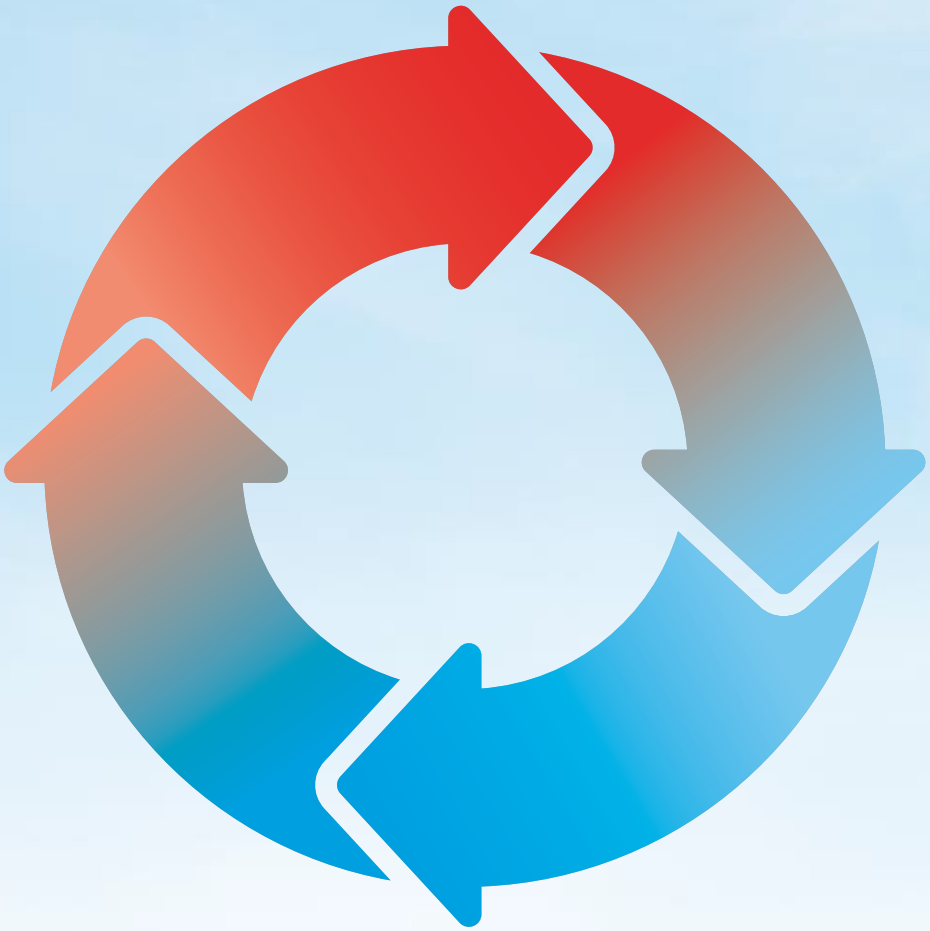
Genkinger (Hrsg.) I Alimpic I Messmer I Zgraggen I Zogg

Wärmepumpen

planen, optimieren, betreiben, warten



faktor
Architektur Technik Energie

EnDK
Konferenz Kantonaler Energiedirektoren

energieschweiz

Inhalt

1. Grundlagen 5
1.1 Kreisprozess 5
1.2 Systemgrenzen und Kennzahlen 8
1.3 Normen 10

2. Komponenten der Wärmepumpe 17
2.1 Verdichter 17
2.2 Wärmeübertrager 19
2.3 Drosselorgan 21
2.4 Sicherheitseinrichtungen 22
2.5 Weitere Komponenten 22
2.6 Abtaueinrichtungen 23
2.7 Bauarten von Wärmepumpen 23
2.8 Alternative Prozesse 24

3. Kältemittel 25
3.1 Eigenschaften 25
3.2 Benennung Kältemittel nach ASHRAE 27
3.3 Wahl des Kältemittels 27
3.4 Natürliche Kältemitel 27
3.5 Maximale Kältemittelfüllmenge nach SN EN 378-1 32
3.6 Treibhauseffekt und TEWI-Kennwert 33
3.7 Life Cycle Climate Performance (LCCP) 34
3.8 Weitere Umweltauswirkungen: PFAS und TFA 35
3.9 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Entwicklungen 35
3.10 Weitere Informationen 38

4. Wärmequellen 39
4.1 Aussenluft 39
4.2 Erdwärme 40
4.3 Grundwasser 47
4.4 Abwärme 51
4.5 Gebäudekühlung 52

5. Wärmeabgabe 61
5.1 Warmwasserheizung 62
5.2 Raumlufttechnische Anlagen 65
5.3 Trinkwarmwasser 66
5.4 Andere Systeme 69

6. Einbindung in die Gebäudetechnik 71
6.1 Grundsatz 71
6.2 Betriebsarten 71
6.3 Hydraulik 74
6.4 Umwälzpumpen 79

7. Integration in Photovoltaiksysteme 81
7.1 Einleitung 81
7.2 Einbinden der Wärmepumpe 84
7.3 Betriebsweise von Wärmepumpen 85
7.4 Schnittstellen 87
7.5 Ausblick 89

8. Akustik und Schallschutz 91
8.1 Gesetzliche Grenzwerte 91
8.2 Schallminderung 92

9. Projektierung 97
9.1 Gütesiegel FWS/EHPA 97
9.2 Wärmepumpen-System-Modul 97
9.3 WPesti 98
9.4 Projektierungshilfen 98
9.5 Elektrizitätsversorgung 99
9.6 Heizzentrale 100
9.7 Wirtschaftlichkeit 100
9.8 Erfolgskontrolle 102

10. Inbetriebsetzung 107
10.1 Phase vor der Inbetriebsetzung 108
10.2 Vorbereitung der Inbetriebsetzung 108
10.3 Wärmequelle und Wärmeabgabe 109
10.4 Inbetriebsetzung der Wärmepumpe 109
10.5 Inbetriebsetzungsprotokoll 109
10.6 Bedienungsanleitung 110
10.7 Abnahmeprotokoll 110
10.8 Anlagendokumentation 112

11. Betrieb 113
11.1 Betrieb und Erfolgskontrolle 113
11.2 Betriebsüberwachung 113
11.3 Instandhaltung 113
11.4 Betriebsoptimierung 114
11.5 Störungen und Störungsbehebung 117

12. Anlagen für höhere Leistungen 119
12.1 Allgemeines 119
12.2 Einbindung 119
12.3 Einzelgebäude 120
12.4 Überbauungen 123
12.5 Fern- und Nahwärmesysteme 124
12.6 Industrieanwendungen 125
12.7 Projektierung und Umsetzung 125

13. Fallbeispiele 129

14. Anhang 143

Impressum

Wärmepumpen – planen, optimieren, betreiben und warten

Autorinnen und Autoren
Überarbeitung 2026: Andreas Genkinger (Gesamtkoordination), Zoran Alimpic, Christoph Messmer, Lorenzo Zgraggen, David Zogg
Ausgabe 2018: Ralf Dott (Gesamtkoordination), Thomas Afjei, Zoran Alimpic, Andreas Genkinger, Peter Hubacher, Rita Kobler

Lektorat und Layout: Faktor Verlag, Zürich; René Mosbacher, Christine Sidler

Titelbild: Pixabay/Faktor Verlag

Diese Publikation ist Teil der Fachbuchreihe «Nachhaltiges Bauen und Erneuern». Die Publikation wurde durch das Bundesamt für Energie BFE/Energie Schweiz und die Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (EnDK) finanziert.

Bezug: Als Download (kostenfrei) unter www.energieschweiz.ch oder als Buch beim Faktor Verlag: www.faktor.ch

6. vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage, Mai 2026.
ISBN: 978-3-905711-94-3

Mit Unterstützung von

FWS

SWKI

suissetec

ProKlima

brenet

SVK ASF ATF
Schweizerischer Verband für Kältetechnik

GebäudeKlima Schweiz
ImmoClimat Suisse
ImmoClima Svizzera

SVLW
Schweizerischer Verein Luft- und Wasserhygiene

Vorwort

Es hat sich viel getan

Seit der ersten Ausgabe dieses Buchs von 2008 hat sich viel getan: Wärmepumpen sind heute sozusagen zum Schweizer Taschenmesser geworden, wenn es darum geht, Gebäude klimafreundlich zu heizen, zu kühlen und mit Warmwasser zu versorgen. Nicht nur Neubauten, sondern auch Bestandsgebäude werden dank technischer Verbesserungen mittlerweile überwiegend mit ihnen ausgerüstet. Und noch lange nicht ausgeschöpft sind die Möglichkeiten, die Wärmepumpen bei der Nutzung von Abwärme bieten, beispielsweise jener aus den Rechenzentren, die derzeit ringsumher aus dem Boden schiessen. Sollen sie ihre Vorteile bezüglich Klimaschutz, Energieeffizienz und Betriebskosten voll ausspielen, müssen Wärmepumpen aber fachgerecht geplant, installiert und optimal betrieben werden. Die Grundlage für gute Lösungen bildet in der Regel eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von allen an der Planung und der Ausführung Beteiligten. Dazu gehören insbesondere Architekten, Technikerinnen und Installationsfachleute. Ein solches Team wird auf der Basis seines versammelten Wissens und Könnens in der Lage sein, Investoren, Hauseigentümerschaften und Liegenschaftenverwaltungen mit den besten Lösungen für die Bereitstellung von Wärme und Kälte zu versorgen.

Ziel dieses Buchs war und ist es, einem breiten Fachpublikum das Wissen rund um die Wärmepumpen in verständlicher Weise zu vermitteln. Mit der Neuauflage steht dieses bewährte Standardwerk nun in einer aktualisierten Version zur Verfügung. Es erhielt zwei zusätzliche Kapitel – eines zur Kombination von Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen sowie eines zur Planung von grossen Anlagen. Stark überarbeitet wurden die Kapitel zu den Kältemitteln, zur Energieetikette respektive zur Europäischen Ecodesign-Richtlinie sowie zur Gebäudekühlung. Die Praxisbeispiele wurden ergänzt. Und selbstverständlich wurden alle Inhalte an die derzeit gültigen gesetzlichen Vorgaben, Normen und Richtlinien angepasst.

Kapitel 1

Grundlagen

1.1 Kreisprozess

Das derzeit hauptsächlich angewendete Verfahren in der Wärmepumpentechnik ist das Kaltdampf-Kompressionsverfahren. Ein Kältemittel verdampft dabei auf der kalten Seite unter Aufnahme von Verdampfungswärme ($\dot{Q}_{KM}$). Durch Verdichtung wird es auf der warmen Seite unter Abgabe der Kondensationswärme ($\dot{Q}_{WP}$) wieder verflüssigt. In einem Drosselorgan wird es anschliessend erneut auf den Verdampfungsdruck entspannt. Bei allen nach diesem Prinzip arbeitenden Anlagen wird die Abhängigkeit der Verdampfungs- respektive Verflüssigungstemperatur vom Druck des Kältemittels ausgenutzt. Vereinfacht kann eine solche Anlage wie in Bild 1.1 dargestellt werden.

Arbeit und Wärme sind Prozessgrössen. Sie stellen mögliche Formen der Energie beim Transport über die Systemgrenzen dar. Energie E, Arbeit W und Wärme Q haben als Einheit Joule (J).

- Innere Energie u: Die spezifische innere Energie stellt als kalorische Zustandsgrösse den Energievorrat eines thermodynamischen Systems dar (kJ/kg).
- Enthalpie h: Die spezifische Enthalpie, als kalorische Zustandsgrösse, ist durch $h = u + p \cdot V$ definiert.
- Exergie: Energie umfasst Exergie und Anergie. Exergie ist der Teil von Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung in jede Energieform umwandeln lässt (z. B. Elektrizität für den Verdichter).
- Anergie: Anergie ist der Teil von Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung nicht in jede Energieform umwandeln lässt (z. B. Umgebungswärme als Wärmequelle).
- Leistung P oder $\dot{Q}$ ist der Quotient aus verrichteter Arbeit oder umgesetzter Wärme je Zeiteinheit, gemessen in Watt (W).
- Entropie s: Die Entropie ist ein Mass für die Irreversibilität und damit für die Energieentwertung in einem Prozess.

Carnot-Kreisprozess

Der ideale Prozess (Carnot'scher Vergleichsprozess) beschreibt den verlustfreien idealen Kreisprozess. Für den

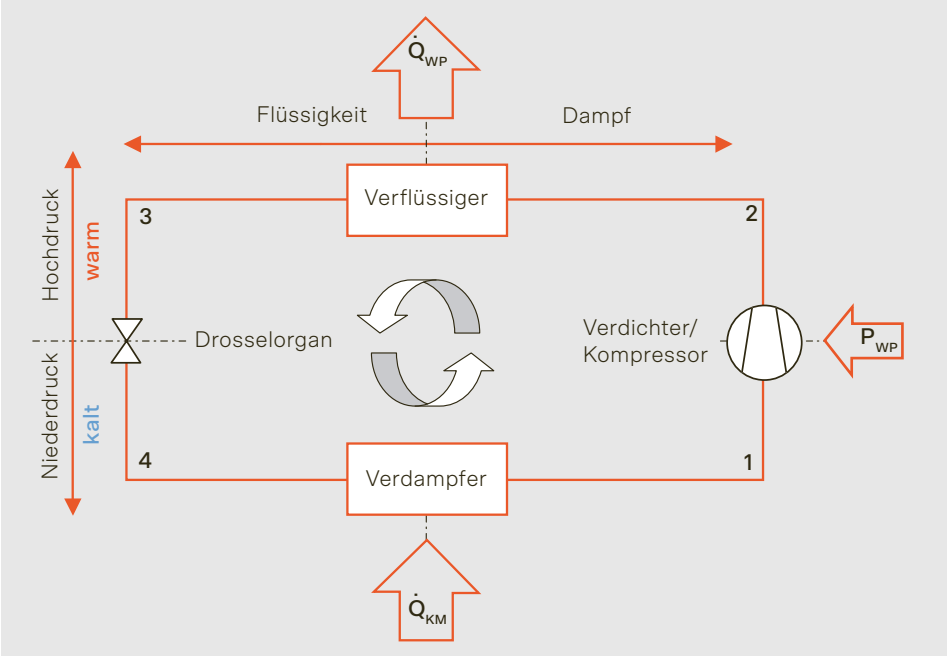


Bild 1.1: Prinzip des Kaltdampf-Kompressionsverfahrens.

