(m <sup>2</sup> K) |
| $\alpha$  | Wärmeausdehnungskoeffizient             | 1/K                  |
| $\gamma$  | Volumenänderungskoeffizient             | 1/K                  |
| $\eta$    | Wirkungsgrad                            | %                    |
| $\eta_a$  | Jahresnutzungsgrad                      | %                    |
| $\lambda$ | Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung | –                    |
| $\lambda$ | Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitwiderstand | W/(m K)              |
| $\rho$    | Dichte                                  | kg/m <sup>3</sup>    |
| $\pi$     | Pi, Kreiszahl                           | –                    |
| $\tau$    | Vollbetriebsstunden                     | h/a                  |
| $\sigma$  | Spannung                                | N/mm <sup>2</sup>    |
| $\nu$     | kinematische Viskosität                 | m <sup>2</sup> /s    |
| $\nu$     | Schweisnaht Wertigkeit                  | –                    |
| $\zeta$   | Widerstandsbeiwert Einbauten            | –                    |

| Indizes | Bedeutung             |
|---------|-----------------------|
| A       | Abkühlung             |
| Aus     | Auslegung             |
| a       | Jahr                  |
| a       | Aussen                |
| B       | Biegung               |
| B       | Betriebsmittel        |
| Be      | Betrieb               |
| Br      | Brennstoff            |
| Bo      | Boden (Erdreich)      |
| D       | Dämmmaterial          |
| DH      | Druckhaltung          |
| DES     | Druckerhöhungsstation |
| Duo     | Doppelrohr, Duo-Rohr  |
| el      | elektrisch            |
| ex      | exergie               |
| G       | Gebäude               |
| g       | Gleichzeitigkeit      |
| Geo     | Geodätisch            |
| Ges     | Gesamt                |
| gew     | gewichtet             |
| HA      | Hausanschluss         |

| Indizes | Bedeutung                                    |
|---------|----------------------------------------------|
| hydr    | hydraulisch                                  |
| i       | Innen                                        |
| i       | Nummerierung Teilstränge oder Hausanschlüsse |
| IST     | Ist-Zustand                                  |
| K       | Kapital                                      |
| K       | Kessel                                       |
| L       | Leitungen (erdverlegt); linear               |
| L       | linear                                       |
| M       | Mantelrohr                                   |
| m       | Mittel                                       |
| max     | Maximal, Maximum                             |
| min     | Minimal, Minimum                             |
| MV      | Mehrverbrauch                                |
| N       | Nenn                                         |
| N       | Netz                                         |
| Nutz    | Nutzwärme                                    |
| opt     | optimal                                      |
| P       | Pumpe                                        |
| PN      | Nennndruck (Pressure Nominal)                |
| q       | Wärme                                        |
| R       | Rohr, Mediumrohr                             |

| Indizes | Bedeutung                       |
|---------|---------------------------------|
| REF     | Referenz                        |
| RL      | Rücklauf                        |
| RS      | Rohrstatisch                    |
| S       | Strom (Kosten)                  |
| SP      | Schlechtpunkt                   |
| Sp      | Speicher                        |
| St      | Statisch                        |
| T       | Temperatur                      |
| T       | Teilstrang                      |
| tot     | Total                           |
| u       | untere                          |
| U       | Umgebung                        |
| U       | Unterhalt- und Servicearbeiten  |
| Ü       | Überdeckung                     |
| V       | Verlust                         |
| V       | Vergleichsspannung              |
| Ver     | Verlegung                       |
| VL      | Vorlauf                         |
| Vor     | Vorspannung, Vorspann           |
| VR      | Vor- und Rücklauf               |
| W       | Wasser                          |
| WA      | Kunde (Wärmeabnehmer)           |
| WE      | Wärmeerzeuger (Energiezentrale) |
| WS      | Wassersäule                     |
| WV      | Wärmeverteilung                 |
| WZ      | Wärmezähler                     |
| x       | gesuchte Grösse                 |
| zu      | zugeführt                       |
| zul     | zulässig                        |
| 0       | Anfang, Eingang                 |
| 1       | Ende, Ausgang                   |

## 15 Glossar

| Begriff                               | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abnehmerstruktur                      | Die Abnehmerstruktur beschreibt ein Versorgungsgebiet nach Kriterien wie Bebauungsdichte, Bebauungsstruktur, Anschlussdichten, Gleichzeitigkeit, Energie- und Leistungsbedarf etc..                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Abonnierte Anschlussleistung          | Vertraglich vereinbarte maximale Wärmebezugsleistung eines an ein thermisches Netz angeschlossenen Kunden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Abwärme                               | Nicht vermeidbare Wärmeverluste aus Energieumwandlungsanlagen oder chemischen Prozessen. Bei einem Prozess anfallende Abwärme kann an andere Prozesse weitergeführt werden. Das nutzbare Potenzial ergibt sich aus der über das Jahr abgegebenen Wärmemenge und dem Temperaturniveau der Abwärme.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Anschlussdichte                       | Die Anschlussdichte beschreibt die pro Jahr und Trassenmeter an die Kunden gelieferte Wärme. Sie dient als Kenngrösse zur Beurteilung der Energiedichte der Wärmeverteilung und beeinflusst die Energieeffizienz und die Wirtschaftlichkeit des Netzes. Die Anschlussdichte kann für das gesamte Netz und für Teilstränge ausgewiesen werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Anschlussgrad                         | Der Anschlussgrad ist das Verhältnis des Jahreswärmebedarfs der in einem Gebiet angeschlossenen Kunden bezogen auf den Jahreswärmebedarf aller infrage kommender Kunden im betrachteten Gebiet. Für Gebiete mit ähnlichen Verbrauchern entspricht dies ungefähr dem anzahlmässigen Anteil der angeschlossenen Kunden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Anschlussleistung                     | Die Anschlussleistung eines thermischen Netzes ist die Summe der Anschlussleistungen aller Kunden unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit, also das Produkt aus der Summe der abonnierten Anschlussleistungen aller Kunden und dem Gleichzeitigkeitsfaktor. Siehe auch Gleichzeitigkeit und Gleichzeitigkeitsfaktor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Arbeitszahl                           | Die Arbeitszahl beschreibt das Verhältnis der über einen längeren Betrachtungszeitraum erzeugten Wärme einer Wärmepumpe zu der im Betrachtungszeitraum zugeführten elektrischen Energie. Siehe auch Leistungszahl und Jahresarbeitszahl.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Bandlast                              | Bandlast bezeichnet eine dauerhaft, oft während 8760 Stunden pro Jahr benötigte Leistung. Die Bandlast eines thermischen Netzes setzt sich zusammen aus den saisonal- oder witterungsunabhängigen Verbrauchern (z. B. Warmwasser oder Prozesse) plus den Netzverluste.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Biomasse                              | Biomasse umfasst alle pflanzlichen und tierischen Stoffe. Im Zusammenhang mit Energietechnik kommen grundsätzlich alle biogenen Stoffe als Energieträger infrage. Für thermische Netze werden in erster Linie Holz und vergärbare Abfälle genutzt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Brauchwarmwasser                      | Siehe Warmwasser                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Betriebswasser                        | Wasser für gewerbliche und häusliche Einsatzbereiche, das nicht Trinkwasserqualität aufweisen muss.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Dämmstärke-Klassen                    | Die Dämmstärke bezeichnet die Klasse (Dicke) der Wärmedämmung bei wärmegeprägten Leitungen. Für KMR werden drei Klassen angeboten, wobei 1 die schwächste und 3 die stärkste Dämmung beschreibt. Bei MMR und PMR existieren vielfach zwei Klassen, die als Standard-Version und als verstärkte Version bezeichnet werden, welche im gross und ganzen den Dämmstärke-Klassen 2 respektive 3 von KMR entsprechen.                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Doppelrohr-Ausführung                 | Vorlauf- und Rücklaufrohr mit PUR-Schaum als Wärmedämmung in einem Schutzmantelrohr aus PE. Es sind starre (KMR, SMR) und flexible (MMR, PMR) Ausführungen erhältlich.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Druckschaubild, Druckverlauf-Diagramm | Darstellung der Druckverteilung im Netz in Abhängigkeit der Distanz von der Energiezentrale zu einem Kunden in der Peripherie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Endausbau                             | Der für die Auslegung und Berechnung prognostizierte Endausbau des thermischen Netzes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Erdverlegung                          | Unterirdische Verlegung von Leitungen in einem Graben oder grabenlos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Expansion und Druckhaltung            | System im hydraulischen Kreis (Wärmerzeugung und Wärmeverteilung), welches die Volumenänderung des Warmwassers zwischen minimaler und maximaler Temperatur aufnimmt und den Druck konstant hält (Druckhaltung).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Fernwärme                             | Fernwärme beschreibt eine leitungsgebundene Wärmeversorgung von Kunden über Wasser oder Dampf mit zentral erzeugter Wärme. Thermische Netze decken einen breiten Leistungsbereich mit Anschlussleistungen von weniger als 100 kW bis zu über 1 GW ab. Für die Gesamtenergiestatistik der Schweiz wird vorausgesetzt, dass das Haupttransport- und Verteilnetz öffentlichen Boden beansprucht und dass die Wärme an Dritte verkauft wird [6]. Grosse Wärmenetze innerhalb einer juristischen Einheit wie zum Beispiel einer Grossüberbauung sind technisch mit einem Fernwärmenetz identisch, werden aber nicht als Fernwärme erfasst.                                        |
| "Nahwärme"                            | Für kleinere Netze wird zum Teil auch der Begriff Nahwärme verwendet. In Deutschland wird damit die Übertragung von Wärme für Heizung und Warmwasser zwischen Gebäuden mit Leistungen zwischen 50 kW und einigen Megawatt beschrieben [126]. Von Minergie® wird Nahwärme auch dann verwendet, wenn die Wärmeproduktionsanlage einige Gebäude oder Gebäudekomplexe versorgt, wobei nicht zwingend ein Verkauf an Dritte erfolgen muss [248].<br><br>Da der Übergang zwischen Nahwärme und Fernwärme fließend ist, wird im vorliegenden Planungshandbuch nur der Überbegriff Thermisches Netz verwendet, welches auch Kalte Fernwärme oder sogenannte Anergienetze beinhaltet. |