Carnot-Prozess erhält man die Carnot'sche Leistungszahl $\varepsilon_{C,WP}$ für den Heizfall (Wärmepumpe, Nutzen: Wärme) wie folgt:

$$\varepsilon_{C,WP} = \left(\frac{\dot{Q}_{C,WP}}{P_{C,V}}\right)_{Ideal} = \frac{T_C}{T_C - T_0}$$

Der Kühlfall (Kältemaschine, Nutzen: Kälte) ist stets ineffizienter, weil hier die Verdichterwärme nicht genutzt werden kann:

$$\varepsilon_{C,KM} = \left(\frac{\dot{Q}_{C,KM}}{P_{C,V}}\right)_{Ideal} = \frac{T_0}{T_C - T_0} = \varepsilon_{C,WP} - 1$$

$\dot{Q}_{C,WP}$ Abgegebene Wärmeleistung in kW
$\dot{Q}_{C,KM}$ Entzogene Kälteleistung in kW
$P_{C,V}$ Zugeführte mechanische Verdichterleistung in kW
T_0 Verdampfungstemperatur in K
T_C Kondensationstemperatur in K

$\varepsilon_{C,WP}$ ($\varepsilon_{C,KM}$) ist eine physikalische Limite, reale Wärmepumpen (Kältemaschinen) können diesen Wert nie erreichen. Das Verhältnis zwischen der wirklichen Leistungszahl und der Carnot'schen Leistungszahl wird als Gütegrad η (exergetisch) bezeichnet:

$$\eta_{WP} = \frac{\varepsilon_{WP}}{\varepsilon_{C,WP}} \text{ respektiv } \eta_{KM} = \frac{\varepsilon_{KM}}{\varepsilon_{C,KM}}$$

Der Gütegrad liegt typischerweise im Bereich von 0,4 bis 0,6.

Log-p-h-Diagramm

Ein Log-p-h-Diagramm stellt den Kreisprozess anschaulich dar und zeigt den Bezug zu den Zustandsgrössen des Kältemittels. Die Zustände des Kältemittels können beispielsweise der Dampftafel des entsprechenden Mittels entnommen werden. Den Verlauf der Zustandsgrössen bei speziellen Prozessen zeigt Bild 1.2. Bild 1.3 zeigt den verlustfreien Kreisprozess einer Wärmepumpe im Log-p-h-Diagramm, einen realen (verlustbehafteten) Prozess stellt Bild 1.4 dar. Diese Darstellung bezieht sich auf das innere Verhalten der Maschine mit den Zustandsänderungen des Kältemittels (Index «R» in den Formeln).
Der Kreisprozess (blaue Linie) in Bild 1.3 respektive Bild 1.4 erfolgt grundsätzlich in vier Phasen:
- 1–2: Verdichtung (Kompression)
- 2–3: Verflüssigung (Kondensation)
- 3–4: Expansion
- 4–1: Verdampfung

$$\varepsilon_{R,WP} = \frac{\dot{Q}_{R,WP}}{P_{R,V}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$\dot{Q}_{R,WP}$ Vom Kältemitteldampf abgegebene Wärmeleistung in kW
$P_{R,V}$ Dem Kältemitteldampf zugeführte Leistung in kW
h_1 Enthalpie des Kältemittels am Verdichter-Eintritt in kJ/kg

Bild 1.2: Verlauf der physikalischen Zustandsgrössen im Log-p-h-Diagramm.

Legende:
log p: Druck in bar, logarithmischer Massstab
s: spezifische Entropie in kJ/K/kg
h: spezifische Enthalpie kJ/kg
v: spezifisches Volumen in m^3/kg
t: Temperatur in °C
x: Dampfanteil in %

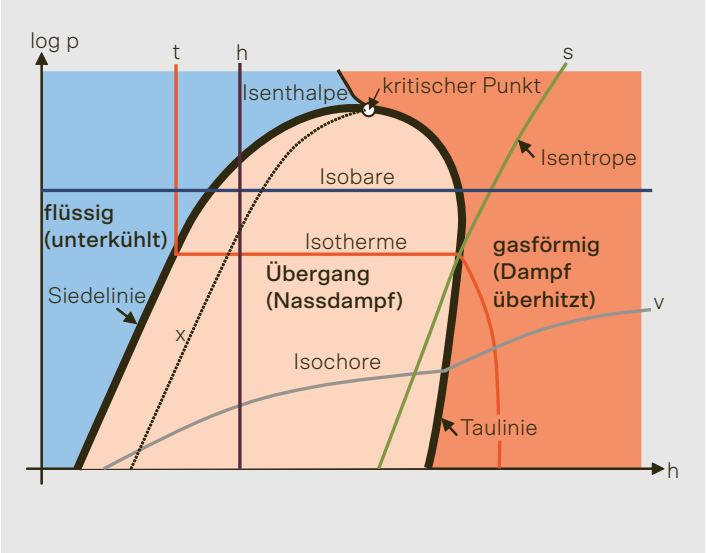
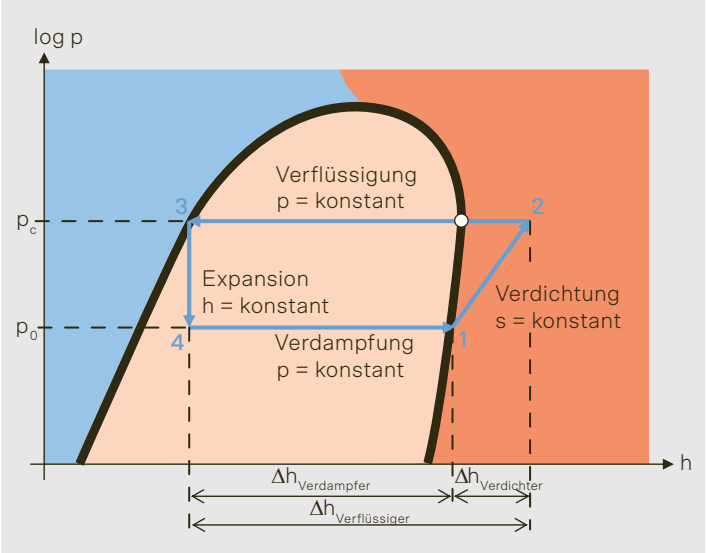


Bild 1.3: Der verlustfreie Kreisprozess im Log-p-h-Diagramm.



h_2 Enthalpie des Kältemittels am Verdichter-Austritt in kJ/kg
h_3 Enthalpie des Kältemittels am Verflüssiger-Austritt in kJ/kg

In Bild 1.4 des realen Prozesses sind einige Punkte bemerkenswert:
- Um zu verhindern, dass Kältemitteltröpfchen in den Verdichter gelangen und diesen beschädigen, ist eine Überhitzung des Sauggases bei gewissen Verdichtertypen notwendig (Punkte 1'–1).
- Ein Teil der Wärme kann auf einem höheren Temperaturniveau, also über der Verflüssigertemperatur, mittels einem sogenannten Heissgas-Enthitzer entnommen werden (Punkte 2–2').

Beispiel: Eine Wärmepumpe wird auf der Verflüssigerseite mit 45 °C betrieben. Es ist jedoch je nach Kältemittel und Laststufe möglich, ca. 5 % bis 15 % dieser Heizleistung mittels Enthitzer auf einem Temperaturniveau über 60 °C zu entnehmen. Damit kann das Brauchwarmwasser nachgewärmt werden.
Hinweis: Das Verfahren kommt nur bei grösseren Wärmepumpen zur Anwendung.
Die Temperaturverhältnisse der externen Medien (z. B. Heizwasser) bei einer Wärmepumpe zeigt Bild 1.5. Die mittleren Mediumtemperaturen am Verflüssiger/Verdampfer sind stets tiefer/höher als diejenigen des Kältemittels (T_c /T_o). Diese Temperaturdifferenzen (Grädigkeiten) sind abhängig von der Bauart der Wärmeübertrager und dem externen Medium. Speziell gekennzeichnet

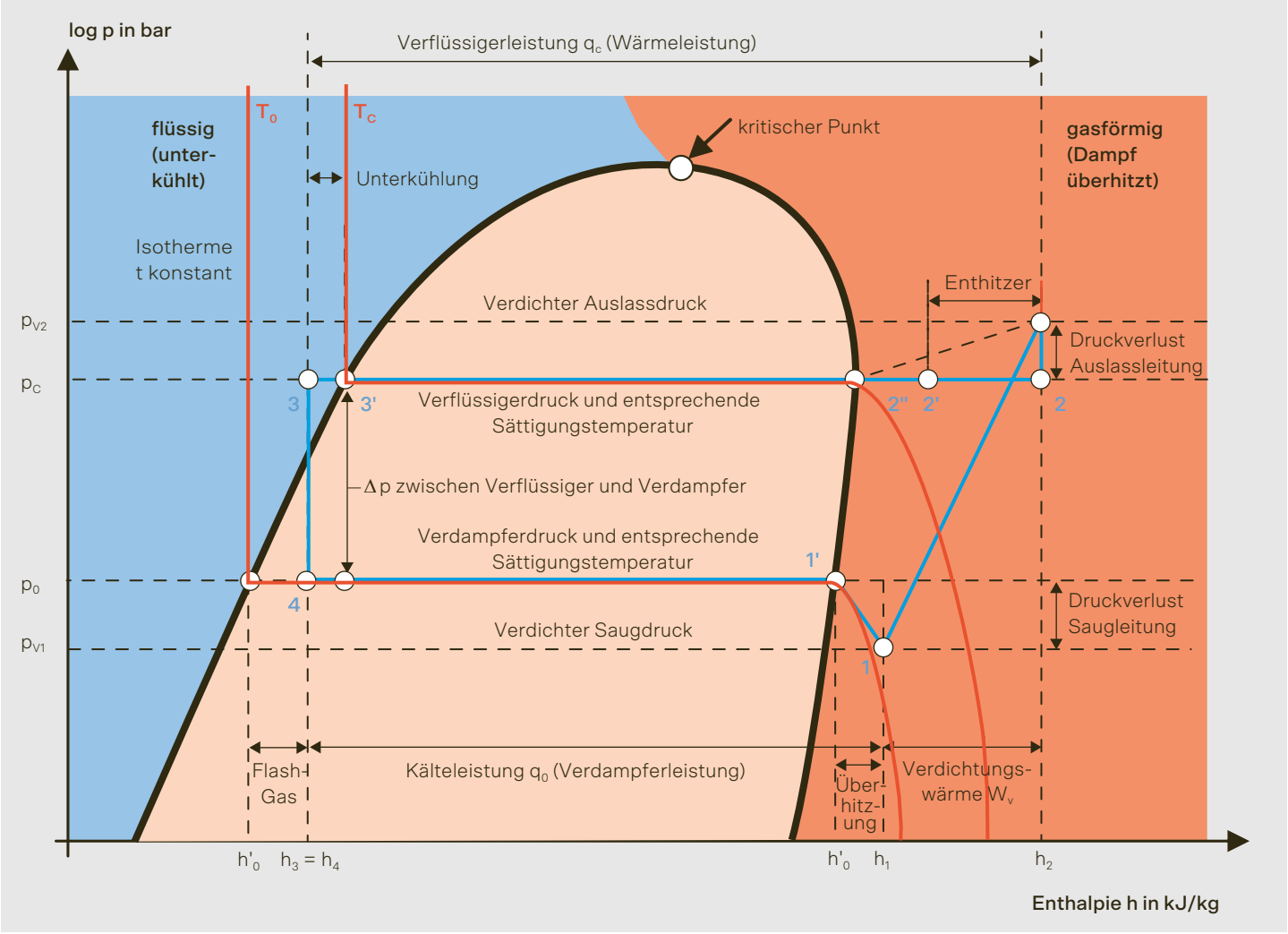


Bild 1.4: Das Log-p-h-Diagramm für den realen Kreisprozess eines Kältemittels.

sind die Eintrittstemperatur am Verdampfer und die Austrittstemperatur am Verflüssiger: Diese Temperaturen werden in Datenblättern zusammen mit den Leistungskennzahlen an diesem Betriebspunkt angegeben.

1.2 Systemgrenzen und Kennzahlen

Die im Alltag gebräuchlichsten Effizienzkennzahlen von Wärmepumpenanlagen sind der COP (Coefficient of Performance, Leistungszahl) und die Jahresarbeitszahl (JAZ). Der COP ist nach EN 14511 klar definiert, nämlich als Verhältnis von Leistungsabgabe zu Leistungsaufnahme in einem festen Betriebspunkt. Die Jahresarbeitszahl (JAZ) entspricht eindeutig dem Nutzungsgrad (d. h. dem Verhältnis von Energieabgabe zu Energieverbrauch über ein Jahr), sie wird in der Praxis aber mit oft unklaren Systemgrenzen verwendet. Je nach Betrachtungsraum ergeben sich stark unterschiedliche Zahlen. Die in Bild 1.7 angegebenen, differenzierteren Begriffe haben sich bewährt und unterscheiden sich gegenüber den Angaben aus Kapitel 1.1 darin, dass sie sich auf die äusseren (messba-

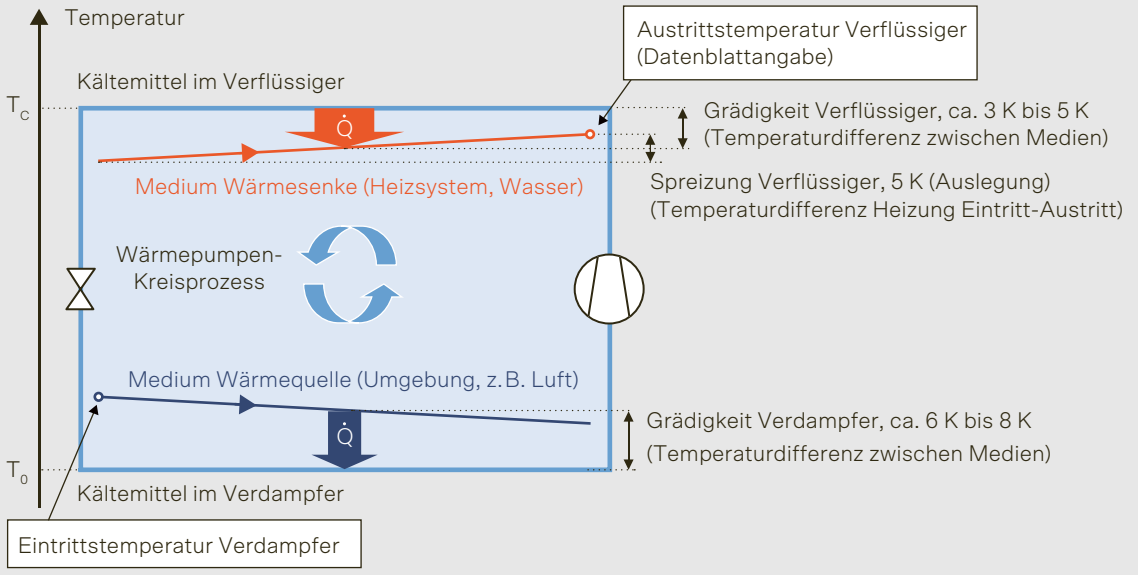


Bild 1.5: Temperaturen und Energieflüsse in einer Wärmepumpe. (Quelle: FHNW INEB)