| Begriff                                      | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fernwärmenetz                                | Siehe Thermisches Netz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Ganzjahresbetrieb                            | Ganzjährige Bereitstellung und Lieferung von Wärme und/oder Kälte an die Kunden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Gebäudetypen                                 | Kategorisierung der Gebäude nach Bauart, Nutzungsart, Alter und weiteren Kriterien. Beispiele zur Charakterisierung sind Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Verwaltungsgebäude, Gewerbe, Industrie, Altbau, Neubau usw.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Gebiete und Zonen                            | Ein potenzielles Wärme- und/oder Kälteversorgungsgebiet kann eine Ortschaft, Quartier, Stadtteil, mehrere Grosskunden oder einen einzelnen Grosskunden umfassen. Die Einteilung des potenziellen Versorgungsgebietes in Gebiete und Zonen erfolgt aufgrund der erwarteten Wärme- und/oder Kältebezugsdichte von Gebäudetypen oder aufgrund von geografischen Gegebenheiten wie zum Beispiel Strassen, Bahntrassen, Gewässer, Gelände usw.. Einzelne Zonen können vereinfacht als Grosskunde behandelt werden. Als Hilfsmittel zur Einteilung dient der Ortsplan und wenn vorhanden ein Energiekataster oder Energierichtplan. |
| Geodätisches Netzprofil, Höhenkurve          | Das geodätische Netzprofil stellt den Höhenverlauf des Verteilnetzes in Meter über Meer dar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Geografisches Informationssystem (GIS)       | Datenverarbeitungsanwendung zur Erfassung, Dokumentation, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Zur Planung von thermischen Netzen kann damit die Trassenführung unter Berücksichtigung der geografischen Gegebenheiten und der eventuell bereits vorhandenen anderen Versorgungssysteme (Wasser, Gas, Elektrizität etc.) festgelegt werden. Daneben kann das GIS auch zur Abschätzung des lokalen Energie- und Leistungsbedarfs genutzt werden.                                                                                                                                              |
| Gleichzeitigkeit und Gleichzeitigkeitsfaktor | Die Gleichzeitigkeit beschreibt in einem Verbund von Kunden den Effekt, dass bei einer grösseren Anzahl von Kunden nie alle gleichzeitig die maximale Leistung beziehen. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen dem effektiven maximalen Leistungsbedarf zur gesamten abonnierten Anschlussleistung aller Kunden.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Grabenloser Leitungsbau                      | Beim grabenlosen Leitungsbau werden Leitungen unterirdisch durch Einziehen, Einschieben, Einpressen oder Einrammen in einen im Boden geschaffenen Hohlraum verlegt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Grabentechnik                                | Bei der Grabentechnik werden die Leitungen in direktem Kontakt mit der Erde in offenen Gräben verlegt und ist das am häufigsten eingesetzte Verlegeverfahren.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Grädigkeit                                   | Die Grädigkeit ist die Temperaturdifferenz zwischen der primären und der sekundären Seite eines Wärmeübertragers. Für thermische Netze ist besonders die Rücklauf-Grädigkeit der Übergabestation bei den Kunden von Interesse, bei der eine besonders tiefe Grädigkeit zwischen der sekundären und der primären Rücklauf-temperatur angestrebt wird. Sie ist ein Mass für die Qualität der Wärmeübertragung.                                                                                                                                                                                                                  |
| Grundlast                                    | Als Grundlast wird der Leistungsbedarf bezeichnet, welcher über das Jahr verteilt mit hohen Vollbetriebsstunden bereit gestellt werden kann.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Grundlastabdeckung                           | In der Regel werden Wärme- oder Kälteproduktionsanlagen auf Grundlast- und Spitzenlastbedarf ausgelegt. Der Grundlastwärmeerzeuger weist dabei eine hohe Vollbetriebsstundenzahl auf, der Spitzenlastkessel eine niedrige.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Hauptleitung                                 | Leitung von der Energiezentrale bis zu den Zweigleitungen im Verteilnetz. Weitere Begriffe sind zum Beispiel Stammleitung oder auch Transportleitung, wenn die Energiezentrale relativ weit vom Versorgungsgebiet entfernt ist.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Hausanlage                                   | Die Hausanlage besteht aus dem Wärme- und Kälteverteilsystem im Gebäude zur Verteilung von Raum- und Prozesswärme sowie Brauchwarmwasser.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Hausanschlussleitung                         | Verbindungsleitung zwischen Verteilnetz (Haupt- oder Zweigleitung) und Übergabestation.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Hausanschlussraum                            | Der Hausanschlussraum beinhaltet die Hausstation und die Hauptabsperroorgane.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Hausstation                                  | Die Hausstation besteht aus der Übergabestation und der Hauszentrale.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Hauszentrale                                 | Die Hauszentrale ist das Bindeglied zwischen der Übergabestation und der Hausanlage. Sie dient der Anpassung der Wärme- und /oder Kältelieferung an die Hausanlage hinsichtlich Druck, Temperatur und Volumenstrom. Bei der Gestaltung der Hauszentrale ist zwischen direktem oder indirektem Anschluss zu unterscheiden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Heisswasser                                  | Der Begriff Heisswasser im Bereich der thermischen Netze bezeichnet das Zirkulationswasser im thermischen Netz, wenn die Temperatur über 110°C beträgt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Heizwerk                                     | Energiezentrale zur Erzeugung von Wärme.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Heizkraftwerk                                | Energiezentrale mit gleichzeitiger Erzeugung von Wärme und Strom. Siehe auch Wärme-Kraft-Kopplung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Jahresdauerlinie der Aussentemperatur        | Die Jahresdauerlinie der Aussentemperatur ist eine Darstellung der Summenhäufigkeit der Aussentemperatur als Anzahl Tage oder Stunden pro Jahr für eine bestimmte Messstation. Sie entspricht somit einer Summenhäufigkeitskurve der Aussentemperatur.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs   | Die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs ergibt sich aus der Lastkennlinie und der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur. Sie ist eine Summenhäufigkeitskurve und stellt den Wärmeleistungsbedarf in Abhängigkeit der Anzahl Tage oder Stunden pro Jahr dar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

| Begriff                                              | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jahreswärmebedarf                                    | Der Jahreswärmebedarf eines Verbrauchers ist dessen an der Wärmeübergabestelle anfallende jährliche Wärmebedarf. Für ein Fernwärmenetz ist der Jahreswärmebedarf der jährliche Wärmebedarf an der Schnittstelle zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeverteilnetz.                                                                                   |
| Jahresnutzungsgrad                                   | Nutzungsgrad während eines Jahres. Siehe auch Nutzungsgrad.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Jahresarbeitszahl (JAZ)                              | Die Jahresarbeitszahl beschreibt das Verhältnis der Jahreswärmeproduktion zu der in einem Jahr zugeführten elektrischen Energie einer Wärmepumpe. Siehe auch Leistungszahl und Arbeitszahl.                                                                                                                                                     |
| Jährliche Betriebsstunden                            | Effektive Anzahl Stunden pro Jahr, während der eine Anlage betrieben wird. Die jährlichen Betriebsstunden werden nicht als Vollbetriebsstunden ausgewiesen, d.h. eine Betriebsstunde bei 50 % Leistung gilt als eine Betriebsstunde.                                                                                                            |
| Kaltwasser                                           | Kaltes Trinkwasser, dessen Temperatur nicht gezielt erhöht wurde.                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Kanaltechnik                                         | Vorgefertigte oder vor Ort hergestellte Betonkanäle zur Aufnahme von Leitungen für thermische Netze oder anderer leitungsgelassenen Versorgungsleitungen.                                                                                                                                                                                       |
| Kellerleitung                                        | Die Kellerleitung verbindet die Hausanschlussleitung mit der Übergabestation.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Kesselwirkungsgrad                                   | Die von einem Heizkessel wasserseitig produzierte Nutzenergie dividiert durch die im Brennstoff als Heizwert zugeführte Energie. Die Bestimmung erfolgt entweder im stationären Zustand ohne Speichereffekte (z. B. bei automatischen Feuerungen) oder über einen Abbrandprozess (z. B. bei handbeschickten Feuerungen).                        |
| Kunde                                                | Bezieht vom Versorger Wärme und bezahlt diese gemäss vertraglich abgemachten Bedingungen.                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Kundenstruktur                                       | Siehe Abnehmerstruktur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| KMR                                                  | Starres Stahlmediumrohr mit einem PUR-Schaum als Wärmedämmung und einem Schutzmantel aus Polyethylen.                                                                                                                                                                                                                                           |
| Lastkennlinie                                        | Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs in Abhängigkeit des Tagesmittelwertes der Aussentemperatur.                                                                                                                                                                                                                                               |
| Leistungsdichte                                      | Auf eine Gebietsfläche bezogene maximale Leistung. Im Zusammenhang mit thermischen Netzen ist die Wärme- und /oder Kälteleistungsdichte von Interesse.                                                                                                                                                                                          |
| Leistungszahl                                        | Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist das Verhältnis zwischen der erzeugten Wärmeleistung und der zugeführten elektrischen Leistung. Sie beschreibt einen Momentanwert oder einen über eine kurzfristige Betrachtungsdauer bestimmten Wert.                                                                                                    |
| Lieferant                                            | Erbringt die vertraglich vereinbarte Wärme- und/oder Kälteversorgung an den Kunden.                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Maschennetz                                          | Ein Maschennetz ist ein Netz, dessen Strahlen oder Ringe an mehreren Knotenpunkten, sogenannten Maschen, zusammengeschlossen sind.                                                                                                                                                                                                              |
| maximal zulässige Betriebstemperatur                 | Maximale über eine kurze Zeitperiode zulässige Betriebstemperatur.                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Maximaldruck                                         | Druck, der an keiner Stelle des Netzes und zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf.                                                                                                                                                                                                                                                       |
| maximale Dauerbetriebstemperatur                     | Maximale, ohne zeitliche Einschränkung zulässige Betriebstemperatur                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| MMR                                                  | Flexibles Stahlmediumrohr mit einem PUR-Schaum als Wärmedämmung und einem Schutzmantel aus Polyethylen. Das Stahlmediumrohr ist vielfach als Wellrohr ausgeführt.                                                                                                                                                                               |
| Minimaldruck                                         | Druck, der an keiner Stelle des Netzes und zu keinem Zeitpunkt unterschritten werden darf.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Nahwärme                                             | Siehe Fernwärme und Thermisches Netz.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Nenndruck PN (Pressure Nominal)                      | Der Nenndruck gibt für ein Rohrleitungssystem eine Referenzgrösse an. Die Angabe erfolgt nach DIN, EN, ISO durch die Bezeichnung PN (Pressure Nominal) gefolgt von einer Zahl, die den Auslegungsdruck in bar bei Raumtemperatur (20°C) angibt und ist in EN 1333 ausgeführt.                                                                   |
| Nenndurchmesser DN, Nennweite, nominaler Durchmesser | Referenz-Durchmesserangabe, die Grösse und Kompatibilität von Bauteilen definiert. Der Nenndurchmesser ist Teil der Bezeichnung des Bauteils nach EN ISO 6708 und ist nicht identisch mit dem Zahlenwert in Millimetern.                                                                                                                        |
| Nennwärmeleistung                                    | Höchste Dauerleistung einer Anlage für die sie gemäss Herstellerangaben ohne zeitliche Einschränkung ausgelegt ist.                                                                                                                                                                                                                             |
| Netzdifferenzdruck Differenzdruck                    | Der Netzdifferenzdruck bezeichnet den im thermischen Netz zu beachtende Druckunterschied zwischen Vor- und Rücklauf. Der Differenzdruck nimmt mit Abstand vom Einspeisepunkt zum Kunden ab.                                                                                                                                                     |
| Netzleistung, maximale und momentane Netzleistung    | Die <i>maximale Netzleistung</i> ist die im Auslegefall am Einspeisepunkt abzudeckende Wärmeleistung. Sie ergibt sich aus dem maximalen Leistungsbedarf aller Kunden zuzüglich dem Leistungsbedarf zur Deckung Verteilverluste. Die <i>momentane Netzleistung</i> entspricht bei regulärem Betrieb dem effektiven Leistungsbedarf aller Kunden. |
| Netzschlechtputpunkt                                 | Standort des geringsten Differenzdruckes zwischen Vor- und Rücklauf. Der Standort kann Abhängig vom momentanen Leistungsbedarf im Netz wandern. Der Netzschlechtputpunkt dient zur Regelung der Drehzahl der Netzpumpen.                                                                                                                        |
| Netztemperaturen                                     | Diese werden als Angabe der (maximalen) Vor- und Rücklauftemperatur in Grad Celsius verwendet (z. B. 80/50).                                                                                                                                                                                                                                    |