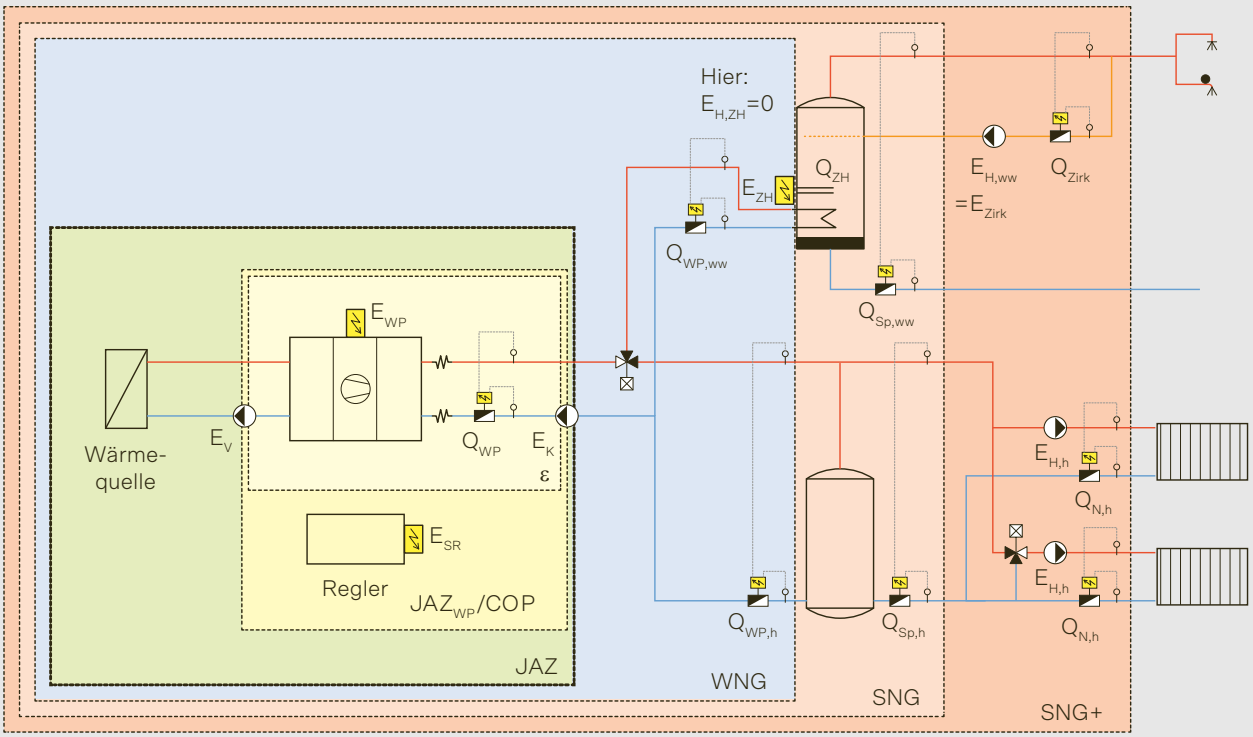
Leistungen (Momentanwerte oder Mittelwerte über kurze Zeitdauer)

$\dot{Q}_{WP}$	Heizleistung der Wärmepumpe
P_{WP}	Verdichter-Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
(P_V)	Leistungsanteil zur Überwindung des Verdampferdruckabfalls
(P_K)	Leistungsanteil zur Überwindung des Kondensatordruckabfalls
P_{SR}	Leistungsaufnahme der Steuerung und Regelung innerhalb der Wärmepumpe
P_A	mittlere Leistungsaufnahme der Abtaueinrichtung

Energien (Jahreswerte)

Q_{WP}	$= Q_{WP,h} + Q_{WP,ww}$ von der Wärmepumpe produzierte Wärme
Q_{ZH}	von der Zusatzheizung produzierte Wärme
Q_{Sp}	$= Q_{Sp,h} + Q_{Sp,ww}$ von den Speichern abgegebene Nutzwärme
Q_N	$= Q_{N,h} + Q_{N,ww}$ beim Nutzer verfügbare Wärme
E_{WP}	Verdichter-Energieverbrauch der Wärmepumpe
(E_V)	Energieverbrauch Verdampferpumpe/Ventilator (Anteil WP-intern)
(E_K)	Energieverbrauch Kondensatorpumpe (Anteil WP-intern)
E_V	Energieverbrauch Verdampferpumpe/Ventilator (insgesamt)
E_K	Energieverbrauch Kondensatorpumpe (insgesamt)
E_{SR}	Energieverbrauch Steuerung und Regelung
E_A	Energieverbrauch Abtaueinrichtung
E_C	Energieverbrauch Carterheizung
E_{ZH}	Energieverbrauch Zusatzheizung
$E_{H,ZH}$	Hilfsenergieverbrauch Zusatzheizung (z. B. Umwälzpumpen)
$E_{H,h}$	Hilfsenergieverbrauch Wärmeverteilung Heizung (z. B. Umwälzpumpen)
$E_{H,ww}$	Hilfsenergieverbrauch Wärmeverteilung Warmwasser (z. B. Zirkulation)

Bild 1.6: Symbolerläuterungen zu Bild 1.7.



Leistungs-bezogen

Leistungszahl (ε)

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{WP}}$$

Coefficient of Performance (COP)

$$COP = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{WP} + (P_V) + (P_K) + P_{SR} + P_A}$$

Energiebezogen

Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (JAZ_{WP})

$$JAZ_{WP} = \frac{Q_{WP}}{E_{WP} + (E_V) + (E_K) + E_{SR} + E_A + E_C}$$

Jahresarbeitszahl (JAZ)

$$JAZ = \frac{Q_{WP}}{E_{WP} + E_V + (E_K) + E_{SR} + E_A + E_C}$$

Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG)

$$WNG = \frac{Q_{WP} + [Q_{ZH}]}{E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + [E_{ZH} + E_{H,ZH}]}$$

[...]: inkl. Zusatzheizung

Systemnutzungsgrad (SNG)

$$SNG = \frac{Q_{Sp}}{E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + E_{ZH} + E_{H,ZH}}$$

Systemnutzungsgrad Plus (SNG+)

$$SNG+ = \frac{Q_N}{E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + E_{ZH} + E_{H,ZH} + E_{H,h} + E_{H,ww}}$$

Bild 1.7: Systemgrenzen und Kennzahlen in Wärmepumpenanlagen.

ren) Energieströme beziehen. Unterschieden werden sollte zudem stets, ob sich die Werte auf den Heizbetrieb, den Warmwasserbetrieb oder den kombinierten Heiz-/Warmwasserbetrieb beziehen. Gegebenenfalls (z. B. Schwimmbadbeheizung) sind auch weitere Verbraucher zu berücksichtigen.

Jahreszeitbedingte Leistungszahl und Raumheizungsenergieeffizienz
Mit der Einführung von Ökodesign-Anforderungen und der Energieetikette für Heizgeräte erlangte die Definition der sogenannten «Jahreszeitbedingten Leistungszahl» SCOP gemäss Norm EN 14825 eine wesentliche Bedeutung. Nebst gesetzlichen Anforderungen basieren mittlerweile auch diverse Qualitätslabel darauf. Der SCOP beschreibt die Effizienz eines Heizgerätes für eine bestimmte, fest vorgegebene theoretische Last (festgelegt als Heizkurve). Bewertet wird das Gerät nicht nur in einem bestimmten Betriebspunkt (COP). Vielmehr repräsentiert der «saisonale» COP (SCOP) eine Effizienz, die alle im Jahresverlauf vorkommenden (Teillast-) Betriebspunkte berücksichtigt und diese gewichtet. Als klimatische Grundlage dazu dient das Klima von Strassburg (F), welches ungefähr mit der Situation im schweizerischen Mittelland übereinstimmt. Alternativ kommen zwei weitere Klimasituationen («kälter»/Helsinki sowie «wärmer»/Athen) zur Anwendung. Anhand der oben festgelegten Systemgrenzen entspricht der SCOP am ehesten dem Wärmeerzeugernutzungsgrad. Auf dem SCOP basierend definiert die EN 14825 eine Primärenergieeffizienz η_s, welche einen Umwandlungsfaktor respektive Primärenergiefaktor für Strom von 2,5 annimmt (Stand 2018). Bei der Umrechnung vom SCOP zu η_s werden noch kleinere Korrekturen für Regelung und Umwälzpumpen berücksichtigt. Sowohl für den Warmwasser- als auch den Kühlbetrieb lassen sich vergleichbare Kennwerte festlegen. Auf eine weitere Ausführung wird hier verzichtet, Tabelle 1.1 fasst die Begriffe aber zusammen.

1.3 Normen

Produkteprüfungen und Anlagenprojektierungen basieren grösstenteils auf Normen, welche entweder weltweit (ISO), europäisch (EN) oder national (in Schweiz: SN respektive SIA) den aktuellen Stand der Technik repräsentieren. Normen liegen auch oft Qualitätsauszeichnungen und gesetzlichen Anforderungen zugrunde. Häufig genannte Normen im Wärmepumpenbereich sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt.

Hinweis: Nebst den genannten Prüf- und Planungsnormen sind insbesondere auch Richtlinien und Merkblätter zur Gerätesicherheit zu beachten, unter anderem:

Kennzahl	Beschreibung	Beschreibung	Festlegung
Heizbetrieb / Warmwasserbetrieb			
COP	Coefficient of Performance	Effizienz an bestimmtem Betriebspunkt	EN 14511/ EN 16147
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance	Saisonale Effizienz unter Berücksichtigung der ändernden Betriebsbedingungen	EN 14825/ EN 16147
η_s / η_{wh}	Primärenergieeffizienz	Primärenergieeffizienz, basierend auf SCOP	EN 14825/ EN 16147
Kühlbetrieb			
EER	Energy Efficency Ratio	Analogon zum COP für den Kühlfall	EN 14511
SEER	Seasonal Energy Efficency Ratio	Analogon zum SCOP für den Kühlfall	EN 14825
ESEER	European Seasonal Energy Efficency Ratio	Vergleichbar SEER, aber andere Lastverteilung und ohne Standby-Verluste. Kein Ecodesign-Begriff.	Eurovent / SIA 384/4

Tabelle 1.1: Effizienz-Bezeichnungen im Rahmen der Ecodesign-Anforderungen an Heiz-, Warmwasser- und Kühlgeräte.

Norm	Beschreibung	Anwendung
Prüfnormen		
SN EN 14511	Grundlegende Prüfnorm für Wärmepumpen	Qualitätslabels, Datenblattangaben
SN EN 14825	Prüfnorm für Wärmepumpen. Legt die Verfahren zur Berechnung von SCOP und SEER fest.	Energieetikette, Qualitätslabels, Datenblattangaben, Marktzulassung
SN EN 16147	Prüfnorm für Warmwasser-Wärmepumpen	Energieetikette, Qualitätslabels, Datenblattangaben, Marktzulassung
Planungsnormen		
SIA 181	Schallschutz im Hochbau	Grundlage für den Schallschutz bei Wärmepumpenanlagen
SN EN 378	Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen	Einsatz von Kältemitteln
SIA 384/1	Grundlagen von Heizungsanlagen. Beinhaltet auch Wärmepumpen.	Berechnung der Wärmeerzeugerleistung
SIA 384/3	Verfahren zur Bestimmung des Endenergiebedarfs von Heizungsanlagen. Beinhaltet auch Wärmepumpen.	Vereinfachte Abschätzung (Typologietool) und detaillierteres Rechenprogramme (WPesti)
SIA 384/4	Klimakälteanlagen in Gebäuden	–
SIA 384/6	Erdwärmesonden	Grundlage zu Planung, Ausführung und Betrieb von Erdwärmesonden
SIA 384/7	Grundwasserwärmenutzung	Ergänzung zur Norm SIA 384/6
SIA 384.201	Berechnung der Norm-Heizlast von Räumen und Gebäuden	Zusammen mit SIA 384/1 Grundlage zur Dimensionierung der Wärmeerzeugerleistung
SIA 385/2	Auslegung von Anlagen für Trinkwarmwasser	Zusammen mit SIA 384/1 Grundlage zur Dimensionierung der Wärmeerzeugerleistung
SIA MB 2048	Energetische Betriebsoptimierung	–

Tabelle 1.2: Ausgewählte wichtige Normen im Zusammenhang mit Wärmepumpen. Relevant ist die jeweils aktuell gültige Fassung.

Grundlage	Inhalt	Bemerkung
Energieverordnung (EnV), Seit 2018: Energieeffizienzverordnung (EnEV)	Marktzulassung und Informationspflicht für das Inverkehrbringen von Wärmepumpen	Umfasst Deklarationspflicht von Produktedaten und Pflicht zur «Energieetikettierung»
Lärmschutzverordnung (LSV)	Anforderungen an Aussenlärmimissionen	–
Musterverordnung der Kantone im Energiebereich (MuKEn)	Anforderungen an den Einsatz von Wärmepumpen, insbesondere zu zulässigen Vorlauftemperaturen Heizsystem, Dimensionierung (elektrischer Heizeinsatz)	Die MuKEn ist eine Vorlage, die kantonal umgesetzt wird
Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV)	Umgang und Einsatz von Kältemitteln	Unter anderem Meldepflicht für Anlagen mit mehr als 3 kg in der Luft stabilen Kältmitteln
Gewässerschutz-Gesetz (GSchG), Gewässerschutzverordnung (GSchV)	z. B. für die Nutzung von Grundwasser oder Erdwärme	Kantonal geregelt
Baubewilligungsverfahren	z. B. für die Nutzung von Grundwasser oder Erdwärme	Kommunal/kantonal
Brandschutzrichtlinie (VKF 24-15)	Brandschutzanforderungen an wärmetechnische Anlagen	Kantonal
Pflichtenheft Wärmepumpen-Systemmodul (WPSM)	Anforderungen an Komponenten, Hydraulik, Regelung sowie Betriebsoptimierung von Gesamtanlagen	Grundlage finanzieller Förderung von Kleinwärmepumpenanlagen bis 15 kW Heizleistung

Tabelle 1.3: Ausgewählte Gesetze, Verordnungen und Richtlinien für Wärmepumpenanlagen.

- Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU, früher 97/23/EG)
- Maschinenrichtlinie (Richtlinie 2006/42/EG)
- Richtlinien der Eidgenössischen Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS): EKAS 1825 (Brennbare Flüssigkeiten), EKAS 6507 (Ammoniak), EKAS 6516 (Druckgeräte), EKAS 6517 (Flüssiggas)
- ATEX, Explosionsschutz-Richtlinien
- SUVA, Merkblatt 2153 «Explosionsschutz»

Gesetzliche Rahmenbedingungen

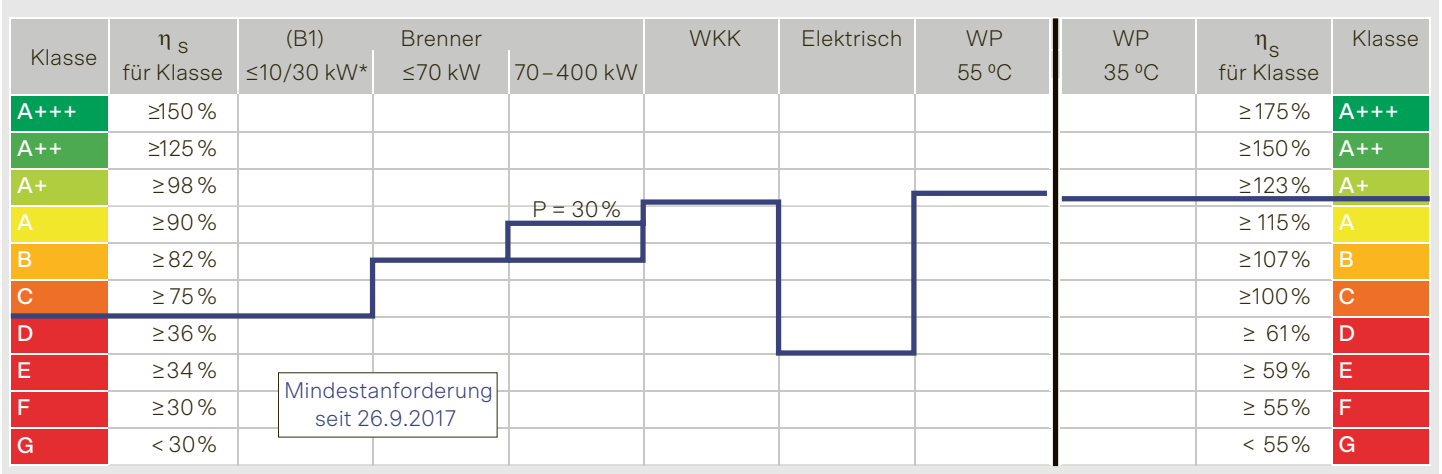
Bei der Planung, Installation und Inbetriebnahme von Wärmepumpenanlagen sind stets gesetzliche Anforderungen einzuhalten. Diese sind teilweise national, kantonal oder auf Gemeindeebene geregelt. Tabelle 1.3 gibt einen Überblick ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Ansprechpartner sind in jedem Fall die lokalen Behörden (Gemeinde und Kanton).

Tabelle 1.4: Klasseneinteilung und energetische Minimalanforderungen für Wärmepumpen (SCOP für Luft-Wasser-Geräte, Stand 2018). (Quelle: FHNW INEB)

	Auslegungs-Vorlauftemperatur 55 °C		Auslegungs-Vorlauftemperatur 35 °C	
	SCOP	η_s	SCOP	η_s
A+++	3,83	150 %	4,45	175 %
A++	3,20	125 %	3,83	150 %
A+	2,53	98 %	3,15	123 %
Anforderung Ecodesign	2,83	110 %	3,20	125 %

Ecodesign und Energieetikette

Seit 2015 bestehen in der Europäischen Union Anforderungen an die «umweltgerechte Gestaltung» von Heizgeräten. Gleichzeitig wurde die Pflicht zur Energieetikettierung dieser Gerätschaften mit einer Wärmeleistung bis 70 kW eingeführt. Die Schweiz hat diese ein Jahr später in der Energieverordnung (seit 2018 Energieeffizienzverordnung, EnEV) weitgehend übernommen. Beide Anforderungen basieren auf der Primärenergieeffizienz η_s. Mit der Energieetikette wurde zudem ein Instrument geschaffen, das den Vergleich verschiedener Technologien untereinander ermöglichen soll. So werden Kessel, WKK-Anlagen, direktelektrische Heizungen und Wärmepumpen mit ein und derselben Etikette bewertet (Bild 1.8). Die Wärmepumpen werden allerdings noch etwas feiner in «Wärmepumpen» (Auslegungs-Vorlauftemperatur 55 °C) und «Niedertemperatur-Wärmepumpen» (Auslegungs-Vorlauftemperatur 35 °C) unterteilt – an letztere werden wegen der physikalisch bedingten besseren Effizienz auch höhere energetische Anforderungen gestellt (Tabelle 1.4). Sie befinden sich aber stets in den höchsten Effizienzklassen. Die Bewertung ist aber stets an eine definierte Last gebunden, festgelegt in Form einer Heizkurve in einem durchschnittlichen Klima (Strasbourg/F; ungefähr vergleichbar mit dem Schweizer Mittelland). Die



*Typ B1 Boiler ≤ 10 kW / Typ B11 Kombiboiler ≤ 30 kW

Bild 1.8: Klasseneinteilung und minimale Anforderungen an die Primärenergieeffizienz η_s von Heizwärmeerzeugern. Für Niedertemperaturwärmepumpen («WP 35 °C») wurde eine separate Klassenteilung geschaffen. (Quelle: FHNW INEB, Andreas Genkinger)

Energieetikette bewertet dadurch bewusst lediglich ein Gerät, nicht dessen effektive Nutzung respektive Einbindung in das Gesamtsystem.
Hinweis: Wie für alle Wärmeerzeuger müssen Inverkehrsbringer von Wärmepumpen mit einer Heizleistung bis 70 kW eine Energieetikette bereitstellen. Diese bewertet aber einzig das Gerät unter ganz bestimmten Rahmenbedingungen. Als alleiniges Auswahlkriterium ist die Energieetikette daher nur bedingt geeignet. Eine A++ bewertete Luft-Wasser-Wärmepumpe kann unter Umständen (z. B. Alpenraum) weniger geeignet sein, als ein A+ bewertetes Sole-Wasser-Gerät.

Neufassung Ecodesign und Energieetikette

Mit der EU-Verordnung 2024/1781 vom 13. Juni 2024 soll ein Rahmen für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte (Ecodesign for Sustainable Products Regulation EU-ERSP) geschaffen werden. Darauffolgend werden neue Anforderungen für fast alle Produkte eingeführt, die in der EU in Verkehr gebracht werden.
Eine der Anforderungen ist ein digitaler Produktpass, in dem Daten wie Materialien und deren Herkunft oder Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg aufgeführt sind. Ziel ist es, Unternehmen zu einer nachhaltigeren Wirtschaftsweise und mehr sozialer Verantwortung zu bewegen. Für die Branche ist dies mit einem hohen zusätzlichen Verwaltungsaufwand verbunden. Darüber hinaus entstehen den Herstellern und Betreibern zusätzliche Kosten durch die obligatorische Konformitätsprüfung durch Dritte und die Selbstüberwachung.
Als dieses Buch in Druck ging, befanden sich die EU-Verordnungen 811/2013 und 812/2013 zur Energieetikette sowie die 814/2013 und 81572013 zum Ecodesign in der Schlussphase der Überarbeitung. Die Neufassungen werden vermutlich 2026 im Amtsblatt der Europäischen Union publiziert. Die entsprechenden Anforderungen müssen rund zwei Jahre später definitiv am Markt umgesetzt sein. Einige der Anforderungen können aber auch später eingeführt werden und falls nötig, können Teilaspekte nach einem vorgegebenen Zeitplan angepasst werden.
Eine wesentliche Änderung der neuen Verordnungen betrifft beispielsweise die Mindestanforderungen an den SCOP (Bild 1.9). Das übergeordnete Ziel der Überarbeitung ist, den Gebäudepark bis 2050 CO_2-frei betreiben zu können. In dieselbe Richtung wirken auch weitere Regulierungen, zu denen etwa die Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) und das Emissionshandelssystem für Gebäude (Emissions Trading System, ETS2) gehören.

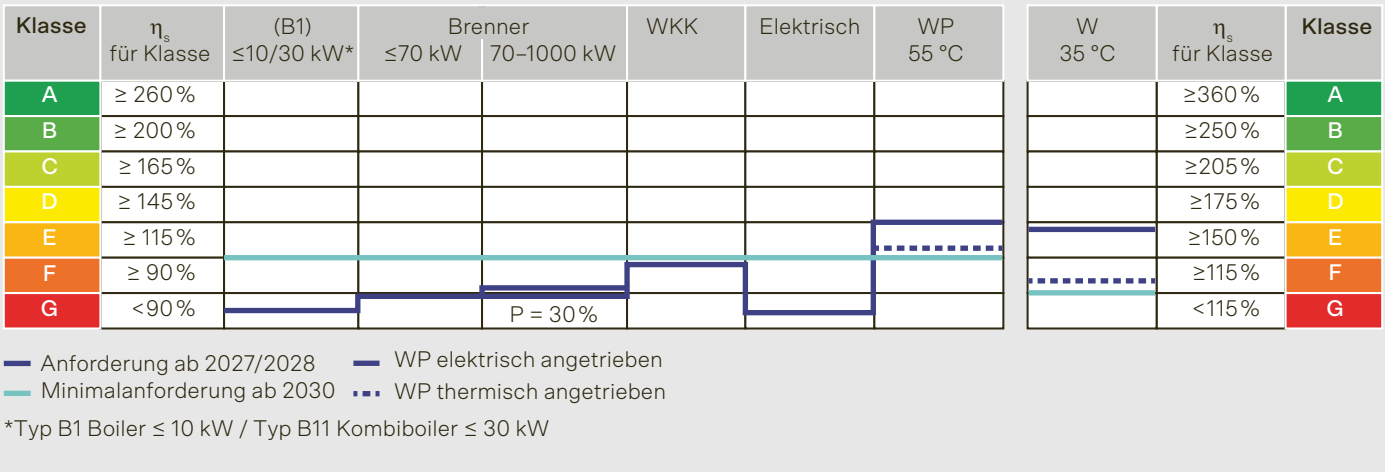


Bild 1.9: Klasseneinteilung und minimale Anforderungen an die Primärenergieeffizienz η_s von Heizwärmeerzeugern gemäss Entwurf Neufassungen Ecodesign/Energieetikettierungs-Verordnungen, Stand 2025. (Quelle: FHNW INEB, Andreas Genkinger)

Auswirkungen auf die Schweiz
Die Europäische Gesetzgebung ist für den Schweizer Markt zwar nicht direkt verbindlich. Es besteht jedoch ein Abkommen zwischen der Schweiz und der EU, das die gegenseitige Anerkennung von Konformitätsbewertungen anstrebt (Cassis-de-Dijon-Prinzip). Überdies verweist die schweizerische Gesetzgebung an einigen Stellen direkt auf EU-Gesetzestexte. Wie weit sich die Schweiz diesen nun ändernden Gegebenheiten in der EU anpassen wird, steht derzeit (2025) noch nicht fest.
Hinsichtlich Wärmepumpen sind aus Schweizer Sicht folgende Änderungen in den EU-Regulierungen relevant:

- Tieferer Primärenergiefaktor des europäischen Verbraucherstroms
- Gestaltung, Informationsgehalt und Skalierung Energieetikette
- Deklaration der Schallleistungspegel bei 54 % Teillast statt bei 35 %
- Quellentemperatur 5 °C für Sole-Wasser-Geräte
- Anforderungen an die Wart- und Reparierbarkeit
- Self-Monitoring durch Gerät
- Geänderte technische Deklarationen zur Nennleistung

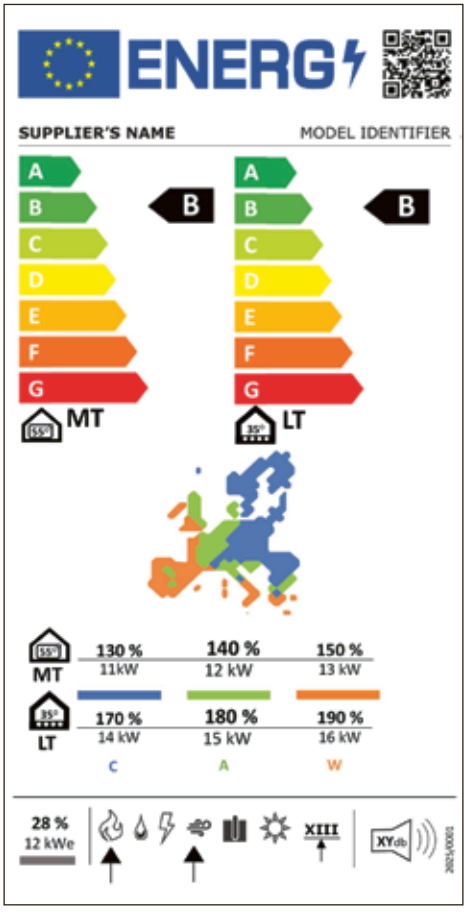


Bild 1.10: Entwurf der neuen Energieetikette für Heizwärmeerzeuger. Die Angaben sind mit der aktuellen Version (2025) nicht vergleichbar.

Eine Änderung, die die Schweiz betreffen wird, ist der Primärenergiefaktor für Elektrizität – er liegt ja der energetischen Bewertung einer Wärmeerzeugung zugrunde. Aufgrund des geänderten Produktionsmixes in Europa wurde der Primärenergiefaktor von 2,5 auf 1,9 gesenkt. Dadurch steigen auch die Primärenergieeffizienzen η_s von Wärmepumpen um rund 50 % (absolut). Sowohl für die Mindestanforderungen gemäss Ecodesign-Richtlinie als auch für die Energieetikette sind Korrekturen vorgesehen, die dafür sorgen, dass sich die technischen Anforderungen nicht ändern. Infolge der Neuskalierung der Energieetikette fallen Wärmepumpen künftig aber eher in die Klassen C und B statt A++ oder A+++ wie derzeit üblich. Überhaupt werden sich die Angaben auf der bisherigen und der kommenden Energieetikette sowohl betreffend Energie als auch Schallemissionen nicht miteinander vergleichen lassen.
Die Mindestanforderung an die Primärenergieeffizienz wird vermutlich um 2030 pauschal für alle Wärmeerzeuger auf mindestens 115 % angehoben. Dadurch werden rein fossil oder direktelektrisch betriebene Heizungsanlagen nicht mehr marktfähig sein. Neu wurden nebst thermisch angetriebenen Wärmepumpen auch Hybridsysteme mit Wärmepumpen in die Regulierung aufgenommen (nicht in Bild 1.9 gezeigt). Hierzu gehört beispielsweise die Kombination von Gasfeuerung und Wärmepumpe im selben Gerät. Sie dürften aber auf dem Schweizer Markt – speziell als leistungsschwächere Seriengeräte – ohnehin wenig Verbreitung finden.
Einhergehend mit diesen Anpassungen wurde auch die Energieetikette grundlegend überarbeitet (Bild 1.10). Die früher in der Energieetikette und in der Ecodesign-Richtlinie angewendete Deklarati-

on des Schalleistungspegels beim Betriebspunkt A7 (35 % Teillast bezogen auf A–10) hat sich nicht bewährt. Deshalb wird hierfür künftig der 54-%-Teillast-Betriebspunkt (A2) verwendet. Er ist deutlich repräsentativer für einen durchschnittlichen Betrieb über das ganze Jahr. Bei der Revision 2024 der Schweizer Lärmschutzverordnung (LSV) wurde dies übrigens bereits berücksichtigt. Basierend auf den heute üblichen Betriebsverhältnissen wird die Quellentemperatur für die Bewertung von Energie und Schall bei Sole-Wasser-Wärmepumpen von derzeit 0 °C (B0) auf 5 °C (B5) angepasst.