| Begriff                                                            | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Netztrennung                                                       | Die Netztrennung bezeichnet die Trennung zweier hydraulischer Kreise, beispielsweise durch einen Wärmeübertrager oder eine hydraulische Weiche. Netztrennungen führen zu zusätzlichen Energieverlusten, sowohl an Wärme als auch an Strömungsenergie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Nutzungsgrad                                                       | Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis zwischen der in einem längeren Betrachtungszeitraum erzeugten Nutzenergie über die im Betrachtungszeitraum zugeführten Energie. Dies entspricht dem Verhältnis zwischen der im Betrachtungszeitraum aufsummierten Nutzleistung (z. B. die über den Wärmezähler aufsummierte produzierte Wärme) dividiert durch die über den Betrachtungszeitraum aufsummierte zugeführte Leistung (z. B. dem Heizwert des verfeuert Brennstoffs). Wenn die Betrachtung über einen Zeitraum von einem Jahr erfolgt, wird dies als Jahresnutzungsgrad bezeichnet.<br>Wird das Verhältnis von Nutzenergie zu zugeführter Energie über eine kurze Betrachtungsdauer oder als Momentwert bestimmt, wird dies als Wirkungsgrad bezeichnet (siehe auch Wirkungsgrad). |
| PMR                                                                | Flexibles Kunststoffmediumrohr mit einem PUR-Schaum als Wärmedämmung und einem Schutzmantel aus Polyethylen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Primäre Rücklaufftemperatur                                        | Temperatur des Wärmeträgermediums, das vom Kunde zum Wärmeerzeuger fließt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Primäre Vorlaufftemperatur                                         | Temperatur des Wärmeträgermediums, das vom Wärmeerzeuger zum Kunde fließt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Primärseite                                                        | Als Primärseite wird der mit dem Wärmeträgermedium durchströmte Anlagenteil des Verteilnetzes des thermischen Netzes bezeichnet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Redundanz                                                          | Bereitstellung einer zusätzlichen, im Regelbetrieb nicht notwendigen funktionalen Einheit zur Erhöhung der Betriebs- und Versorgungssicherheit.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Ringnetz                                                           | Bei einem Ringnetz sind eine oder mehrere Leitungen zu einem Ring zusammengeschlossen. Dadurch kann die Versorgungssicherheit erhöht werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Rohrrauheit                                                        | Kenngroße einer Oberfläche (hier der Rohrwand) für die Höhe der Unebenheiten in Millimeter.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Rohr widerstandsbeiwert<br>Rohrreibungszahl<br>Rohrreibungsbeiwert | Dimensionslose Kennzahl zur Berechnung des Druckabfalls einer Strömung in einem Rohr.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Rohrstatik                                                         | Berechnungsvorgehen zur Bewertung der Festigkeit und zur Auslegung von Rohrleitungen und Leitungsbestandteilen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Saisonbetrieb                                                      | Saisonale Bereitstellung und Lieferung von Wärme und/oder Kälte an die Kunden, meist während der Heizsaison und in der Übergangszeit.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Schlechtpunkt                                                      | Siehe Netzschlechtpunkt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Schlüsselkunde                                                     | Ein Schlüsselkunde ist ein Kunde (oder in der Planungsphase ein potenzieller Kunde) mit einem grossen Energiebedarf in Form von Wärme und/oder Kälte in einem zu beurteilenden Gebiet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Sekundäre Rücklaufftemperatur                                      | Temperatur des Heizwassers, das von den einzelnen Verbrauchern beim Kunden zur Übergabestation strömt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Sekundäre Vorlaufftemperatur                                       | Temperatur des Heizwassers von der Übergabestation zu den einzelnen Verbrauchern beim Kunden. Die Gebäudeinstallation beim Kunden wird als sekundär bezeichnet, unabhängig ob eine hydraulische Trennung (Wärmeübertrager) zum thermischen Netz vorhanden ist.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Sekundärseite                                                      | Als Sekundärseite wird der vom Wärmeträgermedium der Hausanlage durchströmte Anlagenteil bezeichnet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Situationserfassung                                                | Die Situationserfassung ist eine Analyse der Ist-Situation mit Erfassung des Energie- und Leistungsbedarfs für Wärme oder Kälte (z. B. Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme), der baulichen Situation für die Trassenverlegung, des potenziellen Wärmeversorgungsgebietes etc.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Spitzenlastabdeckung                                               | Wärmeerzeugungseinheit zur Deckung der Spitzenlast. Diese sollte, wenn möglich, einen breiten Regelbereich aufweisen und schnell zu- und weggeschaltet werden können.<br>Als zusätzliche Redundanz werden Spitzenlastkessel oft gross ausgelegt, um den Ausfall einer oder mehrerer Grundlastkessel zu kompensieren.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| SMR                                                                | Starres Stahlmediumrohr mit einem Mantelrohr aus Stahl als Schutz. Die Wärmedämmung erfolgt hauptsächlich durch ein Vakuum zwischen Medium- und Mantelrohr.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Stammleitung                                                       | Siehe Hauptleitung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tarifblatt                                                         | Das Tarifblatt ist Teil des Wärmeliefervertrages und regelt die Bedingungen für das Erbringen der Wärmelieferung.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Technische Anschlussvorschriften TAV,                              | Die Technische Anschlussvorschriften TAV, auch Technische Anschlussbedingungen TAB, genannt, regeln alle technisch relevanten Anschlussbedingungen wie Druck, Temperatur, Material, Verbindungstechnik, Messausrüstung, Verrechnung, etc.. Diese gelten bei der Planung, dem Anschluss und Betrieb des thermischen Netzes. Die TAV sind Teil des Wärmeliefervertrages.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

| Begriff                                         | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temperaturspreizung                             | Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Thermisches Netz                                | <p>Thermisches Netz ist ein Überbegriff für die leitungsgebundene Wärme- und Kälteversorgung. Grundsätzlich ist damit das Gesamtsystem mit Energieerzeugung, Verteilung und Übergabe gemeint. Der Überbegriff beinhaltet somit Bezeichnungen wie Hochtemperaturnetze, Niedertemperaturnetze, Fernwärme, Nahwärme, Kalte Fernwärme, Anergie-netz und so weiter.</p> <p>Mit dem Begriff thermisches Netz kann aber auch nur das Verteilnetz mit allen nötigen Einrichtungen zur Versorgung von Kunden mit Wärme oder Kälte gemeint sein. Als Wärmeträger dienen Wasser, Dampf, Wasser-Ethanol- oder Wasser-Glykol-Gemische. Der Wärmeträger fliesst in einem geschlossenem System vom Wärmeerzeuger zu den Kunden und zurück. Das geschlossene System bildet das thermische Netz.</p> |
| Trasse                                          | Die Trasse ist der für die Führung der Leitungen erforderliche Geländebereich.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Trassenlänge                                    | Länge der Trasse von Haupt-, Zweig, und Hausanschlussleitungen in Meter. Es wird dabei je ein Meter Leitung für Vor- und Rücklauf berücksichtigt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Trinkwasser                                     | Nach der schweizerischen Lebensmittelgesetzgebung ist Trinkwasser definiert als Wasser, das natürlich belassen oder nach Aufbereitung zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen sowie zur Reinigung von Gegenständen bestimmt ist, die mit Lebensmittel in Berührung kommen [249]. Wasser in Trinkwasserqualität wird auch für Körperpflege und –reinigung (Dusch- und Badewasser usw.) verwendet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Übergabestation                                 | Die Übergabestation ist das Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung und der Hauszentrale. Sie dient der vertragsgemässen Übergabe der Wärme und/oder Kälte und der Messung des Wärme- oder Kältebezuges.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Umgebungswärme, Umweltwärme                     | Umgebungswärme oder Umweltwärme ist eine erneuerbare, natürliche und überall verfügbare Energieform auf relativ tiefem Temperaturniveau. Quellen von Umgebungswärme sind die Luft, das obere Erdreich sowie Grund-, See- und Flusswasser. Mit Wärmepumpen kann Umgebungswärme auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und nutzbar gemacht werden. Dazu ist die Zufuhr von hochwertiger Energie in der Regel in Form von Elektrizität aus einer anderen Quelle erforderlich.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Verbraucher                                     | Siehe Kunde                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Verteilleitung                                  | Siehe Zweigleitung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Vollbetriebsstunden und Vollbetriebsstundenzahl | Die Vollbetriebsstundenzahl ist der Jahresenergiebedarf dividiert durch die Nennwärmeleistung. Sie ist eine wichtige Kenngrösse zur Anlagendimensionierung für einen einzelnen Verbraucher oder das ganze System. Eine Vollbetriebsstunde entspricht zum Beispiel einer Stunde Betrieb bei Nennlast oder zwei Betriebsstunden bei 50% Last und es gilt: Anzahl Vollbetriebsstunden $\leq$ Anzahl jährlicher Betriebsstunden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Wandrauheit                                     | Siehe Rohrauheit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Wärme-Kraft-Kopplung                            | Eine Anlage zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) nutzt eine thermische Maschine wie zum Beispiel einen Verbrennungsmotor oder eine Dampfturbine zur Krafterzeugung, die meistens zur Stromproduktion dient und mit gleichzeitiger Nutzung der Abwärme des thermischen Prozesses als Nutzwärme. WKK-Anlagen mit Motoren oder kleinen Gasturbinen werden auch als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet, während thermische Kraftwerke mit Abwärmenutzung als Heizkraftwerke bezeichnet werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Wärmebedarfsdichte                              | <p>Die Wärmebedarfsdichte ist der jährliche Wärmebedarf aller Gebäude eines Versorgungsgebietes im Verhältnis zur Grundfläche.</p> <p>Das Pendant bei Kälte ist die Kältebedarfsdichte.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Wärmebezugsdichte                               | <p>Die Wärmebezugsdichte ist der jährliche Wärmebezug aller Gebäude eines Versorgungsgebietes im Verhältnis zur Grundfläche.</p> <p>Das Pendant bei Kälte ist die Kältebezugsdichte.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Wärmeerzeugungsanlage                           | Ein Wärmeerzeuger wandelt Endenergie in Nutzwärme um und überträgt diese an ein Heizmedium. Das Pendant bei Kälte ist die Kälteerzeugungsdichte.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Wärmeabnehmer, -bezüger oder -kunde             | Siehe Kunde.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Wärmeleistungsdichte                            | <p>Auf eine Gebietsfläche bezogene maximale Wärmeleistung.</p> <p>Das Pendant bei Kälte ist die Kälteleistungsdichte.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Wärmeliefervertrag                              | Im Wärmeliefervertrag ist die Schnittstelle zwischen Wärmelieferant und Kunde vertraglich vereinbart. Üblicherweise enthält der Wärmeliefervertrag zusätzlich folgende Vertragsbestandteile: Allgemeine Geschäftsbedingungen AGB, Technische Anschlussvorschriften TAV und ein Tarifblatt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Wärmespeicher                                   | Wärmespeicher für thermische Netze werden oft als drucklose, mit Wasser befüllte Behälter ausgeführt. Sie dienen dazu, den Wärmebedarf des thermischen Netzes auszugleichen, indem Lastschwankungen durch den Speicher abgedeckt werden. Dies ermöglicht teilweise eine kleinere Dimensionierung und eine optimierte Betriebsweise der Wärmeerzeugung. Die Grösse der Speicher hängt von der Aufgabe ab. Das Fassungsvermögen kann wenige Kubikmeter bis mehrere Tausend Kubikmeter betragen.                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

| Begriff           | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wärmeträgermedium | Das für die Wärmeübertragung im Verteilnetz eingesetzte Medium. Als Wärmeträger dienen Wasser, Dampf, Wasser-Ethanol- oder Wasser-Glykol-Gemische, in der Industrie teilweise auch Thermoöl.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Wärmeübertrager   | Ein Wärmeübertrager ist ein Apparat, in dem thermische Energie von einem warmen Stoffstrom auf einen anderen, kälteren Stoffstrom übertragen wird.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Warmwasser        | <p>Der Begriff Warmwasser wird in der Gebäudetechnik und in thermischen Netzen unterschiedlich wie folgt verwendet: In thermischen Netzen beschreibt Warmwasser das Zirkulationswasser, wenn die Temperatur bis zu 110°C beträgt, während Zirkulationswasser mit über 110°C als Heisswasser bezeichnet wird. Warmwasser im thermischen Netz muss nicht zwingend Trinkwasserqualität aufweisen und ist daher nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Gebäudetechnik.</p> <p>In der Gebäudetechnik steht Warmwasser für erwärmtes Trinkwasser, das bei Bedarf erwärmt oder in Warmwasserspeicher bei rund 60°C zur Verfügung gestellt wird. Um erwärmtes Trinkwasser von Zirkulationswasser im thermischen Netz zu unterscheiden, wird es im vorliegenden Handbuch als Brauchwarmwasser BWW bezeichnet, das mit einer Brauchwarmwassererwärmung BWE zur Verfügung gestellt wird.</p> |
| Werkleitungen     | Der Begriff umfasst unter anderem Kanalisations-, Wasser, Abwasser und Stromleitungen einer Gemeinde, einer Stadt oder einem Unternehmen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Wirkungsgrad      | <p>Der Wirkungsgrad einer technischen Anlage beschreibt das Verhältnis zwischen Nutzenergie und zugeführter Energie. Bei stationären Bedingungen ohne Verfälschung durch Speichereffekte kann der Wirkungsgrad auch als Verhältnis zwischen Nutzleistung und zugeführter Leistung bestimmt werden. Im vorliegenden Handbuch wird der Begriff des Wirkungsgrades für einen über die Leistungen bestimmten Momentanwert oder einen über eine kurze Betrachtungsdauer ermittelten Wert verwendet.</p> <p>Zur Bewertung des Anlagenbetriebs über einen längeren Betrachtungszeitraum beschreibt der Nutzungsgrad das Verhältnis zwischen der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten Nutzleistung zu der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten zugeführten Leistung (siehe auch Nutzungsgrad)...</p>                                                                            |
| Zentralheizung    | Eine Zentralheizung dient zur Wärmeversorgung eines Gebäudes durch einen zentralen Wärmeerzeuger. Das Pendant bei Kälte ist die Zentralkühlung.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Zweigleitung      | Zweig- oder Verteilleitungen sind Abgänge von den Hauptleitungen zu einzelnen Verbrauchergruppen, Quartiere, Gebiete etc.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## 16 Quellenverzeichnis

- [1] «Chaudes-Aigues», *Wikipedia*. 7. Oktober 2023. Zugriffen: 10. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Chaudes-Aigues&oldid=237951626>
- [2] J. F. Collins, «The history of district heating», *District Heating*, Nr. April 1959, S. 76, 1959.
- [3] S. Frederiksen und S. Werner, *District heating and cooling*, 1. Auflage. Lund: Studentlitteratur, 2013.
- [4] U. Joho, *Deutsch: Fernwärme. Leipzig 1986. Das Bild zeigt die ehemalige Bahnstrecke Eilenburg-Leipzig Richtung ehemaliger Eilenburger Bahnhof Leipzig. Aufgenommen von der Brücke Martinstraße*. 1986. Zugriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:021\\_DDR.\\_Fernw%C3%A4rme.\\_Leipzig\\_1986.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:021_DDR._Fernw%C3%A4rme._Leipzig_1986.jpg)
- [5] «Euroheat & Power DHC Market Outlook 2023», Euroheat & Power, Brüssel, Mai 2023. Zugriffen: 12. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.euroheat.org/data-insights/outlooks/market-outlook-2023>
- [6] «Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2023», Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2024. Zugriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>
- [7] «Thermische Netze Schweiz - Jahresbericht 2024», Thermische Netze Schweiz (TNS), Bern, Jahresbericht, März 2025. Zugriffen: 27. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thermische-netze.ch/verband/jahresberichte-tns/>
- [8] D. Hanggartner und A. Hurni, «Liste «Thermische Netze» - Auswertungsbericht 2021», Verband Fernwärme Schweiz VFS, Bern, Schlussbericht, März 2022. Zugriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10878>
- [9] «Räumliche Energieplanung - Werkzeuge für eine zukunftstaugliche Wärme- und Kälteversorgung; Information für kommunale Behörden und Fachpersonen», Planar AG für Raumentwicklung, Zürich, Übersicht Module 1 bis 10, Nov. 2024. Zugriffen: 25. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.local-energy.swiss/dam/jcr:005af135-ee04-43bc-a30b-87b8e8462602/Raumliche\\_Energieplanung\\_M0\\_alle\\_Module\\_de.pdf](https://www.local-energy.swiss/dam/jcr:005af135-ee04-43bc-a30b-87b8e8462602/Raumliche_Energieplanung_M0_alle_Module_de.pdf)
- [10] «Räumliche Energieplanung», Local Energy. Zugriffen: 25. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.local-energy.swiss/infobox/raumliche-energieplanung.html>
- [11] Schweizerische Eidgenossenschaft Der Bundesrat, «Potenzial von Fernwärme- und Fernkälteanlagen; Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 19.4051, FDP-Liberale Fraktion, 18. September 2019», Bern, BFE-042.16-127/5, Dez. 2021. Zugriffen: 24. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-86491.html>
- [12] A. Sres, «Weissbuch Fernwärme Schweiz - VFS Strategie», Dr. Eicher+Pauli AG, Bern, März 2014. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.thermische-netze.ch/fileadmin/user\\_upload/Dokumente/Publikationen/Downloads/Fernwaerme\\_Weissbuch-deutsch.pdf](https://www.thermische-netze.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente/Publikationen/Downloads/Fernwaerme_Weissbuch-deutsch.pdf)
- [13] EHP-Redaktion, «Weltweit größte Luft-Wasser-Wärmepumpe für Fernwärmeversorgung in Helsinki». Zugriffen: 21. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie.de/euroheatpower/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/weltweit-groesste-luft-wasser-waermepumpe-fuer-fernwaermeversorgung-in-helsinki>
- [14] C. Kulemann, P. Husi, R. Gürber, A. Grüniger, und S. Gemperle, «Abwärmenutzung von Rechenzentren – Potenzialstudie und Empfehlungen für Betreiber und Gemeinden», eicher+pauli Olten AG im Auftrag von EnergieSchweiz, Olten, Bern, Schlussbericht, Juni 2023. Zugriffen: 27. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11426>
- [15] M. Berger und J. Worlitschek, «The link between climate and thermal energy demand on national level: A case study on Switzerland», *Energy Build.*, Bd. 202, S. 109372, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109372.
- [16] X. Li, J. Chambers, S. Yilmaz, und M. K. Patel, «A Monte Carlo building stock model of space cooling demand in the Swiss service sector under climate change», *Energy Build.*, Bd. 233, S. 110662, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110662.
- [17] R. Mutschler, M. Rüdisüli, P. Heer, und S. Eggimann, «Benchmarking cooling and heating energy demands considering climate change, population growth and cooling device uptake», *Appl. Energy*, Bd. 288, S. 116636, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116636.
- [18] «Fernwärme in Kürze», Hochschule Luzern Technik und Architektur, Horw, März 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.endk.ch/de/ablage/energieberatung/Merkblatt%20Fernwaerme%20in%20Kuerze%2020190502\\_d.pdf](https://www.endk.ch/de/ablage/energieberatung/Merkblatt%20Fernwaerme%20in%20Kuerze%2020190502_d.pdf)
- [19] S. Thalmann, A. Hurni, S. Mennel, und T. Nussbaumer, «Faktenblatt Thermische Netze», Verenum AG, Zürich, Feb. 2021. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.verenum.ch/Dokumente\\_QMFW.html](http://www.verenum.ch/Dokumente_QMFW.html)
- [20] C. Felsmann, W. Richter, K. Rühling, und S. Gnüchtel, *LowEx-Fernwärme Multilevel District Heating; Zusammenfassung*, 1. Auflage. Dresden: TUDpress, 2011.

- [21] F. Espig, «Netztemperaturen». AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Februar 2022. Zugriffen: 27. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/technik-normung/aktuelles-aus-dem-bereich/newsdetail/neue-broschuere-netztemperaturen>
- [22] M. Kolb und J. Scherrer, «Vertiefungskurs Thermische Arealvernetzung», Online, 21. März 2024.
- [23] J. Ködel und D. Hanggartner, «Fallbeispiele (Thermische Netze)», Hochschule Luzern, Horw, Zusammenfassung, Feb. 2018.
- [24] Helge Averfalk u. a., *Low-temperature district heating implementation guidebook. Annex TS2 Implementation of low-temperature district heating systems*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2021.
- [25] Exergo, «Exergo von Groupe E für ein Vorzeigeprojekt in Freiburg ausgewählt», Exergo. Zugriffen: 27. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://exergo.com/de/exergo-von-groupe-e-fuer-ein-vorzeigeprojekt-in-freiburg-ausgewaehlt/>
- [26] J. Page u. a., «Réseau de distribution de chaleur et de froid utilisant le CO2 comme fluide caloporteur (Réseau-CO2)», HES-SO Valais-Wallis, EPFL Valais, ExerGo SA, Oiken SA, Zero-C, Sion, Yverdon-les-Bains, St-Pierre-de-Clages, Schlussbericht, Dez. 2023. Zugriffen: 21. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47024>
- [27] T. Nussbaumer und S. Thalmann, «Influence of system design on heat distribution costs in district heating», *Energy*, Bd. 101, S. 496–505, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.02.062.
- [28] S. Thalmann, T. Nussbaumer, J. Good, und A. Jenni, «Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen – Ist-Analyse von Fernwärmenetzen und Bewertungs-Tool zur Netz-Optimierung», Bundesamt für Energie BfE, Zürich, Schlussbericht, 2013.
- [29] «ÖKL-Merkblatt 67 Planung von Biomasseheizwerken und Nahwärmenetzen», Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Wien, 3. Auflage, 2016. Zugriffen: 18. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://oekl.at/publikationen/merkblaetter/mb67/>
- [30] T. Nussbaumer, S. Thalmann, A. Jenni, und J. Ködel, *Planungshandbuch Fernwärme*, Version 1.3. Zürich: Verenum Dr. Thomas Nussbaumer, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.verenum.ch/Planungshandbuch\\_QMF\\_W.html](http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMF_W.html)
- [31] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Hrsg., *Hausanschlüsse an Fernwärmenetze - Technik - Fachliteratur*, 1. Auflage. Frankfurt am Main: AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., 2004. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/agfw-fachliteratur/waermeerzeugung/hausanschluesse-an-fernwaermenetze.html>
- [32] B. Meier, C. Moser, C. Vogler, und R. Dettli, «Sozioökonomische Aspekte thermischer Netze», econcept AG, Zürich, Schlussbericht, Apr. 2019. Zugriffen: 18. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.econcept.ch/de/projekte/soziooekonomische-aspekte-thermischer-netze/>
- [33] «SIA 380/1 Heizwärmebedarf», Zürich, Norm SN 520380-1:2016, Jan. 2016. Zugriffen: 21. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-520380-1-2016-2>
- [34] «SIA 384/2 - Heizungsanlagen in Gebäuden - Leistungsbedarf», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Richtlinie SN 546384-2:2020, Juni 2020. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/384-2\\_2020\\_d/D/Product](https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/384-2_2020_d/D/Product)
- [35] I. Bosshard u. a., «OptiPower – Untersuchung der optimalen Auslegung der Leistung von Heiz- und Kühlsystemen für Wohn- und Verwaltungsgebäude», SPF Institut für Solartechnik - Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil, Schlussbericht, Sep. 2023. Zugriffen: 12. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48242>
- [36] «SIA 380/2 - Energetische Berechnungen von Gebäuden - Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf», 1.11.202222. Zugriffen: 12. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/380-2\\_2022\\_d/D/Product](https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/380-2_2022_d/D/Product)
- [37] K. Kelevitz, D. Philippen, und A. Schmitt, «OptiSanPower – Untersuchung der optimalen Auslegung des Wärmeerzeugers beim Heizungersatz in Wohngebäuden - Texte», SPF Institut für Solartechnik - Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil, Zwischenbericht, Aug. 2025. Zugriffen: 12. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=55972>
- [38] Konferenz Kantonalen Energiedirektoren EnDK, Hrsg., «Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich - MuKEN 2014». 2018. Zugriffen: 17. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.endk.ch/de/energiepolitik-der-kantone/muken>
- [39] J. Good u. a., *Planungshandbuch QM Holzheizwerke*, 3. komplett überarbeitete Auflage., Bd. 4, 5 Bde. in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 4. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2022.
- [40] C. Doetsch, J. Taschenberger, und I. Schönberg, «Leitfaden Nahwärme», S. 167, 1998, doi: <https://doi.org/10.24406/UMSICHT-PX-52182>.
- [41] T. Nussbaumer, J. Good, F. Schumacher, und A. Lauber, «Fossilfreie Wärmeversorgung mit Holzkessel-Kaskaden und Speicher (HoKaSpe)», in *Innovationen zur Rolle von Energieholz im Energiesystem*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 17. Holzenergiesymposium., Zürich: Verenum A, 2022, S. 113–146. [Online]. Verfügbar unter: <https://holzenergiesymposium.ch/rueckblick/#symposium17>

- [42] «Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p Vollzugsblätter Emissionsüberwachung - Holzfeuerungen über 70 kWFWL», Frauenfeld, Vollzugsblatt 31p, Apr. 2023. Zugriffen: 28. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://cerclair.ch/neue-cerclair-vollzugsbl%C3%A4tter-emissions%C3%BCberwachung-cerclair-empfehlung-nr-31p>
- [43] F. Schumacher und T. Nussbaumer, «Four approaches for the year-round operation of wood-fired heating plants with low pollutant emissions», *Energy*, Bd. 278, S. 127596, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127596.
- [44] T. Nussbaumer, «100% erneuerbare Gebäudewärme mit 25% Holz und 75% PV-Wärmepumpen», in *Innovationen zur Rolle von Energieholz im Energiesystem*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 17. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2022, S. 47–70. [Online]. Verfügbar unter: [https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband17HES\\_2022.pdf](https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband17HES_2022.pdf)
- [45] R. Spörl, «Neue Konzepte für 15% Tieflastbetrieb und adaptive Feuerungsregelung an automatischen Holzheizkesseln», in *Innovationen zur Rolle von Energieholz im Energiesystem*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 17. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2022, S. 147–160. [Online]. Verfügbar unter: [https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband17HES\\_2022.pdf](https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband17HES_2022.pdf)
- [46] J. Good und P. Zotter, «Grundlagen und Empfehlungen zur Dimensionierung von Wärmespeichern bei Holzheizkesseln», Verenum AG im Auftrag vom BAFU, Zürich, Bern, Schlussbericht, Apr. 2022. Zugriffen: 3. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2024/11/Good-Zotter\\_Vollzugshilfe-Dimensionierung-Waermespeicher-Holzfeuerungen\\_BAFU\\_2022.pdf](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2024/11/Good-Zotter_Vollzugshilfe-Dimensionierung-Waermespeicher-Holzfeuerungen_BAFU_2022.pdf)
- [47] U. Rhyner, H.-P. Hauri, und R. Schelbert, «20 MWth Holzheizkraftwerk mit 1.5 MWe ORC und 17 MW Fernwärme», in *Entwicklungen für Wärme, Kraft und Fernwärme aus Holz*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 13. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2014, S. 260–273. [Online]. Verfügbar unter: <https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband13HES.pdf>
- [48] P. Reichmuth, «Holzheizkraftwerk Küssnacht am Rigi mit Pelletproduktion und Fernwärmenetz», in *Innovationen zur Rolle von Energieholz im Energiesystem*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 17. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2022, S. 71–82. [Online]. Verfügbar unter: [https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband17HES\\_2022.pdf](https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/07/Tgband17HES_2022.pdf)
- [49] H. Fichtl und U. Rhyner, «Wärme-Kraft-Kopplung mit Altholz zur Versorgung des Netzes von Energie Ausserschwyz», in *Von der Forschung zur Umsetzung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 18. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2024, S. 127–142. [Online]. Verfügbar unter: [https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/09/18\\_Holzenergie-Symposium\\_2024.pdf](https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/09/18_Holzenergie-Symposium_2024.pdf)
- [50] D. Spescha, M. Wild, D. Müller, und J. Rohrer, «DecaTherm - Fossillfreie thermische Netze – Lösungsbeispiele und Wirtschaftlichkeit», Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen IUNR, Forschungsgruppe Erneuerbare Energien, Wädenswil, Schlussbericht, Juni 2025. Zugriffen: 14. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21256/zhaw-2646>
- [51] L. Deschaintre, M. Felber, und S. Thalmann, «Leitfaden für emissionsfreie thermische Netze - Massnahmenkatalog für die Dekarbonisierung und Flexibilisierung von thermischen Netzen», Planair SA und Verenum AG, Yverdon-les-Bains und Zürich, Leitfaden, Aug. 2023. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Gesammelte-Resultate.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Gesammelte-Resultate.zip)
- [52] S. Thalmann und L. Deschaintre, «Leitfaden zu Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze», Verenum AG und Planair SA, Zürich und Yverdon-les-Bains, Feb. 2023. Zugriffen: 12. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thermische-netze.ch/de/thermische-netze/studien>
- [53] «RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR DISTRICT HEATING AND COOLING (RES-DHC) - Home», RES-DHC. Zugriffen: 19. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.res-dhc.com/en/>
- [54] Schweizerische Eidgenossenschaft, Der Bundesrat, *Verordnung über die Förderung der Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energien (Energieförderungsverordnung, EnFV)*, Bd. 730.03. 2018. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/766/de>
- [55] T. Nussbaumer, «QM für Holzvergaser-BHKW und Pflanzenkohleanlagen», in *Von der Forschung zur Umsetzung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 18. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2024, S. 7–23. [Online]. Verfügbar unter: [https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/09/18\\_Holzenergie-Symposium\\_2024.pdf](https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/09/18_Holzenergie-Symposium_2024.pdf)
- [56] «Erdwärme Riehen - Erdwärme Riehen». Zugriffen: 17. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.erdwaermeriehen.ch:443/erdwaermeriehen.html>
- [57] «Projekte – Geothermie». Zugriffen: 17. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://geothermieschweiz.ch/projekte-2/>
- [58] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Luftreinhalte-Verordnung (LRV)*, Bd. 814.318.142.1. 1985, S. 96. Zugriffen: 12. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html>
- [59] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA)*, Bd. SR 814.600. 2015, S. 50. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de>