Material- und Ressourceneffizienz, Monitoring

Die EU-Verordnung 2024/1781 ersetzte per Mitte 2024 die bis dahin geltende 2009/125/EG (Ecodesign-Richtlinie) als Grundlage für die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Darauf basieren die hier beschriebenen Anforderungen an Wärmeerzeuger.

Mit der Verordnung 2024/1781 erhalten neu die Begriffe «Nachhaltigkeit» und «Kreislaufwirtschaft» eine bedeutende Rolle. Im Mittelpunkt stehen nicht mehr nur energetische Anforderungen, sondern auch die Material- und Ressourceneffizienz. Hier sind Langlebigkeit sowie die Wart- und Reparierbarkeit von Geräten wichtig. Folgerichtig wird gefordert, dass künftig Ersatzteile 10 Jahre über die Marktverfügbarkeit des Produktes hinaus innerhalb einer zehntägigen Frist verfügbar und mit üblichen Werkzeugen einbaubar sein müssen.

Die Geräte müssen leicht wart- und reparierbar und die Materialien rezyklierbar sein. Ebenso werden Anforderungen an die Produktdokumentation gestellt, die ja Voraussetzung für einen erfolgreichen Service sind. Dazu gehören etwa Explosionszeichnungen.

Die Wahl eines effizienten Geräts alleine stellt nicht sicher, dass die Anlage lange, zuverlässig und effizient läuft. Die Einbindung in das Gesamtsystem sowie die Qualität der Regelung sind mitentscheidend. Deshalb sollen die künftigen Ecodesign-Anforderungen die Grundlagen dafür schaffen, dass auch Seriengeräte ein minimales Monitoring ermöglichen. Die Geräte müssen voraussichtlich folgende Kennwerte erfassen, speichern und den Betreibenden anzeigen:

- Energieverbrauch
- Abgegebenen Wärmeenergie
- Daraus abgeleitete Effizienz
- Anzahl Impulse (Ein-Aus-Zyklen)
- Betriebsart des Wärmeerzeugers (Warmwasser oder Heizung)

Zumindest in Diskussion steht, die auch auf der Energieetikette ausgewiesene Nennleistung einer Wärmepumpe explizit und einzig auf den Wärmepumpenbetrieb, also ohne Zusatzheizung zu beschränken. Die bisherige Handhabung erlaubt es, einen massgeblichen Anteil an elektrischer Zusatzheizung zu berücksichtigen (Bivalenztemperatur bis 2 °C). Solche Anlagen dürfen gemäss der Schweizer Gesetzgebung nur ohne die elektrische Widerstandsheizung betrieben werden.

Weitere Punkte der Diskussion zur Überarbeitung der EU-Vorgaben bei den Heizwärmeerzeugern betreffen die Konformitätsprüfung an sich. Sie wurde bisher als reine Selbstdeklaration gehandhabt. Angedacht ist, dies durch eine unabhängige Konformitätsbewertung durch «benannte Stellen», also unabhängige Dritte, durchführen zu lassen. Vermutlich unberücksichtigt bleibt die Idee, auch den Kühlbetrieb von reversiblen Wärmepumpen in die Bewertung solcher Geräte mit einfliessen zu lassen.

Kapitel 2

Komponenten der Wärmepumpe

Die vier Hauptkomponenten, ohne die kein herkömmlicher Kaltdampf-Kreisprozess (Verdichtungskältesystem) funktioniert, sind:
- Verdichter (Kompressor)
- Verflüssiger (Kondensator)
- Drosselorgan (Expansionsventil)
- Verdampfer

2.1 Verdichter

Der Verdichter (Kompressor) komprimiert das aus dem Verdampfer angesaugte Kältemittelgas auf den Druck, der zur Verflüssigung des Kältemittels notwendig ist. Es sind die unterschiedlichsten Verdichterkonstruktionen erhältlich, wobei je nach Anwendungsbereich und Nutzungsart jede Bauart Vor- und Nachteile aufweist.

Bauarten

Tabelle 2.1 beschränkt sich auf Verdichter, die in der Wärmepumpenbranche häufig eingesetzt werden. Nicht erwähnt sind unter anderem Flügelzellen-, Rollkolben- und Drehkolbenverdichter. Turbo-Verdichter sind im Markt auch unter der Bezeichnung «Turbocor» bekannt. Diese ölfreien, magnetisch gelagerten Turbocor-Verdichter kommen ab einer Heizleistung von etwa 320 kW zum Einsatz, erreichen eine maximale Vorlauftemperatur von 48 °C (bei Volllast) und haben unter Teillast (10 % bis 70 %) sehr hohe Wirkungsgrade. Durch die Kombination mit einer Dralldrossel im Ansaug passt sich der Turbocor optimal an die unterschiedlichen Lastzustände an. Weitere Vorteile des Turbocors sind: geringer Anlaufstrom, vollständig integrierte Steuerelektronik mit integriertem Frequenzumformer (FU), geringes Gewicht, niedriger Schallleistungspegel, keine mechanischen Verschleissteile und somit eine höhere Betriebssicherheit durch Minimierung der beweglichen Bauteile.

Bauformen

Je nach Anwendung und unter Berücksichtigung der Kosten unterscheidet man folgende drei Verdichterbauformen.
- Offene Verdichter: Motor und Verdichter sind verschiedene Baugruppen. Die Antriebswelle des Verdichters wird gasdicht aus dem Gehäuse geführt, wo sie direkt gekuppelt oder über einen Keilriemen mit dem Antriebsmotor verbunden ist. Nebst Elektromotoren sind auch Verbrennungsmotoren für den Antrieb möglich.
- Hermetische Verdichter: Motor und Verdichter bilden eine Einheit. Im Ge-

Tabelle 2.1: Bauarten von Verdichtern.

Verdichterbauart	Hubkolben	Spiralkolben (Scroll)	Schraube	Turbo
Arbeitsprinzip	Verdränger	Verdränger	Verdränger	Strömungsmaschine
Verdichtung	statisch	statisch	statisch	dynamisch
Hubvolumen	geometrisch	geometrisch	geometrisch	abhängig vom Gegendruck
Förderung	pulsierend	stetig	stetig	stetig
Volumenstrom (Bereich)	bis 1000 m^3/h	bis 500 m^3/h	100 bis 10 000 m^3/h	250 bis 50000 m^3/h
Heizleistung (Bereich bei B0/W35)	bis 800 kW	bis 400 kW	80 bis 8000 kW	100 bis 40 000 kW
Druckverhältnis im Regelfall (einstufig)	bis 10	bis 10	bis 30	bis 5
Regelbarkeit bei konstanter Drehzahl	Stufen	schwierig	stufenlos	stufenlos
Drehzahlregelung	möglich	möglich	möglich	möglich
Empfindlichkeit gegen Flüssigkeitsschläge	hoch	gering	gering	gering
verursacht Erschütterungen	ja	nein	nein	nein



Bild 2.1: Offener Hubkolbenverdichter (Industrieausführung). (Quelle: Grasso)

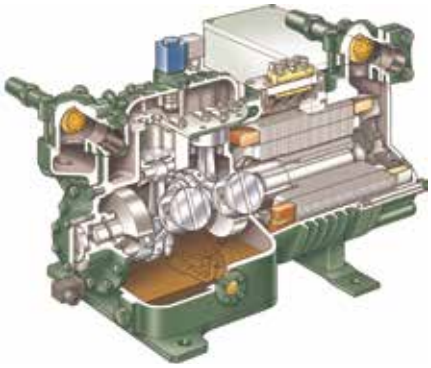


Bild 2.2: Halbhermetischer Hubkolbenverdichter. (Quelle: Bitzer)



Bild 2.3: Halbhermetischer Schraubenverdichter. (Quelle: Bitzer)



Bild 2.4: Hermetischer Spiralkolbenverdichter (Scroll). (Quelle: Copeland)



Bild 2.5: Halbhermetischer Turboverdichter, ölfrei. (Quelle: Turbocor)

gensatz zur halbhermetischen Ausführung sind hermetische Verdichter in einem vollverschweissten Gehäuse montiert. Die Motorkühlung erfolgt in der Regel über das angesaugte Kältemittelgas (Sauggaskühlung). Bei einem Defekt muss der komplette Verdichter ersetzt werden.

- Halbhermetische Verdichter: Motor und Verdichter bilden eine Einheit. Die Antriebswelle ist komplett im Gehäuse mit dem Motor verbunden. Die Kühlung des Elektromotors erfolgt entweder durch das angesaugte Kältemittelgas (Sauggaskühlung) oder über das Gehäuse mit Luft oder Wasser. Zur Verminderung von Reibung und Verschleiss sowie zur Abdichtung von Leckagen im Verdichtungsraum werden Verdichter meist mit Öl geschmiert. Das Kältemittel vermischt sich dabei mit dem Öl, insbesondere in Stillstandszeiten des Verdichters kann es sich erheblich darin anreichern. Beim erneuten Verdichterstart schäumt das Öl-Kältemittel-Gemisch dann auf. Um dies zu verhindern kann das Ölvorratgefäss erwärmt werden, wodurch sich das darin gelöste Kältemittel genügend verflüchtigt (Carter-, Kurbelgehäuse- oder Ölsumpfheizung).
- Ölfreie Verdichter: Mit ölfreien Verdichtern sind solche Verdichter gemeint, die dank spezieller Konstruktion und Herstellung ohne Ölschmierung auskommen. Der wesentliche Vorteil dieser Verdichter liegt darin, dass kein Öl im Kältekreislauf mitzirkuliert und somit die Problematik der Ölrückführung aus dem System entfällt. Dies ergibt vor allem bei überfluteten Verdampfern und bei Verbundsystemen (mehrere Verdichter je Kältekreislauf) wesentliche Vorteile.

2.2 Wärmeübertrager

Verdampfer
Im Verdampfer wird der Umgebung (Luft, Wasser, Sole etc.) Wärme entzogen. Das Kältemittel nimmt diese Wärme auf und verdampft. Die Wärme wird vom Medium (Wärmequelle) an das Kältemittel übertragen. Es ist grundsätzlich zwischen trockener und überfluteter Verdampfung zu unterscheiden, wobei es auch Kombinationen der beiden Varianten gibt.

- Trockene Verdampfung: Das Kältemittel wird über ein Expansionsventil dem Verdampfer zugeführt. Die Kältemittelmenge wird anhand der Differenz zwischen der Gas- und Sättigungstemperatur (Sauggasüberhitzung) geregelt. Am Verdampferaustritt ist das Kältemittelgas überhitzt und somit «trocken».
- Überflutete Verdampfung: Das Kältemittel wird über eine Hoch- oder Niederdruck-Schwimmerregulierung in den Verdampfer geführt. Die Kältemittelmenge wird anhand des Flüssigkeitsspiegels auf der Hoch- oder Niederdruckseite geregelt. Am Verdampferaustritt ist das Kältemittelgas kaum überhitzt und somit «nass». In den meisten Fällen ist deshalb ein Flüssigkeitsabscheider vorzusehen, der den Verdichter vor Flüssigkeitsschlägen schützt. Der wesentliche Vorteil der überfluteten Verdampfer liegt darin, dass keine minimalen Temperaturdifferenzen zwischen Kältemittel- und Mediumseite notwendig sind, d. h. die Verdampfungstemperatur kann höher ausgelegt werden respektive steigt im Teillastbereich stärker an. Die Folge ist ein besserer Wirkungsgrad des Gesamtsystems.

Verflüssiger
Im Verflüssiger (Kondensator) wird unter Wärmeabgabe an Anlagen zur Wärmenutzung (Senke) das vom Verdichter kommende Kältemittelgas enthitzt, verflüssigt und unterkühlt. Die Wärmeabgabe kann auch über mehrere Wärmeübertrager und damit auf unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgen. Diese Anwendung mit Enthitzer, Verflüssiger und Unterkühler wird aus betriebswirtschaftlichen Gründen bei grösseren Anlagen sowie bei Systemen mit grossen Temperaturunterschieden zwischen Mediumeintritt und -austritt interessant, z. B. Fernwärmeversorgung, Wassererwärmung und industrielle Anwendungen.

Bauarten

- Plattenwärmeübertrager: kompakte Konstruktion in gelöteter, geschweisster oder gedichteter Ausführung zur Wärmeübertragung von flüssigen und – in Spezialanwendungen – gasförmigen Medien. Plattenapparate haben den Vorteil von kleinen Inhalten, grossen Übertragungsflächen auf kleinstem Raum und einer hohen Modularität in der Herstellung. Sie sind für trockene und überflutete Verdampfung geeignet. Bei Wärmepumpen bis ca. 200 kW kommt vorwiegend diese Bauart zum Einsatz.

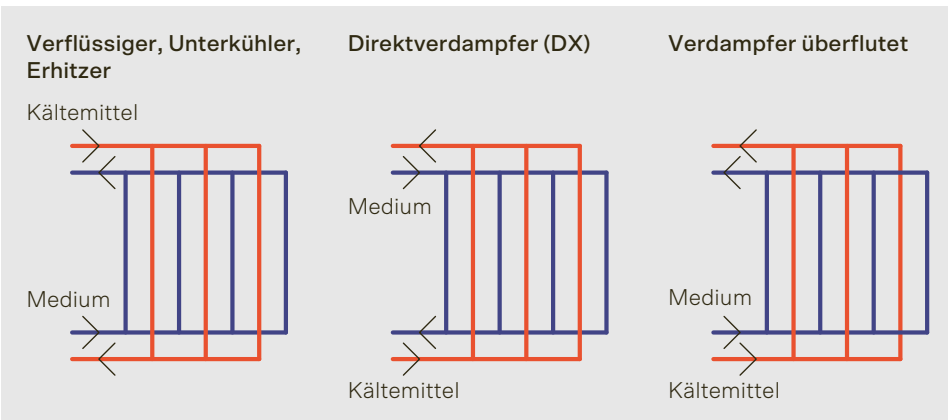


Bild 2.6: Schema Plattenwärmeübertrager.