- [60] T. Nussbaumer, «Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050», *Schweiz. Z. Forstwes.*, Bd. 164, S. 389–397, Dez. 2013, doi: 10.3188/szf.2013.0389.
- [61] R. von Euw, Hrsg., *Gebäudetechnik – Systeme integral planen*. Zürich: Faktor Verlag AG, 2022. Zugriffen: 17. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://faktor.ch/produkt/gebaeudetechnik-systeme-integral-planen/>
- [62] C. Arpagaus, *Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2019.
- [63] C. Arpagaus, «Grosswärmepumpen ab 500 kW: Technik, Kosten und Potenzial», in *Von der Forschung zur Umsetzung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 18. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Verenum A, 2024, S. 23–36. [Online]. Verfügbar unter: [https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/09/18\\_Holzenergie-Symposium\\_2024.pdf](https://holzenergie-symposium.ch/wp-content/uploads/2024/09/18_Holzenergie-Symposium_2024.pdf)
- [64] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Übersicht über die wichtigsten Kältemittel». Februar 2025. Zugriffen: 22. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: [file:///C:/Users/STEFAN~1/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/c52bc729-a8e0-42af-81a2-2dc325b5e872/uebersicht\\_ueberdie wichtigstenkaeltemittel.pdf](file:///C:/Users/STEFAN~1/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/c52bc729-a8e0-42af-81a2-2dc325b5e872/uebersicht_ueberdie wichtigstenkaeltemittel.pdf)
- [65] «Quagga-Dreikantmuschel», *Wikipedia*. 27. April 2025. Zugriffen: 4. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Quagga-Dreikantmuschel&oldid=255516270>
- [66] «Heizen und Kühlen mit Abwasser und Oberflächenwasser - Planungshilfe 2025», Zürich, Planungshilfe, 2024. Zugriffen: 4. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-aus-untergrund-und-wasser/waerme-kuehlnutzung-aus-fluessen-und-seen/awel\\_planungshilfe\\_heizen\\_kuehlen\\_abwasser\\_oberflaechenwasser.pdf](https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-aus-untergrund-und-wasser/waerme-kuehlnutzung-aus-fluessen-und-seen/awel_planungshilfe_heizen_kuehlen_abwasser_oberflaechenwasser.pdf)
- [67] D. Hanggartner, J. Ködel, und B. Wellig, «Wärmepumpen in Thermischen Netzen», Hochschule Luzern Technik und Architektur im Auftrag für EnergieSchweiz, Horw, Bern, Schlussbericht, Mai 2020. Zugriffen: 4. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10091>
- [68] A. Duret, S. Pauletta, X. Jobard, G. Demonchy, M. Frossard, und S. Lasvaux, «SOLARCAD II – Optimisation et suivi des performances d'une grande installation solaire thermique couplée avec un réseau de chauffage à distance», HEIG-VD, Yverdon-les-Bains, Schlussbericht, Sep. 2024. Zugriffen: 14. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=45279>
- [69] «Sonnenwärme - Kosten und Kennzahlen», EnergieSchweiz, Bern, Sep. 2002. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/795>
- [70] F. Ruesch, M. Caflisch, und M. Haller, «BioSolFer - Integration von Solarwärme in Biomasse Fernwärmenetze», Institut für Solartechnik SPF für Bundesamt für Energie, Rapperswil, Bern, Schlussbericht, Sep. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3\\_forschung\\_dienstleistung/institute/spf/forschung/projekte/biosolfer\\_schlussbericht\\_2020.pdf](https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/spf/forschung/projekte/biosolfer_schlussbericht_2020.pdf)
- [71] «Geothermie Schweiz - Jahresbericht 2023», Geothermie-Schweiz, Bern, Jahresbericht, 2024. Zugriffen: 21. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://geothermie-schweiz.ch/verband/bekanntnis/>
- [72] A. Huber, «Benutzerhandbuch zum Programm EWS Version 5.5 - Berechnung von Erdwärmesonden», Zürich, Aug. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hetag.ch/software.html>
- [73] Huber Energietechnik AG, Zürich, «Software EWS: Programm zur Dimensionierung von Erdwärmesonden», Software. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hetag.ch/software.html>
- [74] «Geothermie Schweiz - Jahresbericht 2024», Geothermie-Schweiz, Bern, Jahresbericht, 2025. Zugriffen: 21. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://geothermie-schweiz.ch/verband/bekanntnis/>
- [75] Schweizerische Eidgenossenschaft, «Karten der Schweiz - Schweizerische Eidgenossenschaft - Tiefengeothermie-Projekte». Zugriffen: 21. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://map.geo.admin.ch/#map?lang=de&center=2621154.2,1191142.24&z=1&topic=ech&layers=ch.swisstopo.zeitreihen@year=1864,f;ch.bfs.gebaeude\\_wohnungs\\_register,f;ch.bav.haltestellen-ovf,f;ch.swisstopo.swisstim3d-wanderwege,f;ch.astra.wanderland-sperrungen\\_umleitungen,f;ch.swisstopo.geologie-tiefengeothermie\\_projekte&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe](https://map.geo.admin.ch/#map?lang=de&center=2621154.2,1191142.24&z=1&topic=ech&layers=ch.swisstopo.zeitreihen@year=1864,f;ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,f;ch.bav.haltestellen-ovf,f;ch.swisstopo.swisstim3d-wanderwege,f;ch.astra.wanderland-sperrungen_umleitungen,f;ch.swisstopo.geologie-tiefengeothermie_projekte&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe)
- [76] «Energieerzeugung der Zukunft», Steamergy. Zugriffen: 10. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://steamergy.com/>
- [77] M. Haller und F. Ruesch, «Fokusstudie «Saisonale Wärmespeicher – Stand der Technik und Ausblick»», Institut für Solartechnik SPF im Auftrag vom Forum Energiespeicher Schweiz, Rapperswil, Feb. 2019. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://speicher.aeessuisse.ch/wp-content/uploads/sites/15/2021/09/FESS\\_Fokusstudie\\_Saisonale\\_Waermespeicher.pdf](https://speicher.aeessuisse.ch/wp-content/uploads/sites/15/2021/09/FESS_Fokusstudie_Saisonale_Waermespeicher.pdf)
- [78] M. Sterner und I. Stadler, Hrsg., *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-48893-5.

- [79] A. Hauer, S. Hiebler, und M. Reuß, *Wärmespeicher*, 5., Vollständig überarbeitete Auflage. in BINE-Fachbuch / BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [80] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 2: Stahl - Druckbehälter», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [81] «Referenzobjekt See-Energie-Netz Horw Kriens», Cowa. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cowa-ts.com/ueber-cowa/referenzen/referenzobjekt-fernwaerme-ewl>
- [82] «Cowa Thermal Solutions - Die neue Generation thermischer Speicherlösungen», Cowa. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cowa-ts.com/>
- [83] R. Haberl, «Temperaturschichtung in Wärmespeichern (Zer)störende Phänomene und Gegenmassnahmen», Institut für Solartechnik SPF und Ostschweizer Fachhochschule OST, Rapperswil, Empfehlungen. Zugriffen: 13. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/empfehlungen>
- [84] «BigStoreDH – Grosse Wärmespeicher für Wärmenetze | Projekt», OST. Zugriffen: 13. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [85] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 1: Druckloser Stahltank», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [86] Schweizerische Eidgenossenschaft, Der Bundesrat, *SR 832.311.141 - Verordnung über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Bauarbeiten (Bauarbeitenverordnung, BauAV)*, Bd. 832.311.141. 2022. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2021/384/de>
- [87] Schweizerische Eidgenossenschaft, Der Bundesrat, *SR 930.114 - Verordnung über die Sicherheit von Druckgeräten (Druckgeräteverordnung, DGV)*, Bd. 930.114. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2016/28/de>
- [88] Schweizerische Eidgenossenschaft Der Bundesrat, *SR 930.113 - Verordnung vom 25. November 2015 über...* | *Fedlex*, Bd. 930.113. Zugriffen: 16. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2016/27/de?version=20160420&print=true>
- [89] Schweizerischer Verein für technische Inspektionen SVTI, Hrsg., «Inverkehrbringen von Druckgeräten und Baugruppen gemäss Druckgeräteverordnung und Druckbehälterverordnung». Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.svti.ch/marktueberwachung-druckgeraete/wissen/merkblaetter>
- [90] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 3: Erdvergrabener Betontank», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [91] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 4: Erdbecken Wärmespeicher», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [92] C. Zogg und J. Jimenez-Martinez, «Effekt von Hochtemperatur-Wärmespeicher auf das Grundwasser». Zugriffen: 16. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eawag.ch/de/info/portal/aktuelles/news/effekt-von-hochtemperatur-waermespeicher-auf-das-grundwasser/>
- [93] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 6: Aquifer Wärmespeicher», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [94] «Grundwasser als Wärmespeicher zum Heizen und Kühlen – das Beispiel Swatch-Omega», BFE-Magazin energieplus | Energiemagazin des Bundesamtes für Energie. Zugriffen: 22. Oktober

2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://energeiaplus.com/2023/06/07/grundwasser-als-waermespeicher-zum-heizen-und-kuehlen-das-beispiel-swatch-omega/>
- [95] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 7: Systemintegration», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [96] F. Ruesch und D. Mangold, «Wärmespeicher in thermischen Netzen - Faktenblatt 8: Kosten und Wirtschaftlichkeit», Institut für Solartechnik SPF und Solites im Rahmen des Forschungsprojektes BigStoreDH vom Bundesamt für Energie (BFE), Rapperswil, Stuttgart, Bern, Faktenblatt, 2023. Zugriffen: 11. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/erneuerbare-energien-und-umwelttechnik/spf-institut-fuer-solartechnik/forschung/projekte/details/bigstoredh-grosse-waermespeicher-fuer-waermenetze-1194>
- [97] A. Chrsitidis und I. G. Tsataronis, «Das ökonomische Potential von Wärmespeichern bei Heizkraftwerken im heutigen Strommarkt», in *ResearchGate*, doi: 10.13140/2.1.5142.6081.
- [98] T. Nussbaumer und S. Thalmann, «Netzdimensionierung mit «THENA» und Fernwärme-Optimierung durch Wärmespeicher und Betrieb», in *Netzintegration, Vorschriften und Feuerungstechnik*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 15. Holzenergie-Symposium, Zürich: Verenum A, 2018, S. 25–40. Zugriffen: 16. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://holzenergie-symposium.ch/rueckblick/#symposium15>
- [99] H. R. Gabathuler und H. Mayer, *Standard-Schaltungen Teil I QM Holzheizwerke*, 2. erweiterte Auflage., Bd. 2, 5 Bde. in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 2. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V, 2010.
- [100] D. Mangold, Miedaner, T. Ekaterini Primoudi, T. Schmidt, M. Unterberger, und B. Zeh, «Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung», Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Stuttgart, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607N, 2012.
- [101] P. Härtsch, «Automatisiertes Einsatzoptimierungssystem Energieoptimierung mit Meteodaten», St.Galler Stadtwerke, St.Gallen, Foliensatz Webinar Betriebsoptimierung und Dekarbonisierung von Thermische Netze Schweiz vom 29. August 2024, Aug. 2024.
- [102] T. Wietlisbach und M. Horeni, «Energiebedarfs-Prognosen: Ingenieurmässig oder mit KI? Beispiel Fernwärme», AEW Energie AG und solutions-ahead Schweiz GmbH, Foliensatz Workshop Fernwärme Netto-Null: Spitzenlastdeckung vs. Spitzenlastsenkung? im Rahmen des EU-Projekts RES-DHC vom 14. Juni 2023 in Küsnacht am Rigi, Juni 2023. Zugriffen: 16. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Workshop-Fernwaerme-Netto-Null-Spitzenlastdeckung-vs.-Spitzenlastsenkung.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Workshop-Fernwaerme-Netto-Null-Spitzenlastdeckung-vs.-Spitzenlastsenkung.zip)
- [103] K. Bedenk u. a., «FlexHKW - Flexibilisierung des Betriebs von Heizkraftwerken», Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES in Zusammenarbeit mit Bioenergie Wächtersbach, Next Kraftwerke und Seeger Engineering, Kassel, Endbericht, Apr. 2016. doi: 10.2314/GBV:871687992.
- [104] N. Bühler, «Absenkung Vorlauftemperatur im FW Netz Zürich West», Durena AG, Zürich, Foliensatz Webinar Betriebsoptimierung und Dekarbonisierung von Thermische Netze Schweiz vom 29. August 2024, Aug. 2024.
- [105] A. Peter, «Senkung der Netztemperaturen», Basel, 25. Januar 2024.
- [106] C. U. Brunner, J. Nipkow, P. Gyger, und T. Staubli, «Pumpen», Topmotors, Zürich, 2021. Zugriffen: 17. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D\\_MB\\_23\\_Pumpen.pdf](https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_23_Pumpen.pdf)
- [107] SWISSMEM, «SN EN 1333:2006 Flansche und ihre Verbindungen - Rohrleitungsteile - Definition und Auswahl von PN», SWISSMEM, Zürich, Mai 2006. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-1333-2006>
- [108] Arbeitsgruppe «Druck», «Druckgeräte Richtlinie (DGRL) 97/23/EG - Leitlinien». 1. März 2014. Zugriffen: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/Druckgeraete/Leitlinie/ped-guidelines\\_deutsch.pdf](https://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/Druckgeraete/Leitlinie/ped-guidelines_deutsch.pdf)
- [109] «DIN 16271:2004-07, Absperrventile PN 250 und PN 400 mit Prüfanschluss für Druckmessgeräte», DIN Media GmbH, Berlin, 2004. doi: 10.31030/9556817.
- [110] «FW 442 - Druckhaltung in Heizwasser-Fernwärmenetzen», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2011. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/4-warmeverteilung/fw-442c-druckhaltung-in-heizwasser-fernwarmenetzen-druckfassung.html>
- [111] «IEA DHC - District heating network generation definitions», International Energy Agency Technology Collaboration on District Heating and Cooling including Combined Heat and Power (IEA DHC), Frankfurt am Main, Feb. 2024. Zugriffen: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea-dhc.org/iea-dhc-network-generations>
- [112] H. Lund u. a., «4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future

- sustainable energy systems», *Energy*, Bd. 68, S. 1–11, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [113] H. Lund u. a., «Perspectives on fourth and fifth generation district heating», *Energy*, Bd. 227, S. 120520, Juli 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120520.
- [114] M. Sulzer, S. Werner, S. Mennel, und M. Wetter, «Vocabulary for the fourth generation of district heating and cooling», *Smart Energy*, Bd. 1, S. 100003, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.segy.2021.100003.
- [115] S. Werner, «Network configurations for implemented low-temperature district heating», *Energy*, Bd. 254, S. 124091, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124091.
- [116] R. Wiltshire, A. Jentsch, und L. Gullev, «DISTRICT HEATING GENERATIONS – Clarification of the term “District Heating Generations”», *HOT-COOL ENERGY STORAGE*, Bd. HOT[COOL NO. 5/2024 «ENERGY STORAGE», Nr. NO. 5/2024, S. 25, 2024.
- [117] Konferenz Kantonalen Energiedirektoren EnDK, Hrsg., «Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich - MuKen 2025». 2025. Zugriffen: 14. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-zentralschweiz.ch/fachinformationen/muken.html>
- [118] R. Limacher, «06243.014\_Faktenblatt WD von FW-Leitungen», Basler & Hofmann AG, Luzern, Schlussbericht, Mai 2020. Zugriffen: 19. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://energiehub-gebaeude.ch/wp-content/uploads/2023/02/Faktenblatt\\_WD\\_von\\_FW-Leitungen\\_2020-05-27.pdf](https://energiehub-gebaeude.ch/wp-content/uploads/2023/02/Faktenblatt_WD_von_FW-Leitungen_2020-05-27.pdf)
- [119] R. Besier, «Structure of standards under the scope of CEN/TC107». Zugriffen: 11. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/resource/blob/1215742/474786/dcbfe6854f21dd8c0e63cc58aa/normenlandschaft-cen-tc-107-2025-03--data.pdf>
- [120] «SN EN 253+A1:2024 District heating pipes - Bonded single pipe systems for directly buried hot water networks - Factory made pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and a casing of polyethylene», Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), Winterthur, Jan. 2024. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-253a1-2024>
- [121] «FW 401 Gesamt (Teile 1 - 18) - Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem der Fernwärme», in *AGFW-Regelwerk*, Bd. Bereich 4, Frankfurt am Main: AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., 2022. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/4-warmeverteilung/fw-401c-teil-1-18-verlegung-und-statik-von-kunststoffmantelrohren-kmr-fur-fernwarmeretze-druckfassung.html>
- [122] «FW 449 - Metallisch dichtende Pressverbindungen für Fernwärme- und Fernkältenetze mit Mediumrohren aus Stahl - Teil 1: Presssysteme, Anforderungen und Prüfverfahren», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt 449 Teil 1, 2022. Zugriffen: 11. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-regelwerk.de/component/4>
- [123] «FW 449 - Metallisch dichtende Pressverbindungen für Fernwärme- und Fernkältenetze mit Mediumrohren aus Stahl - Teil 2: Herstellen von Pressverbindungen», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt 449 Teil 2, 2022. Zugriffen: 11. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-regelwerk.de/component/4>
- [124] THM Hagenbucher AG, «Pionierprojekt im Zürcher Gesundheitscluster: Energieversorgung aus dem Zürichsee», in *Aqua & Gas - Fachzeitschrift für Wasser, Gas und Wärme*, SVGW, Fachverband für Wasser, Gas und Wärme, Hrsg., in No. 7+8, Zürich: SVGW, Fachverband für Wasser, Gas und Wärme, 2025, S. 96–97.
- [125] *DIN EN 489-1:2022-08, Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung für Fernwärmenetze nach EN 13941-1; Deutsche Fassung EN 489-1:2019*. doi: 10.31030/3351974.
- [126] H. Ernst, *Technisches Handbuch Fernwärme*, 3. Aufl. in Technik und Normung. Frankfurt am Main: AGFW, 2013.
- [127] «FW 603 - Muffenmontage an Kunststoffmantelrohren (KMR) und flexiblen Rohrsystemen; Prüfung von Muffenmonteuren», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt 603, 2020. Zugriffen: 11. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-regelwerk.de/component/6>
- [128] Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI, Hrsg., *VDI 3733 - Geräusche bei Rohrleitungen*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI, 1996. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3733-geraeusche-bei-rohrleitungen-1>
- [129] *DIN EN 488:2020-03, Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Stahl-Absperrarmaturen für Stahl-Mediumrohre, Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen; Deutsche Fassung EN 488:2019*. doi: 10.31030/3068758.
- [130] Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, Hrsg., *Bau von Fernwärmenetzen*, 5. Aufl. Frankfurt am Main: Verl.- und Wirtschaftsges. der Elektrizitätswerke, VVEW, 1993.
- [131] «DIN EN 12266-1:2012-06 Industriearmaturen - Prüfung von Armaturen aus Metall - Teil 1: Druckprüfungen, Prüfverfahren und Annahmekriterien - Verbindliche Anforderungen», DIN Media GmbH, Berlin, 2012. doi: 10.31030/1834250.

- [132] Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V., Hrsg., *Das praktische Montagehandbuch - Für die Montage von vorgedämmten Fernwärmeleitungen*, 4. Auflage. Dresden: Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V., 2021. Zugriffen: 12. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfwev.de/fernwaermeleitungen-montagehandbuch/>
- [133] *DIN EN 12516-2:2022-08, Industriearmaturen - Gehäusefestigkeit - Teil 2: Berechnungsverfahren für drucktragende Gehäuse von Armaturen aus Stahl; Deutsche Fassung EN 12516-2:2014+A1:2021*. doi: 10.31030/3264049.
- [134] «DIN 43772:2000-03 Leittechnik - Metall-Schutzrohre und Halsrohre für Maschinen-Glasthermometer, Zeigerthermometer, Thermo-elemente und Widerstandsthermometer - Maße, Werkstoffe, Prüfung», DIN Media GmbH, Berlin, 2000. doi: 10.31030/8496393.
- [135] A. Oberhammer, «Die längste Fernwärmeleitung Österreichs - Bericht über die Planung, den Bau und die Qualitätssicherung», gehalten auf der Fernwärmetage 210, Villach, 17. März 2010.
- [136] *SR 746.1 - Bundesgesetz vom 4. Oktober 1963 über Rohrleit...* Zugriffen: 15. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1964/99\\_95\\_95/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1964/99_95_95/de)
- [137] Schweizerische Bundesrat, *SR 746.11 - Verordnung über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe (Rohrleitungsverordnung, RLV)*, Bd. 746.11. 2019. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2019/413/de>
- [138] Schweizerische Bundesrat, *SR 746.12 - Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (Rohrleitungssicherheitsverordnung, RLSV)*, Bd. 746.12. 2021. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2021/348/de>
- [139] Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA), *SN 532205:2003 SIA 205: Verlegung von unterirdischen Leitungen - Räumliche Koordination und technische Grundlagen*, Norm SN 532205:2003 SIA 205, Januar 2003. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-532205-2003>
- [140] [www.svgw.ch](https://www.svgw.ch) Fachverband für Wasser, Gas und Wärme (SVGW), *G2 d Richtlinie für Rohrleitungen*, Richtlinie G2 d, 18. August 2020. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.svgw.ch/shopregelwerk/produkte/g2-d-richtlinie-fuer-rohrleitungen/>
- [141] Schweizerische Bundesrat, *SR 734.0 - Bundesgesetz betreffend die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen (Elektrizitätsgesetz, EleG)*. 1903. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/19/259\\_252\\_257/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/19/259_252_257/de)
- [142] Schweizerische Bundesrat, *SR 734.31 - Verordnung über elektrische Leitungen (Leitungsverordnung, LeV)*, Bd. 734.31. 1994. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1994/1233\\_1233\\_1233/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1994/1233_1233_1233/de)
- [143] Eidgenössisches Starkstrominspektorat ESTI, *ESTI-Weisung Nr. 250 Abstände bei Annäherungen von Starkstromanlagen mit Rohrleitungsanlagen*, Weisung Nr. 250, 18. Juli 2025.
- [144] [www.svgw.ch](https://www.svgw.ch) Fachverband für Wasser, Gas und Wärme (SVGW), *W4 d Richtlinie für Wasserverteilung*, Richtlinie W4, 10. März 2022. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.svgw.ch/shopregelwerk/produkte/w4-d-richtlinie-fuer-wasserverteilung-1/>
- [145] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, *SN 671 260 Unterirdische Querungen und Parallelführungen von Leitungen mit Gleisanlagen*, Technische Regelung SN 671 260, 1. Januar 2003. Zugriffen: 13. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mobilityplatform.ch/de/671260.html>
- [146] «Normpositionen-Katalog NPK». Zugriffen: 11. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.crb.ch/Normen-Standards/Normpositionen/Katalog.html>
- [147] «DIN 4124:2012-01 Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten», DIN Media GmbH, Berlin, 2012. doi: 10.31030/1855529.
- [148] SUVA, Hrsg., «Gräben und Baugruben - Checkliste». Zugriffen: 11. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.suva.ch/de-ch/download/checklisten/graeben-und-baugruben/graeben-und-baugruben--67148.D>
- [149] «DIN 18195:2017-07, Abdichtung von Bauwerken - Begriffe», DIN Media GmbH, Berlin, 2017. doi: 10.31030/2660992.
- [150] «FW 433 - Mindestanforderungen für die sicherheitstechnische Ausführung neu zu errichtender Fernwärmeschächte», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2022. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/4-warmeverteilung/fw-433c-mindestanforderungen-fur-die-sicherheitstechnische-ausfuhrung-neu-zu-erstellender-fernwarmeschachte.html>
- [151] «FW 601 - Unternehmen zur Errichtung, Instandsetzung und Einbindung von Rohrleitungen für Fernwärmesysteme - Anforderungen und Prüfungen», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2016. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-regelwerk.de/component/6>
- [152] *DIN EN ISO 17637:2017-04, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen (ISO 17637:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17637:2016*. doi: 10.31030/2527032.