– Rohrbündelwärmeübertrager sind die klassische Konstruktion aus Rohrregister und Kesselmantel zur Wärmeübertragung von flüssigen und vereinzelt auch gasförmigen Medien. Rohrbündelapparate zeichnen sich durch eine hohe Materialvielfalt, eine geringere Schmutz- und Frostanfälligkeit sowie ein träges Regelverhalten aus. Sie sind für trockene und überflutete Verdampfung geeignet, wobei bei der überfluteten Variante eine mehrfach grössere Kältemittelmenge benötigt wird.
– Bei Koaxialwärmeübertragern erfolgt die Wärmeübertragung in einem wendelförmig gebogenen Doppelrohr, meist aus Kupfer oder Edelstahl gefertigt. Einsatz mehrheitlich bei kleinsten Anlagen oder aus konstruktionstechnischen Gründen.
– Registerwärmeübertrager bestehen aus Rohrschlangen oder Plattenpaketen in verschiedenen Materialqualitäten, die in offenen und geschlossenen Behältern sowie in festen Umgebungen eingebaut werden. Einsatz vor allem bei stark verschmutzten Medien, wie z. B. Abwasser und im Erdreich.
– Lamellenwärmeübertrager bestehen in der Hauptsache aus einzelnen oder mehreren parallelen Rohren mit aufgepressten Lamellen. Sie sind zur Wärmeübertragung von gasförmigen Medien (z. B. Luft) geeignet. Es sind verschiedene Materialkombinationen und Schaltungen möglich. Speziell zu beachten ist ein für den Betrieb optimaler Lamellenabstand, da Verschmutzung, Vereisung etc. zu deutlichen Leistungseinbussen führen können. Beim Einsatz unter ca. 5 °C Lufttemperatur setzt der Wärmeübertrager Reif und Eis an, deren Abtauung den effizienten Betrieb stark beeinträchtigt (siehe Kapitel 2.6).



Bild 2.7: Plattenwärmeübertrager. (Quelle: BMS)



Bild 2.8: Rohrbündelwärmeübertrager. (Quelle: Bitzer)



Bild 2.9 Koaxialwärmeübertrager. (Quelle: Wieland)

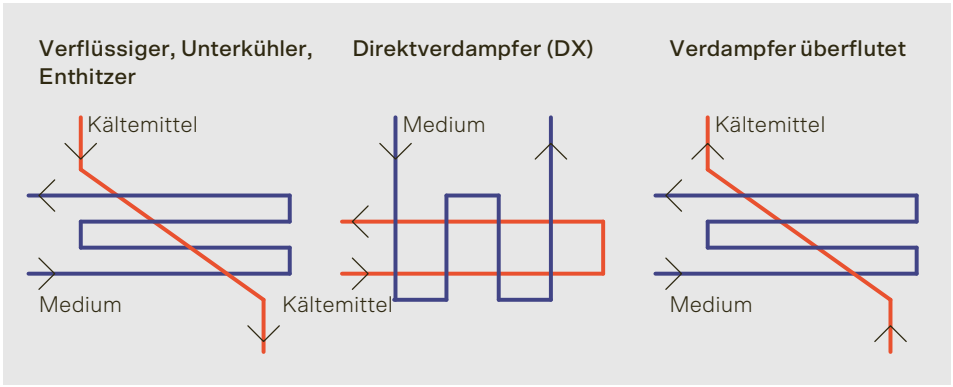


Bild 2.10: Schema Rohrbündelwärmeübertrager.

2.3 Drosselorgan

Das Drosselorgan entspannt (expandiert) das verflüssigte Kältemittel von der Hochdruck- zur Niederdruckseite des Kältekreislaufs. Weiter regelt das Drosselorgan den Kältemittelfluss zum Verdampfer. Ein korrekt ausgelegtes Drosselorgan, insbesondere ein elektronisches Expansionsventil, hat grossen Einfluss auf die Effizienz eines Wärmepumpen-Prozesses.

Bauarten

- Expansionsventile regeln den Kältemittelfluss zum Verdampfer anhand der Sauggasüberhitzung am Verdampferaustritt und werden ausschliesslich in Systemen mit trockener Verdampfung eingesetzt. Es sind thermostatische Expansionsventile mit innerem und äusserem Druckausgleich sowie elektronische Expansionsventile zu unterscheiden. Wesentlicher Vorteil der elektronischen Variante ist die geringere Sauggasüberhitzung und der grössere Leistungsbereich eines Ventils. Dies bringt Vorteile bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und im Teillastverhalten.
- Hochdruckschwimmerregler leiten den Kältemittelfluss in Abhängigkeit des Flüssigkeitsniveaus auf der Hochdruckseite des Schwimmerreglers dem Verdampfer zu. Die Hochdruckschwimmerregler müssen nicht einreguliert werden und funktionieren im gesamten Leistungsbereich der Anlage sehr stabil.
- Niederdruckschwimmerregler arbeiten ähnlich wie ihre Verwandten auf der Hochdruckseite. Der Kältemittelfluss wird jedoch in Abhängigkeit des Flüssigkeitsniveaus im Verdampfer geregelt. Elektronische Varianten von Schwimmerregulierungen sind ebenfalls verfügbar.



Bild 2.11: Registerwärmeübertrager (Plattenpaket). (Quelle: Omega)



Bild 2.13: Thermostatisches Expansionsventil. (Quelle: Danfoss)

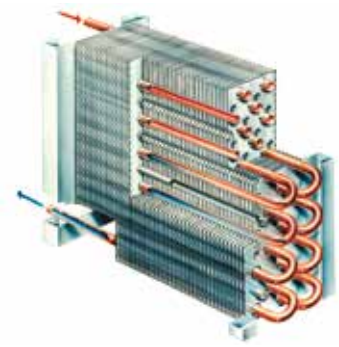


Bild 2.12: Lammellenwärmeübertrager (Batterie ohne Ventilator, Gehäuse, etc.). (Quelle: Günter)



Bild 2.14: Hochdruckschwimmerregler. (Quelle: TH-Witt)

2.4 Sicherheitseinrichtungen

Damit Apparate, Komponenten, Leitungen und Betriebsstoffe des Kältemittelkreislaufs nicht unzulässigen Belastungen ausgesetzt werden, sind Sicherheitseinrichtungen notwendig. Die Art und Form der Absicherung gibt der Gesetzgeber vor, bezogen auf Anlagengrösse, Kältemittel und Standort. Nachfolgend eine Auswahl der häufigsten Sicherheitsgeräte und Sicherheitsarmaturen:

- Sicherheitsdruckbegrenzer respektive Hochdruckpressostat (Abschaltung bei steigendem Druck) zum Schutz des Verdichters und aller Komponenten auf der Hochdruckseite. Dieser Apparat muss ab einer bestimmten Verdichter- respektive Anlagengrösse zwingend mechanisch arbeiten und direkt den Strom zum Hauptschütz des Verdichters unterbrechen.
- Niederdruck: Abschaltung bei sinkendem Druck zum Schutz des Verdichters und aller Komponenten auf der Niederdruckseite.
- Öldifferenzdruck: Abschaltung bei sinkendem Differenzdruck zur Überwachung der Verdichterschmierung.
- Druckgasüberhitzung: Abschaltung bei steigender Temperatur zur Überwachung der Heissgastemperatur.
- Frostschutz: Abschaltung bei sinkender Temperatur zum Schutz des Verdampfers vor dem Einfrieren.
- Strömung: Abschaltung bei sinkender Sekundärströmung zum Schutz des Verdampfers vor Verschmutzung respektive Vereisung und des Verflüssigers und Enthitzers vor Überhitzung.
- Wicklungsschutz, Klixon, Wärmepaket und Motorschutz zum Schutz der Elektromotoren (Verdichter, Ventilatoren, Pumpen etc.).
- Sicherheitsventile, Berstscheiben, Sollbruchstellen etc. zum Schutz vor zu grossen Systemdrücken im Betrieb und Stillstand, z. B. aufgrund von Feuer.
- Niveau-, Kältemittelüberwachung etc. zur Überwachung des Kältemittelinhalts (Überfüllung, Leckagen, Verlagerungen etc.).

2.5 Weitere Komponenten

Zur Anlagenfunktion notwendige oder zumindest vorteilhafte Einbauten sind unter anderem folgende Komponenten und Apparate:

- Filtertrockner zur Aufnahme von Restfeuchte im Kältesystem. Diese Feuchte kann zur Vereisung des Expansionsventils, zu Veränderungen der Betriebsstoffqualität und zu Wicklungsschäden führen.
- Schauglas mit Feuchtigkeitsindikator zur visuellen Kontrolle der Systemfeuchtigkeit und Flashgasbildung (Gasbläschen) als Indiz für Kältemittelmangel, verschmutzten Filtertrockner etc.
- Saugfilter zum mechanischen Schutz des Verdichters.
- Magnetventil zur automatischen Ab- und Umschaltung respektive Absaugung einzelner Wärmeübertrager.
- Druckregler zur Druckkonstant-, Druckhoch- und Drucktiefhaltung einzelner Systembereiche.
- Vibrationsabsorber zur Entkopplung schwingender Anlageteile, z. B. Verdichter.
- Druckgasschalldämpfer (Heissgasmuffler) zur Dämpfung der Gaspulsationen von Kolbenverdichtern.
- Kältemittelsammler zur Kältemittelaufnahme bei unterschiedlichen Betriebszuständen oder im Absaugbetrieb.
- Ölabscheider zur Verhinderung von grossen Ölverlagerungen im System und Verölung des Verdampfers. Einsatz bei allen Schraubenverdichtern, Mehrverdichteranlagen und überfluteten Verdampfern.
- Absperrventile und Messarmaturen zur einfachen Wartung und Kontrolle der Anlagen (Schraderventile).
- Carter- oder Ölsumpfheizung zum Verhindern, dass sich während der Stillstandszeiten Kältemittel im Schmieröl löst.

2.6 Abtaueinrichtungen

Lamellenwärmeübertrager – beispielsweise als Verdampfer von Luft-Wasser-Wärmepumpen – können bei tiefen Lufttemperaturen Reif und Eis ansetzen. Die Wärmeübertragung wird dadurch immer schlechter. Die Oberfläche muss deshalb bei Bedarf abgetaut werden. Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen haben sich die beiden folgenden Abtausysteme durchgesetzt.

Heissgas-Bypass (Bild 2.15)
Während des Abtauvorganges wird der Verflüssiger mit einem Bypassventil umgangen und das Druckgas vom Verdichter direkt dem Verdampfer zugeführt. Wichtig dabei ist, dass der Druck nach dem Verdichter hochgehalten wird. Die Abtauleistung entspricht knapp der durch den Verdichter aufgenommenen elektrischen Leistung.

Prozessumkehr (Bild 2.16)
Mittels 4-Weg-Magnetventil respektive Ventilkombinationen wird der Prozess umgekehrt. Der Verflüssiger dient als Verdampfer und der Verdampfer als Verflüssiger. Zu beachten gilt, dass während des Abtauprozesses genügend Energie auf der Wärmenutzungsseite verfügbar ist, da während der Abtauung Wärme entzogen wird. Die Abtauleistung entspricht ca. dem 2- bis 3-fachen der elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters.

Naturabtauung
Die Abtauung mit dem Ventilator alleine ist über ca. 2 °C bis 3 °C die schnellste und effizienteste Möglichkeit für das Abtauen des Verdampfers. Diese Art Abtauung lässt sich problemlos mit anderen Systemen kombinieren.

2.7 Bauarten von Wärmepumpen

In der Wärmepumpenbranche wird zwischen folgenden Bauarten unterschieden.

- Kompakt: Alle Anlagenteile sind werkseitig oder vor Ort kompakt in einem Gehäuse, in einem Maschinenraum oder auf einem Chassis aufgebaut.
- Split: Wesentliche Teile der Wärmepumpe befinden sich ausserhalb der eigentlichen Energiezentrale, z. B. der Verdampfer einer Luft-Wasser-Wär-