- [153] DIN EN ISO 17636-1:2022-10, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Durchstrahlungsprüfung - Teil 1: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken mit Filmen (ISO 17636-1:2022); Deutsche Fassung EN ISO 17636-1:2022*. doi: 10.31030/3344801.
- [154] DIN EN ISO 3452-1:2022-02, *Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 3452-1:2021); Deutsche Fassung EN ISO 3452-1:2021*. doi: 10.31030/3246639.
- [155] DIN EN ISO 17640:2019-02, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Ultraschallprüfung - Techniken, Prüfklassen und Bewertung (ISO 17640:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17640:2018*. doi: 10.31030/3016424.
- [156] DIN EN ISO 17638:2017-03, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Magnetpulverprüfung (ISO 17638:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17638:2016*. doi: 10.31030/2517670.
- [157] «FW 602 - Fernwärmeleitungen - Prüfungen an Mediumrohren zum Nachweis der Dichtheit und der Festigkeit», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, Nov. 2022. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-regelwerk.de/component/6>
- [158] «FW 510 - Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizanlagen sowie Hinweise für deren Betrieb», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2022. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/5-anschluss-und-kundenanlagen/fw-510c-anforderungen-an-das-kreislaufwasser-von-industrie-und-fernwarmerheizeanlagen-sowie-hinweise-fur-deren-betrieb-druckfassung.html>
- [159] «SWKI BT102-01:2012 Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen», Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren (SWKI), Urtenen-Schönbühl, Richtlinie, Aug. 2012. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/swki-bt102-01-2012>
- [160] Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (suissetec), Hrsg., «Beschaffenheit des Füll- und Ergänzungswassers für Heizungs- und Kühlanlagen». November 2023. Zugriffen: 12. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://suissetec.ch/de/news-detail/neues-merkblatt.html>
- [161] «W3 - Richtlinie für Trinkwasserinstallationen inkl. Ergänzungen 1+2+3+4», Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich, Richtlinie W3, 2013. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.svgw.ch>
- [162] *Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV)*, Bd. 817.022.11. 2016, S. 28. Zugriffen: 12. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/153/de>
- [163] B. Glück, *Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1985. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://berndglueck.de/heizwassernetze.php>
- [164] L. Böswirth und S. Bschorer, *Technische Strömungslehre: Lehr- und Übungsbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014. doi: 10.1007/978-3-658-05668-1.
- [165] W. Winter, F. Promitzer, R. Klasinc, und I. Obernberger, «Hydraulische Rohrrauigkeit von Stahlmediumrohren für Fernwärmenetze», *Euroheat Power*, Nr. 29, S. 24–33, 2000.
- [166] Wagner, *Rohrleitungstechnik*. Würzburg: Vogel Fachbuch, 2023. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://vogel-fachbuch.de/Rohrleitungstechnik/978-3-8343-6268-1.B-ebook>
- [167] B. Glück, *Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung - Druckverluste*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1988. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://berndglueck.de/druckverluste.php>
- [168] I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance, 4th Edition Revised and Augmented*. Begell House, 2008. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.begellhouse.com/ebook\\_platform/monograph/book/5877598576b05c67.html](https://www.begellhouse.com/ebook_platform/monograph/book/5877598576b05c67.html)
- [169] «FW 410 - Stahl-Mantelrohre (SMR) für Fernwärmeleitungen», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Merkblatt, 2012. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/fw-410c-stahl-mantelrohre-smr-fur-fernwarmerleitungen-druckfassung.html>
- [170] «FW 411 - Fernwärmeleitungen in Gebäuden und Bauwerken mit Mediumrohren aus Stahl», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Merkblatt, 2007. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/4-warmeverteilung/fw-411c-fernwarmerleitungen-in-gebauten-und-bauwerken-mit-mediumrohren-aus-stahl-druckfassung.html>
- [171] «SN EN 13941-1+A1:2022 Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Auslegung», Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), Winterthur, Jan. 2022. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-13941-1a1-2022>
- [172] W. Wagner, *Festigkeitsberechnungen im Apparat- und Rohrleitungsbau*. Würzburg: Vogel Fachbuch, 2023. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://vogel-fachbuch.de/Festigkeitsberechnungen-im-Apparat-und-Rohrleitungsbau/978-8343-3527-2.P-book>
- [173] DIN EN 13480-3:2024-12, *Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 3: Konstruktion und Be-*

rechnung; Deutsche Fassung EN\_13480-3:2024.  
doi: 10.31030/3580787.

- [174] TÜV Verband e.V., Hrsg., *AD 2000-Regelwerk - Druckbehälter*. Berlin: DIN Media, 2023. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/publikation/ad-2000-taschenbuch-2023/374810274>
- [175] «FW 411 Teil 1 - Fernwärmeleitungen ohne direkte Erdauflast - Allgemeine Grundlagen für Planung und Bau», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, Feb. 2019. Zugriffen: 5. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/4-warmeverteilung/fw-411-1-loesbare-verbindungen-flanschverbindungen-mit-flachdichtungen-druckfassung.html>
- [176] *DIN 4747:2022-08, Fernwärmeanlagen - Sicherheitstechnische Ausrüstung von Unterstationen, Hausstationen und Hausanlagen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze*, August 2022. doi: 10.31030/3302406.
- [177] Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI, *VDI 2036 - Gebäudetechnische Anlagen mit Fernwärme*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI, 2022. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2036-gebaeudetechnische-anlagen-mit-fernwaerme>
- [178] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Hrsg., «AGFW-Regelwerk Bereich 5: Anschluss- und Kundenanlagen (Gesamt)», in *AGFW-Regelwerk*, Bd. Bereich 5, Frankfurt am Main: AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., 2024. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/agfw-regelwerk-bereich-5-anschluss-und-kundenanlagen-print-1.html>
- [179] «Vollzugshilfe EN-102 Wärmeschutz von Gebäuden», Konferenz Kantonalen Energiedirektoren EnDK, Bern, Vollzugshilfe, 2020. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.endk.ch/de/fachleute-1/vollzugshilfen/muken-2014>
- [180] W. Betschart, *Hydraulik in der Gebäudetechnik: Wärme und Kälte effizient übertragen*, 1. Aufl. in Schriftenreihe Technik. Zürich: Faktor Verlag, 2013.
- [181] «SIA 385/1 - Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Richtlinie SN 546385/1, Nov. 2020. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/385-1\\_2020\\_d/D/Product](https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/385-1_2020_d/D/Product)
- [182] «SIA 385/2 - Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden - Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Richtlinie SN 546385/2, Jan. 2015. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/385-2\\_2015\\_d/D/Product/](https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/385-2_2015_d/D/Product/)
- [183] A. Huber, «Konzepte zur Brauchwarmwasser-Erwärmung», gehalten auf der Forum Energie Zürich - Fachgruppe Betriebsoptimierung, Zürich, 24. September 2025. Zugriffen: 11. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://forumenergie.ch/wissensplattform>
- [184] «BAG/BLV Empfehlungen zu Legionellen und Legionellose», Empfehlungen zu Legionellen und Legionellose. Zugriffen: 10. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/gebrauchsgenestaende/badewasser/empfehlungen-legionellen-legionellose.html>
- [185] S. Thalmann, S. Mennel, A. Jenni, und T. Nussbaumer, *Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen*, Version 1.0. Zürich: Verenum AG, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.verenum.ch/Dokumente\\_QMFW.html](http://www.verenum.ch/Dokumente_QMFW.html)
- [186] «FW 509 - Anforderungen an Hausstationen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2020. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw-shop.de/regelwerk/5-anschluss-und-kundenanlagen/fw-509c-anforderungen-an-fernwaerme-kompaktstationen-fur-heizwassernetze-druckfassung.html>
- [187] CEN European Committee for Standardization, Hrsg., «Eco-efficient Substations for District Heating - CEN Workshop Agreement CWA 16975:2015/AC:2016 (E)». CEN-CENELEC Management Centre, 2016. Zugriffen: 30. August 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/bs-cwa-16975/265780930>
- [188] «DIN 18012:2018-04 Anschlusseinrichtungen für Gebäude - Allgemeine Planungsgrundlagen», DIN Media GmbH, Berlin, 2018. doi: 10.31030/2798590.
- [189] A. Huss, *Haustechnik für Verwalter, Vermieter und Makler*, 1. Auflage. in Haufe Fachbuch. Freiburg im Breisgau: Haufe-Lexware, 2017.
- [190] «SN EN 1148:1999 Wärmeaustauscher - Wasser/Wasser-Wärmeaustauscher für Fernheizung - Prüfverfahren zur Feststellung der Leistungsdaten», Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), Winterthur, Jan. 1999. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-1148-1999>
- [191] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Messmittelverordnung MessMV*, Bd. SR 941.210. 2006, S. 74. Zugriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20022671/index.html>
- [192] Schweizerische Eidgenossenschaft, Der Bundesrat, *SR 941.231 - Verordnung des EJPD über Messmittel für thermische Energie (TMmV)*, Bd. 941.231. 2024, S. 14. Zugriffen: 8. August 2024.

- [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2023/559/de>
- [193] «SIA 384.101+A1 Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Warmwasser-Heizungsanlagen», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Jan. 2014. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-12828-a1-2014>
- [194] «SN EN 12953-1:2012 Grosswasserraumkessel - Teil 1: Allgemeines», SWISSMEM, Zürich, Juni 2012. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-12953-1-2012>
- [195] «SWKI HE301-01:2020 Sicherheitstechnische Einrichtungen für Heizungsanlagen», Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren (SWKI), Urtenen-Schönbühl, Richtlinie, Aug. 2020. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/swki-he301-01-2020>
- [196] «SN EN 14597:2012 - SIA 386.050 Temperaturregeleinrichtungen und Temperaturbegrenzer für wärmeerzeugende Anlagen», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Jan. 2012. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-14597-2012>
- [197] «Vollzugshilfe EN-103 Heizung und Warmwasser», Konferenz Kantonalen Energiedirektoren EnDK, Bern, Vollzugshilfe, 2020. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.endk.ch/de/fachleute-1/vollzugshilfen/muken-2014>
- [198] «Merkblatt Technische Dämmung in der Gebäudetechnik», Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (suissetec), Zürich, Merkblatt, 2023. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://shop.suissetec.ch/de/shop/1799/merkblatt-technische-daemmung-in-der-gebaeudetechnik>
- [199] QM Thermische Netze, «QM Thermische Netze - Dokumente und Tools», QM Thermische Netze. Zugriffen: 27. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://qmthermischenetze.ch/dokumente-tools/>
- [200] T. Meier, R. Bühler, und S. Thalmann, *Excel-Tabelle Situationserfassung*. (November 2018). ger. QM Holzheizwerke, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: <https://www.qmholzheizwerke.ch/de/situationserfassung.html>
- [201] *SN EN ISO 9001:2015*, September 2015. Zugriffen: 4. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://connect.snv.ch/de/sn-en-iso-9001-2015>
- [202] «F1 Richtlinie für Fernwärme», Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich, 2017. Zugriffen: 26. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.svgw.ch>
- [203] «F5 Richtlinie für Dichtheits- und Festigkeitsprüfungen an Fernwärme-, Fernkälte- und Anergienetzen», Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich, 2022. Zugriffen: 11. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.svgw.ch/shopregelwerk/produkte/f5-d-richtlinie-fuer-dichtheits-und-festigkeitspruefungen-an-fernwaerme-fernkaelte-und-anergienetzen/>
- [204] «SIA 108 - Ordnung für Leistungen und Honorare der Ingenieurinnen und Ingenieure der Bereiche Gebäudetechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Richtlinie SN 508108, Jan. 2020. Zugriffen: 20. Oktober 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/sia%20108/d/2020/D/Product>
- [205] «HOAI - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis». Zugriffen: 4. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/hoai\\_2013/index.html](https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/index.html)
- [206] Fachverband Ingenieurbüros, Hrsg., «Unverbindliche Kalkulationsempfehlung für Ingenieurleistungen Leistungsbild Technische Ausrüstung». Fachverband Ingenieurbüros, 2011. Zugriffen: 4. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieurbueros.at/verband/de/das-ingenieurbuer-o/leistungsbilderleistungsmodelle/unverbindliche-kalkulationsempfehlung>
- [207] J. Ködel, G. Oppermann, O. Arnold, M. Bühler, und M. Jutzeler, «Leitfaden Fernwärme / Fernkälte», Verband Fernwärme Schweiz für Bundesamt für Energie, Niederrohrdorf, Schlussbericht, Aug. 2018. Zugriffen: 15. August 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch-wAssets/docs/Dienstleistungen/Leitfaden-Fernaerme-Fernkaelte/Fernwaerme\\_Leitfaden-deutsch.pdf](https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch-wAssets/docs/Dienstleistungen/Leitfaden-Fernaerme-Fernkaelte/Fernwaerme_Leitfaden-deutsch.pdf)
- [208] R. Bühler und J. Good, «Leitfaden QMmini - Version Schweiz», QM Holzheizwerke, Zürich, Leitfaden, 2012.
- [209] W. Winter, T. Haslauer, und I. Obernberger, «Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen - Teil 1», *Euroheat Power*, Nr. 9, S. 53–57, 2001.
- [210] «SIA 103 - Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Richtlinie SN 508103, Jan. 2020. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/103\\_2020\\_d/D/Product](https://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/103_2020_d/D/Product)
- [211] VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, *VDI 2067 Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2012. Zugriffen: 18. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1>
- [212] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, *SR 814.310 - Bundesgesetz*

- über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KIG), Bd. 814.310. 2022, S. 6. Zugriffen: 28. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2023/655/de>
- [213] «Weighted Average Cost of Capital», *Wikipedia*. 27. November 2023. Zugriffen: 7. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Weighted\\_Average\\_Cost\\_of\\_Capital&oldid=239514244](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Weighted_Average_Cost_of_Capital&oldid=239514244)
- [214] R. Leemann, «Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen». RAVEL, 1992. Zugriffen: 12. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwixyPSEueXIAhWOZMAKHWBjD-QQFjAlegQIA-RAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fbfk%2Ffravel%2F12\\_51\\_2D.pdf&usg=AOvVaw1eBPjpV0hul1wKIY-Wp-MG](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwixyPSEueXIAhWOZMAKHWBjD-QQFjAlegQIA-RAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fbfk%2Ffravel%2F12_51_2D.pdf&usg=AOvVaw1eBPjpV0hul1wKIY-Wp-MG)
- [215] P. Küttel, *QMH-Wirtschaftlichkeitsrechnung*. (März 2018). ger. QM Holzheizwerke, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: <https://www.qmholzheizwerke.ch/de/downloads.html>
- [216] C.A.R.M.E.N. e.V., *SOPHENA – Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen*. GreenDelta GmbH. Zugriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.carmen-ev.de/service/sophena/>
- [217] J.-P. Thommen, *Betriebswirtschaft und Management: Eine managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*, 10., Überarbeitete und Erweiterte Auflage. Zürich: Versus, 2016.
- [218] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Bundesgesetz betreffend die Ergänzung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches (Fünfter Teil: Obligationenrecht)*, Bd. 220. 1911, S. 512. Zugriffen: 26. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/22.html#22>
- [219] *Bundesgesetz über Kartelle und andere Wettbewerbsbeschränkungen (Kartellgesetz, KG)*, Bd. 251. 1996, S. 22. Zugriffen: 14. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1996/546\\_546\\_de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1996/546_546_de)
- [220] *Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV)*. 1980, S. 12. Zugriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/avbfern\\_w\\_rmev/](https://www.gesetze-im-internet.de/avbfern_w_rmev/)
- [221] «FW 515 - Technische Anschlussbedingungen Heizwasser (TAB-HW)», AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main, Merkblatt, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/regelwerk/>
- [222] S. Thalmann, «Energiepreisgestaltung zur Verbesserung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen», Masterarbeit MAS Wirtschaftsingenieurwesen WI 17.21, ZHAW School of Engineering, Zürich, 2020.
- [223] A. Hauck, H. Worm, U. Frei, und M. Schmutz, «Kosten und Tarife thermischer Netze – Leitfaden für Betreiber», Thermische Netze Schweiz (TNS), Bern, Schlussbericht, in Vorbereitung, unveröffentlicht 2026.
- [224] I. Zenke, S. Wollschläger, und J. Eder, Hrsg., *Preise und Preisgestaltung in der Energiewirtschaft, Von der Kalkulation bis zur Umsetzung von Preisen für Strom, Gas, Fernwärme, Wasser und CO<sub>2</sub>*, 1. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter, 2015. doi: 10.1515/9783110354829.
- [225] C.A.R.M.E.N. e.V., Hrsg., «Preisanpassungsklauseln und Preisindizes». C.A.R.M.E.N. e.V., Dezember 2015. Zugriffen: 2. Januar 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjg4\\_al4eTmAhUx0aYKHdnzD7kQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.carmen-ev.de%2Ffiles%2Ffestbrennstoffe%2FBiomasseheize%2FPreisindizes.pdf&usg=AOvVaw1Zb4WFEZACpII71mUVUKGq](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjg4_al4eTmAhUx0aYKHdnzD7kQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.carmen-ev.de%2Ffiles%2Ffestbrennstoffe%2FBiomasseheize%2FPreisindizes.pdf&usg=AOvVaw1Zb4WFEZACpII71mUVUKGq)
- [226] W. Kraft und S. Wollschläger, *Leitfaden zur Kalkulation und Änderung von Fernwärmepreisen*. Frankfurt, M: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, 2012.
- [227] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., «Preisänderungsklauseln», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. Zugriffen: 2. Januar 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/recht/preisaenderungsklauseln/>
- [228] D. Schmidt, «Guidebook for the Digitalisation of District Heating: Transforming Heat Networks for a Sustainable Future», AGFW-Project Company, Frankfurt am Main, Final Report of DHC Annex TS4, 2023. Zugriffen: 17. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2018-2024-annex-ts4>
- [229] S. Thalmann und L. Deschaintre, «Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze», Verenum AG und Planair SA, Zürich und Yverdon-les-Bains, Leitfaden, Feb. 2023. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Gesammelte-Resultate.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Gesammelte-Resultate.zip)
- [230] S. Thalmann und L. Deschaintre, «Übersicht mobile Energiezentralen», Verenum AG und Planair SA, Zürich und Yverdon-les-Bains, Leitfaden, Feb. 2023. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Gesammelte-Resultate.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Gesammelte-Resultate.zip)
- [231] S. Thalmann und L. Deschaintre, «Übersicht zu Übergangslösungen beim Ausbau thermischer Netze», Verenum AG und Planair SA, Zürich und

- Yverdon-les-Bains, Leitfaden, Feb. 2023. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Gesammelte-Resultate.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Gesammelte-Resultate.zip)
- [232] P. M. Overbye, «Low-temperature district heating - How to reduce the temperature in existing district heating networks», *Hot/Cool International magazine on district heating and cooling*, Bd. No.4 2025, Nr. 2025, S. 14–19, 12. Mai 2025.
- [233] C. Engel, «Erfahrungen und Empfehlungen für die Anwendung flexibler Rohre in Wärmenetzen der 4. Generation», *Euroheat & power*, Nr. 1-2/2025, S. 40–45, 2025.
- [234] U. Grossenbacher, «Kundenseitiges Spitzenlastmanagement», gehalten auf der Workshop «Fernwärme Netto-Null: Spitzenlastdeckung versus Spitzenlastsenkung? im Rahmen des Horizon 2020 EU-Projekts RES-DHC, Haltikon, Küssnacht am Rigi, 14. Juni 2023. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Gesammelte-Resultate.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Gesammelte-Resultate.zip)
- [235] «Pinch Analysis». Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pinch.ch/de/>
- [236] T. Wietlisbach und M. Horeni, «Energiebedarfs-Prognosen: Ingenieurmässig oder mit KI? Beispiel Fernwärme», gehalten auf der Workshop «Fernwärme Netto-Null: Spitzenlastdeckung versus Spitzenlastsenkung? im Rahmen des Horizon 2020 EU-Projekts RES-DHC, Haltikon, Küssnacht am Rigi, 14. Juni 2023. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC\\_Online\\_Gesammelte-Resultate.zip](https://verenum.ch/wp-content/uploads/2025/04/RES-DHC_Online_Gesammelte-Resultate.zip)
- [237] P. Härtsch, «Automatisiertes Einsatzoptimierungssystem: Sektorkopplung mit intelligenter Optimierung», gehalten auf der SVGW-Fachtagung Fernwärme 2024 - Optimierung von thermischen Netzen in der Planung, der Projektierung und im Betrieb, Volkshaus Biel, 31. Oktober 2024.
- [238] P. Härtsch, «Sektorkopplung mit intelligenter Optimierung», SVGW. Zugriffen: 20. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aquaetgas.ch/aktuell/prolog/20240405-sektorkopplung-mit-intelligenter-optimierung/>
- [239] A. Bucher und S. Hersberger, «Betriebsoptimierung eines Nahwärmenetzes: Praxiserprobte Regelung senkt Lastspitzen und steigert die Effizienz», Hoval AG und Yuon Control AG, Feldmeilen und Oberburg, Referenzanlage, 2025. Zugriffen: 27. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://yuon.ch/referenzprojekte/>
- [240] D. Reiter, «Überblick Wärmenetze und Optimierungsansätze», gehalten auf der qm heizwerke Fachtagung Wärmenetze der Zukunft, Salzburg, 3. Juni 2016.
- [241] A. Peter, «Betriebsoptimierung durch den Einsatz von Speichern», gehalten auf der SVGW-Fachtagung Fernwärme 2024 - Optimierung von thermischen Netzen in der Planung, der Projektierung und im Betrieb, Volkshaus Biel, 31. Oktober 2024.
- [242] H. Zinko, «Improvement of operational temperature differences in district heating systems», IEA-DHC, Schlussbericht, März 2005. Zugriffen: 12. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2002-2005-annex-vii/annex-vii-project-03>
- [243] S. Thalmann und A. Jenni, «Umsetzung Optimierungsmassnahmen Fernwärme», Verenum und ardens GmbH für Bundesamt für Energie BfE, Zürich, Schlussbericht, Okt. 2016.
- [244] S. Thalmann, *Mehrverbrauch*. (Mai 2020). Deutsch, Français, Italiano, English. Verenum AG, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: <https://qmthermischenetze.ch/dokumente-tools/>
- [245] P. Stephan, S. Kabelac, M. Kind, D. Mewes, K. Schaber, und T. Wetzel, Hrsg., *VDI-Wärmeatlas: Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. in Springer Reference Technik. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-52989-8.
- [246] J. Good u. a., *Planungshandbuch QM Holzheizwerke*, 2. leicht überarbeitete Auflage., Bd. 4, 5 Bde. in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 4. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V, 2008.
- [247] «SIA 410 - Kennzeichnung von Installationen in Gebäuden - Sinnbilder für die Haustechnik», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, Richtlinie SN 502410, Juni 1986. Zugriffen: 7. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/sia%20410/D/Product>
- [248] Verein Minergie, «Minergie - Zertifizierung im Minergie-Standard (Dokumente und Anwendungshilfen)», Zertifizierung im Minergie-Standard. Zugriffen: 16. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.minergie.ch/de/zertifizieren/minergie/>
- [249] Eidgenössische Departement des Inneren (EDI), *SR 817.022.12 - Verordnung des EDI über Getränke*, Bd. 817.022.12. Zugriffen: 24. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/220/de>





Thermische Netze Schweiz  
Réseaux Thermiques Suisse  
Reti Termiche Svizzera



**SVGW**  
Association pour l'eau, le gaz et la chaleur  
Associazione per l'acqua, il gas e il calore  
Fachverband für Wasser, Gas und Wärme



**SWKI** Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren  
**SICC** Société suisse des ingénieurs en technique du bâtiment  
**SITC** Società svizzera degli ingegneri nella tecnica impiantistica  
Affiliated with SIA, ASHRAE and REHVA