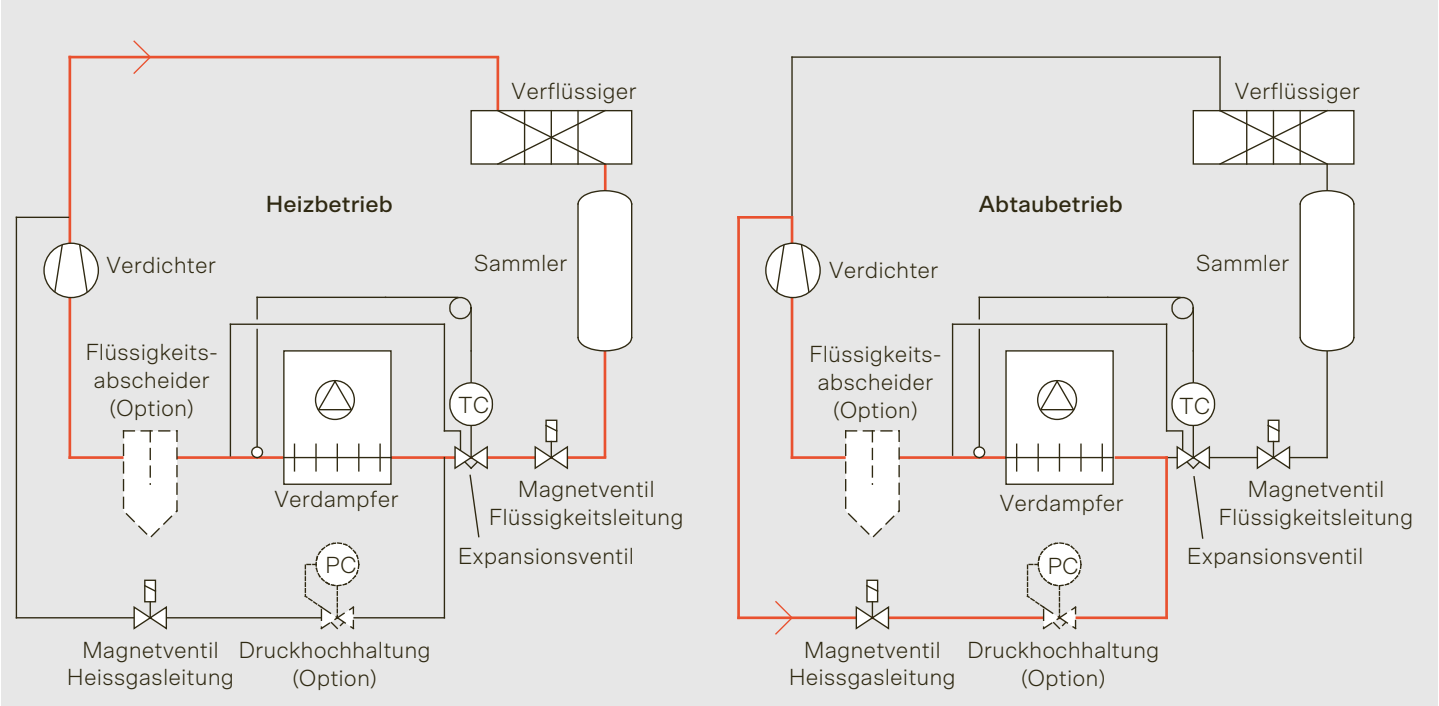


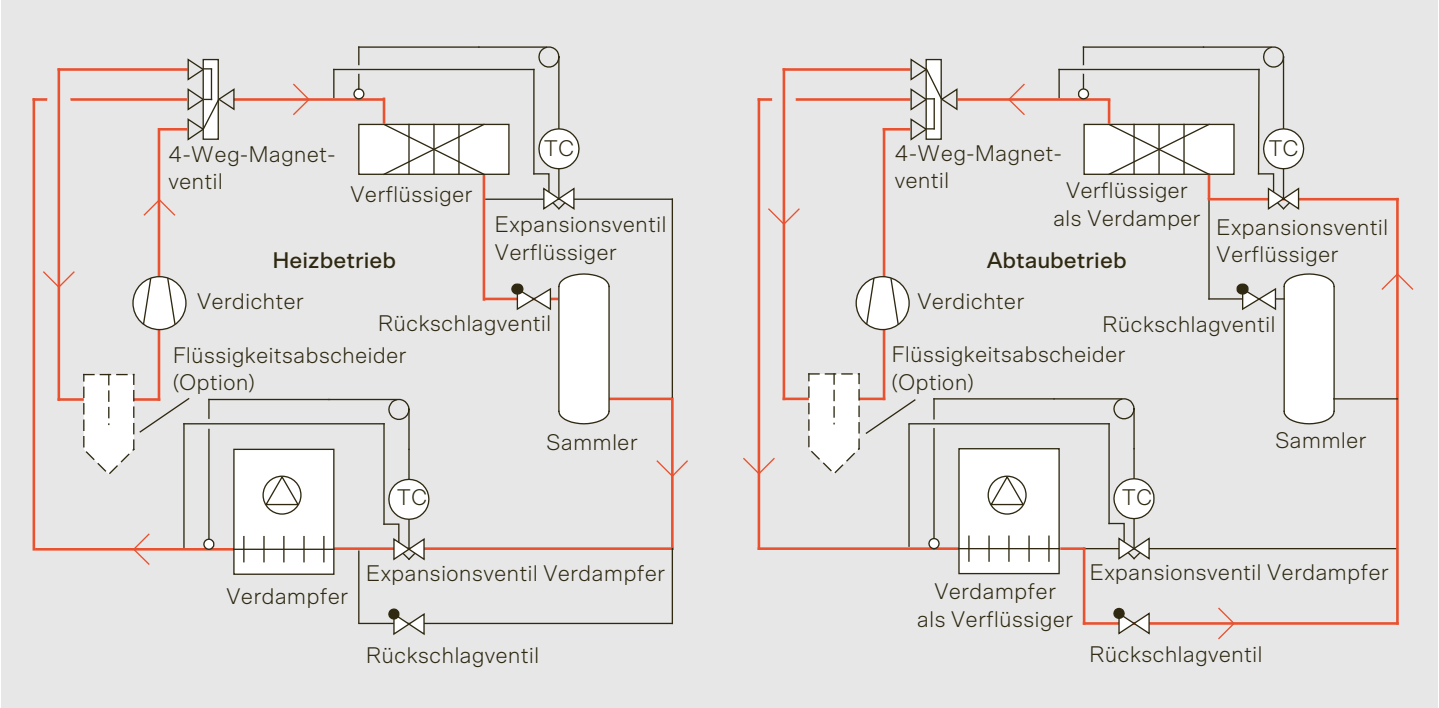
Bild 2.15: Prinzipschema Heissgas-Bypass-Abtauung.

mepumpe befindet sich im Freien und die Verdichter-Verflüssiger-Gruppe im Inneren des Gebäudes.

2.8 Alternative Prozesse

Neben dem Kaltdampf-Kreisprozess (Verdichtungskältesystem) gibt es noch weitere Prozesse, die als Wärmepumpen genutzt werden können, z. B. Absorptionsanlagen, thermoelektrische Kühlung (Peltier-Effekt), Stirling-Kreisprozess, Kaltdampfinjektions- und Kaltgasmaschinen.
Im kommerziellen Bereich der Wärmeerzeugung hat sich aber nur noch die Absorptionstechnik durchgesetzt. Die Heizzahl dieser Anlagen liegt unter jener der Verdichtungskältesysteme. Dieser Prozess kommt vor allem dort zur Anwendung, wo nutzbare Wärme (Abwärme usw.) möglichst kostenlos und stetig zur Verfügung steht.

Bild 2.16: Prinzipschema Prozessumkehr.



Kapitel 3

Kältemittel

3.1 Eigenschaften

Als Kältemittel wird das Arbeitsmittel einer Kaltdampfmaschine bezeichnet. Häufig wendet man diesen Begriff generell auf alle Kältemaschinen oder beliebige Prozesse der Kälteerzeugung an, wie Wärmepumpen. Jedes Kältemittel sollte nach Möglichkeit die folgenden Eigenschaften haben:

- gute thermodynamische Eigenschaften
- hohe volumetrische Kälteleistung (→ kleiner Verdichter. Typische Werte in Bild 3.1)
- für Anwendungsbereich geeignetes Druckniveau (→ kritische Temperatur genügend hoch und Erstarrungstemperatur ausreichend tief)
- niedrige Druckverluste bei der Strömung
- chemisch und thermisch stabil
- nicht toxisch
- nicht brennbar, nicht explosiv
- gute Mischbarkeit mit Schmiermitteln
- möglichst kleines Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP, idealerweise = 0)
- möglichst kleines Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP, idealerweise = 0)
- kostengünstig

Es wird zwischen sechs Kältemittel-Kategorien unterschieden:

- FCKW (vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe) sind stark ozonschichtabbauend und klimaaktiv.
- HFCKW (teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe) sind ozonschichtabbauend und klimaaktiv.
- HCFO (Hydro-Chlor-Fluor-Olefine, teilhalogenierte ungesättigte Kohlenwasserstoffe) sind unschädlich für die Ozonschicht und weisen niedrige GWP-Werte auf.
- FKW/HFKW (teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe) sind chlorfrei und damit unschädlich für die Ozonschicht, aber klimaaktiv.
- Natürliche Kältemittel sind weder ozonschichtabbauend noch klimaaktiv. Teilweise sind die Stoffe jedoch toxisch (Ammoniak), brennbar (Propan) oder erfordern hohe Betriebsdrücke (CO_2). Diesen Nachteilen kann konstruktiv begegnet werden (z. B. Einhausung der Wärmepumpe). Der Einsatz natürlicher Kältemittel ist aus ökologischen Überlegungen anzustreben.
- HFO (Hydro-Fluor-Olefine). Ungesättigte HFKW, das heisst solche mit mindestens einer Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen (C = C).

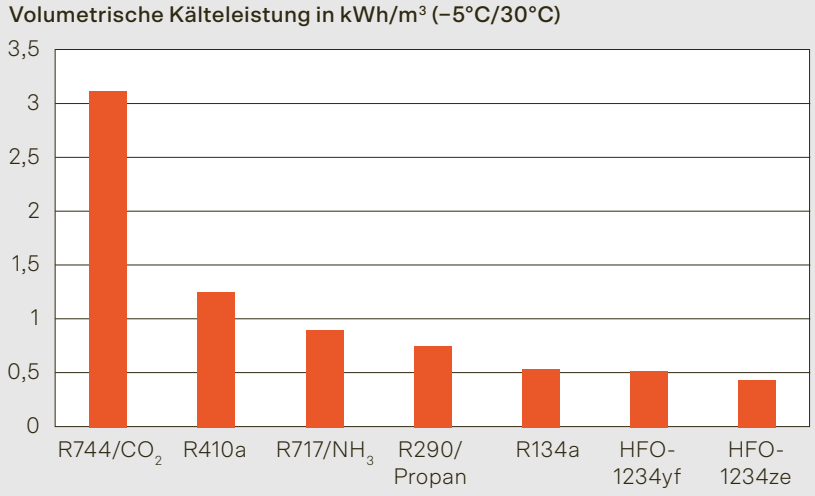
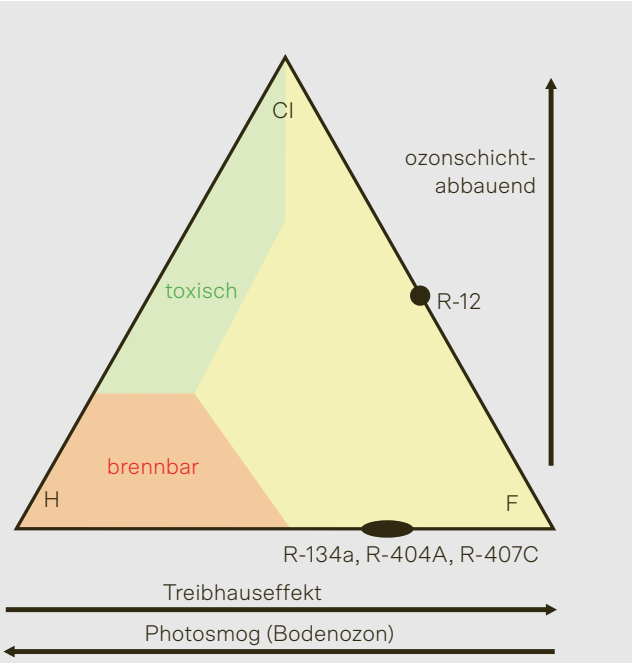


Bild 3.1: Volumetrische Kälteleistung einiger Kältemittel in kWh/m³.

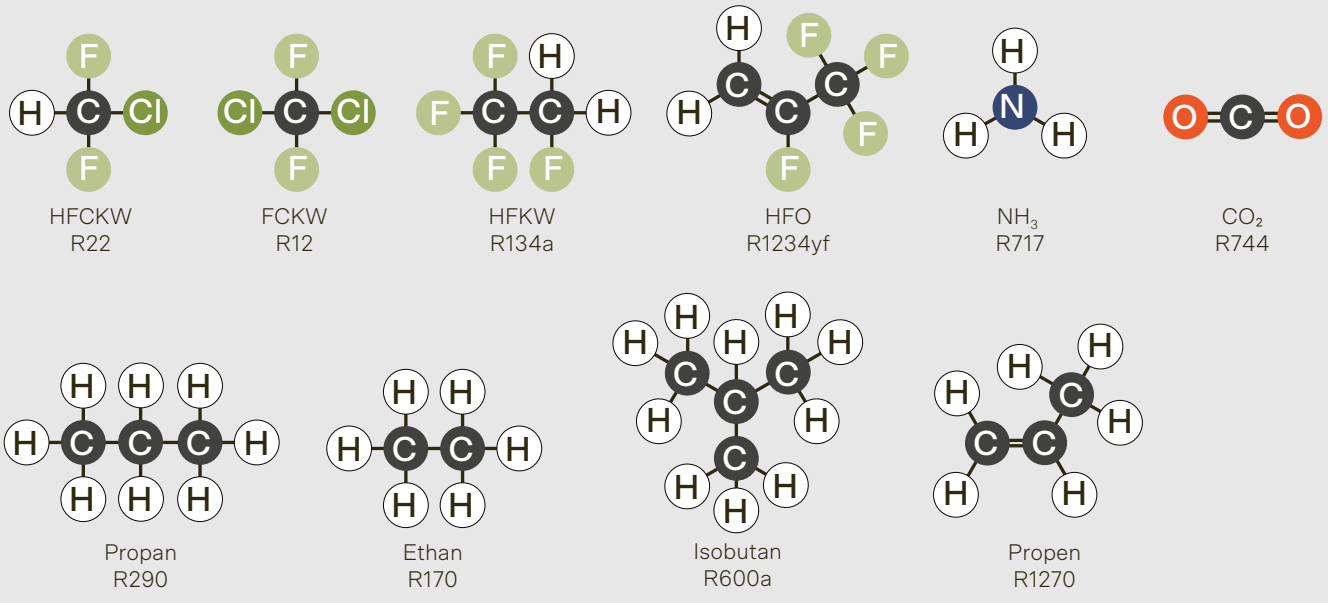
Bild 3.2: Eigenschaften synthetischer Kältemittel am Beispiel der Halogenderivate von Methan respektive Ethan.



Solche Stoffe gehören chemisch zu den sogenannten Olefinen, worunter alle nichtzyklischen Kohlenwasserstoffe zusammengefasst werden. HFO wurden als Alternative zu den stabilen klimaaktiven Substanzen entwickelt. Die Doppelbindung schafft im Molekül eine Art «Sollbruchstelle», von der aus es in der Atmosphäre vergleichsweise rasch zu anderen Stoffen ab- und umgebaut wird. Wegen des geringen Treibhauspotenzials werden HFO auch als Low-GWP-Kältemittel bezeichnet. Weitere Verbreitung dieser Kältemittelgruppe ist unter anderem wegen der fehlenden Langzeiterfahrung noch offen (siehe Kapitel 3.8 «PFAS und TFA»).

Die Eigenschaften von synthetischen Kältemitteln sind exemplarisch für die Derivate von Methan und Ethan in Bild 3.2 dargestellt. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die Kältemittel-Kategorien mit Angaben zu den Gefahrenklassen und Kennzahlen zur Umweltbeeinflussung. Bild 3.3 zeigt die chemischen Strukturen von einigen Kältemitteln.

Bild 3.3: Chemische Struktur von Kältemitteln. Die Eigenschaften synthetischer Kältemittel hängen insbesondere von den Chlor- (Cl) und Fluoratomen (F) sowie von den Doppelbindungen (C = C) ab. (Quelle: Andreas Genkinger, FHNW INEB)



3.2 Benennung der Kältemittel nach ASHRAE

Kältemittel werden nach dem System der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) bezeichnet. Die Bezeichnung besteht aus folgenden Elementen: R steht für Refrigerant, darauf folgen maximal drei Zahlen, die bei organischen Kältemitteln die Zusammensetzung mit der Anzahl Kohlenstoffdoppelbindungen, Wasserstoff-, und Fluoratomen beschreiben. Am Schluss folgt ein Buchstabe, der die Anordnung der Atome um die Kohlenstoffketten angibt (Bild 3.4). Chlor wird nicht, Brom und Iod werden explizit angegeben, beispielsweise in R-22B1.
Diese Bezeichnungsweise gilt nur für Reinstoffe. Gemischbezeichnungen fangen mit R4.. oder R5.. an. Die darauffolgenden Nummern sind, beziehungsweise werden laufend vergeben und liefern keinen Rückschluss auf die chemische Zusammensetzung.
Die Kältemittel der Gruppe 4 (R4...) sind zeotrope Gemische mit einem Temperatur-Gleit. Das heisst: Die Verdampfungs- und die Kondensationstemperatur hängen vom Anteil der Gemischkomponenten ab. Die Kältemittel der Gruppe 5 (R5...) haben keinen oder keinen merklichen Temperatur-Gleit (azeotrop), und verhalten sich daher wie Einstoff-Kältemittel.
Die anorganischen Kältemittel haben eine 7 als erste Kennziffer (R7...), die nachfolgenden Zahlen geben das Molekulargewicht in atomaren Masseneinheiten u an.
Beispiel Ammoniak: R717 (NH_3)
Atomgewichte: N = 14 u und H = 1 u
Summe (Molekulargewicht) = 14 u + 3 x 1 u = 17 u

Benennung organischer Kältemittel

R	Refrigerant = Kältemittel
a	Anzahl Doppelbindungen
b	Anzahl Kohlenstoffatome -1
c	Anzahl Wasserstoffatome +1
d	Anzahl Fluoratome
Appendix	Anordnung der Atome um den Kohlenstoffkern

Bild 3.4: Aufbau der Kältemittelbezeichnung nach ASHRAE.

3.3 Wahl des Kältemittels

Aus Sicherheits- und Umweltschutzgründen ist es prinzipiell wichtig, die Kältemittelmenge zu minimieren. Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Verwendung der verschiedenen Kältemittel sind in der SN EN 378 geregelt. ozonschichtabbauende Kältemittel (HFCKW und FCKW) sind in Wärmepumpen und Kälteanlagen von Gesetzes wegen nicht mehr zulässig. Wenn Leistung und Effizienz vergleichbar sind, dann sollte ein Kältemittel mit geringem Treibhauspotenzial (GWP) verwendet werden.
Die zulässige Verwendung von Kältemitteln ist im Anhang 2.10 der Chemikalien-Risikoreduktion-Verordnung (ChemRRV) geregelt. Mit deren Umsetzung soll der Einsatz von natürlichen Kältemitteln mit tiefem Treibhauspotenzial gefördert werden.
In wenigen Sonderfällen kann beim Bundesamt für Umwelt (Bafu) eine Ausnahmebewilligung beantragt werden. Ein Gesuchsformular für Ausnahmebewilligungen für Kälteanlagen sowie weiterführende Informationen sind unter www.bafu.admin.ch/chemikalien zu finden.

3.4 Natürliche Kältemitel

Beispiel Propan
Propan (R290) wird aufgrund seines niedrigen GWP und der hervorragenden thermodynamischen Eigenschaften zunehmend als Kältemittel in Wärmepumpen eingesetzt. R290 ist leicht entflammbar (Sicherheitsklasse A3 gemäss SN EN 378-1), sodass ordnungsgemässe Handhabung, Lagerung und Systemauslegung unerlässlich sind. Die

Kältemittel-Kategorie			Kältemittel (Beispiele)	ODP[1]	GWP[2]	Sicherheitsgruppe[3]	Vorgaben der ChemRRV zu Anlagen mit Kältemitteln
ozonschichtabbauende Kältemittel	FCKW	Einstoff-Kältemittel	R11 R12 R13 R13B1	1000 1000 1000 10 000	4750 10 900 14 400 7140	A1 A1 A1 A1	– Inverkehrbringen verboten – Nachfüllen verboten – Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg – Dichtigkeitskontrolle: Anlagen mit > 3 kg Füllmenge
		Gemische	R502	0,334	4657	A1	
	HFCKW	Einstoff-KM	R22	0,055	1810	A1	
		Gemische (Blends), überwiegend R-22-haltig	R401A (MP39) R402A (HP80) R402B (HP81) R408A (FX-10) R409A (FX-56)	0,037 0,021 0,033 0,021 0,048	1182 2788 2416 3152 1585	A1 A1 A1 A1 A1	
	HCFO	Einstoff-Kältemittel	R1233zd(E) R1233zd(Z) R1224yd(Z)	<0,0004 0,0004 0,00023	3,7 0,4 0,8	A1 A1 A1	– Inverkehrbringen verboten; Ausnahme: Nach dem Stand der Technik fehlt ein Ersatz und Massnahmen zum Vermeiden von Kältemittelemissionen wurden getroffen. – Nachfüllen zulässig – Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg – Dichtigkeitskontrolle: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg
In der Luft stabile Kältemittel	FKW/ HFKW	Einstoff-Kältemittel	R23 R32 R125 R134a R143a	0 0 0 0 0	14 800 675 3500 1430 4470	A1 A2L A1 A1 A2L	– Inverkehrbringen: eingeschränkt zulässig in Abhängigkeit von Kälteleistung, Treibhauspotenzial und Sekundärkreisläufen. Ausnahmebewilligung, wenn nach dem Stand der Technik die Sicherheitsanforderungen gemäss SN EN 378-1, -2 und -3 ohne in der Luft stabile Kältemittel nicht eingehalten werden können. – Nachfüllen von Anlagen ≥ 40 t CO_2-Äquivalent und GWP des Kältemittels ≥ 2500: nur regeneriertes Kältemittel. Ab 1. Januar 2030 Nachfüllen verboten. – Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg – Dichtigkeitskontrolle: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg oder > 5 t CO_2-Äquivalent
		Gemische (Blends)	R404A R407C R407F R410A R413A R417A R422A R422D R437A R507A R508A R508B	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	3922 1774 1825 2088 2053 2346 3143 2729 1805 3985 13 214 13 396	A1 A1 A1 A1 A2 A1 A1 A1 A1 A1 A1 A1	
		Gemische mit HFO (Blends)	R448A R449A R450A R452A R454C R455A R513A	0 0 0 0 0 0 0	1386 1396 601 2140 146 146 630	A1 A1 A1 A1 A2L A2L A1	

1 Ozonabbaupotenzial (ODP), Zahlenwerte für FCKW und HFCKW gemäss Annex A und C des Montrealer Protokolls, Zahlenwerte für HCFO, HFKW, HFO und natürliche Kältemittel gemäss WMO (2018) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018; ODP-Werte für Gemische: mit den jeweiligen Massenanteilen der Reinstoffe gewichtete Summe der ODP-Werte der Bestandteile.
2 Treibhauspotenzial (GWP) über einen Zeithorizont von 100 Jahren, Zahlenwerte für FCKW, HFCKW, FKW/HFKW und natürliche Kältemittel aus IPCC (2007), Zahlenwerte für HCFO aus WMO (2018), Zahlenwerte für HFO aus IPCC (2014); GWP-Werte für Gemische: gemäss den jeweiligen Massenanteilen der Reinstoffe gewichtete Summe der GWP-Werte der Bestandteile.
3 Sicherheitsgruppe gemäss SN EN 378-1:2017; für R-454C, R-455A und R-1336mzz(Z) aus Bitzer Kältemittel-Report 20 (S. 27 und 37).

Tabelle 3.1: Übersicht über die wichtigsten Kältemittel (Liste nicht abschliessend), Stand September 2020. Die zulässige Verwendung ist gemäss Anhang 2.10 der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) geregelt. (Quelle: Bafu)

Kältemittel-Kategorie			Kältemittel (Beispiele)	ODP[1]	GWP[2]	Sicherheitsgruppe[3]	Vorgaben der ChemRRV zu Anlagen mit Kältemitteln
Nicht ozonschichtabbauende und in der Luft nicht stabile Kältemittel	Natürliche Kältemittel	Einstoff-Kältemittel	R170 (Ethan)	–	6	A3	– Inverkehrbringen: zulässig – Nachfüllen: zulässig – Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg – Dichtigkeitskontrolle: keine Vorgaben
			R290 (Propan)	0	3	A3	
			R717 (NH_3)	–	0	B2L	
			R718 (H_2O)	–	0	A1	
			R744 (CO_2)	0	1	A1	
			R600 (Butan)	0	4	A3	
			R600a (Isobutan)	0	3	A3	
			R1270 (Propen)	0	2	A3	
		Gemische (Blends)	R290/R600a	0	3	A3	
			R290/R170	0	3	A3	
			R723 (DME/NH_3)	0	8	–[4]	
	HFO		R1234yf	0	<1	A2L	
			R1234ze	0	<1	A2L	
			R1336mzz(Z)	0	2	A1	

4 R-723 ist in der SN EN 378-1:2017 nicht erfasst, es kann jedoch mit einer Zusammensetzung aus 60 % Ammoniak und 40 % DME als toxisch und nicht unbrennbar angesehen werden; siehe Angaben des Herstellers

Fortsetzung Tabelle 3.1

Konstruktion der Wärmepumpe und die eingesetzten elektrischen Komponenten müssen den Sicherheitsanforderungen gemäss europäischer Richtlinie ATEX 114 entsprechen.
Es gelten strenge Vorgaben für die Installation, Sicherheitskennzeichnung, Zoneneinteilung für Bereiche mit brennbaren Gasen, sowie für die Wartung und Kältemittelentsorgung. Die Grenzwerte für die Füllmengen sind gemäss SN EN 378-1 je nach Aufstellungsort und Sicherheitsklasse reglementiert. Für dauerhaft geschlossen ausgeführte Wärmepumpen im Innenbereich beträgt die maximal zulässige Kältemittelfüllmenge 150 g pro Kältekreis. Höhere Füllmengen sind zulässig, es braucht dann aber den entsprechenden Nachweis und Massnahmen gemäss SN EN 378-1.
Aufgrund der Füllmengenbeschränkung werden in der Regel aussenaufgestellte Monoblock-Wärmpumpen angeboten. Wärmepumpen für den Innenbereich nutzen Gasleck-Sensoren und Notlüftungen, um austretendes Kältemittelgas zu detektieren und sicher nach aussen abzuführen.

Sicherheitskonzepte

R290 ist schwerer als Luft. Deshalb wird sich bei einer Leckage das austretende Gas am Boden sammeln. Aussenaufgestellte Wärmepumpen müssen in sicheren Abständen zu Gebäudeöffnungen wie Fenster, Türen und Lichtschächten installiert werden. Die Leitungsdurchführung ins Haus muss gasdicht sein. Die Abstandsvorgaben der Hersteller müssen streng befolgt werden. Ein Beispiel für die Aufstellung einer Propan-Wärmepumpe zeigt Bild 3.5. Das Einfrieren und die anderweitige Schädigung des Kondensators muss unter allen Umständen verhindert werden. Kritisch ist das Austreten des R290 Kältemittelgases in den Heiz-/Ladekreis.

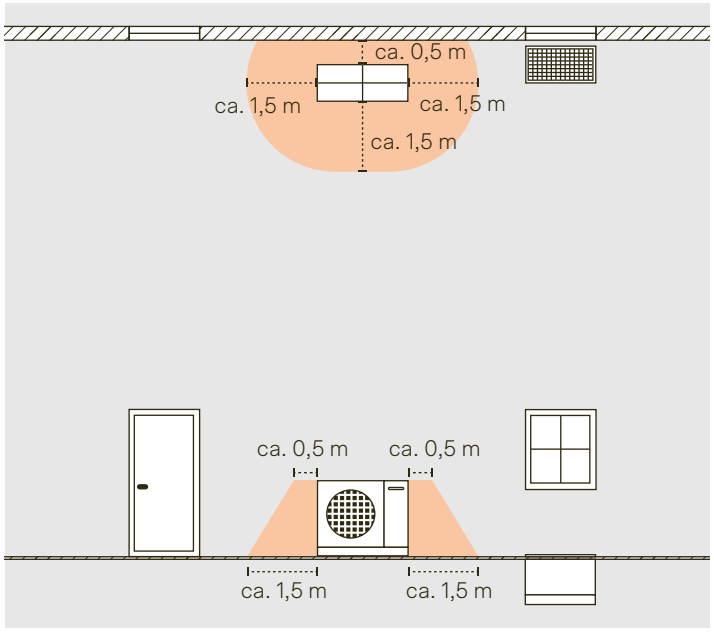


Bild 3.5: Vorgaben für die Aufstellung einer Wärmepumpe mit Propanfüllung.

Massnahmen zum Verhindern einer Leckage in den Heiz-/Ladekreis sind:
- Einsatz eines doppelwandigen Sicherheits-Wärmeübertragers als Kondensator.
- Einsatz von Frostschutzventilen in den Heiz-/Ladekreisleitungen, um das Wasser bei Frostgefahr abzulassen.
- Einsatz eines zusätzlichen Wasser/(Glykol)-Kreislaufs zwischen Wärmepumpe und Heiz-/Ladekreis, um Leckagen auf den Aussenbereich zu beschränken. Aus Effizienzgründen ist ein Wärmeübertrager mit geringer Grädigkeit zwingend (Empfehlung 1 bis 2 K).

Wird der Kondensator trotz dieser Massnahmen beschädigt, kann das Kältemittel bei kleinen Leckagen langsam in den Heiz-/Ladekreis gelangen. Ein Mikrogasentlüfter im Gerät respektive Aussenbereich, oder im Innenbereich mit einer Abgasleitung nach aussen führt das Kältemittelgas ab. Bei grösseren Leckagen muss das Kältemittel über ein Überdruckventil nach aussen weggeführt werden (Bild 3.6).
Zum Arbeiten an R290-Geräten werden Sicherheitsausrüstung, Gasleck-Suchgerät und Feuerlöscher für brennbare Gase benötigt. Fachpersonen hierfür müssen ausgebildet und zertifiziert sein. Sie benötigen die Fachbewilligung für den Umgang mit Kältemitteln und das EKAS-Zertifikat) sowie Kenntnisse zu Notfallmassnahmen.
Regelmässige Inspektionen mit Gasleck-Suchgeräten sind bei den Anlagen unerlässlich. Diese entfallen jedoch bei kleinen Anlagen mit Füllmengen < 150 g. Wartungsarbeiten, bei denen Zündquellen entstehen können, also das Hartlöten oder das Reparieren von elektrischen Komponenten, sollten mit äusserster Vorsicht durchgeführt oder nach Möglichkeit vermieden werden (siehe Kapitel 11.3 «Instandhaltung»).
Achtung: Die obigen Punkte gelten auch für Geräte mit R170 (Ethan), R600a (Isobutan), R1270 (Propen) und deren Gemische.

Beispiel Ammoniak
Ammoniak (R717) ist ein effizientes und klimafreundliches Kältemittel (GWP und ODP von 0). Wegen seiner Giftigkeit, Entflammbarkeit und korrosiven Eigenschaften (Sicherheitsklasse B2L) verlangt es aber besondere Vorsicht und Massnahmen.
Weil Ammoniak bereits in geringen Konzentrationen giftig ist, unterliegen Ammoniaksysteme strengen Vorschrif-

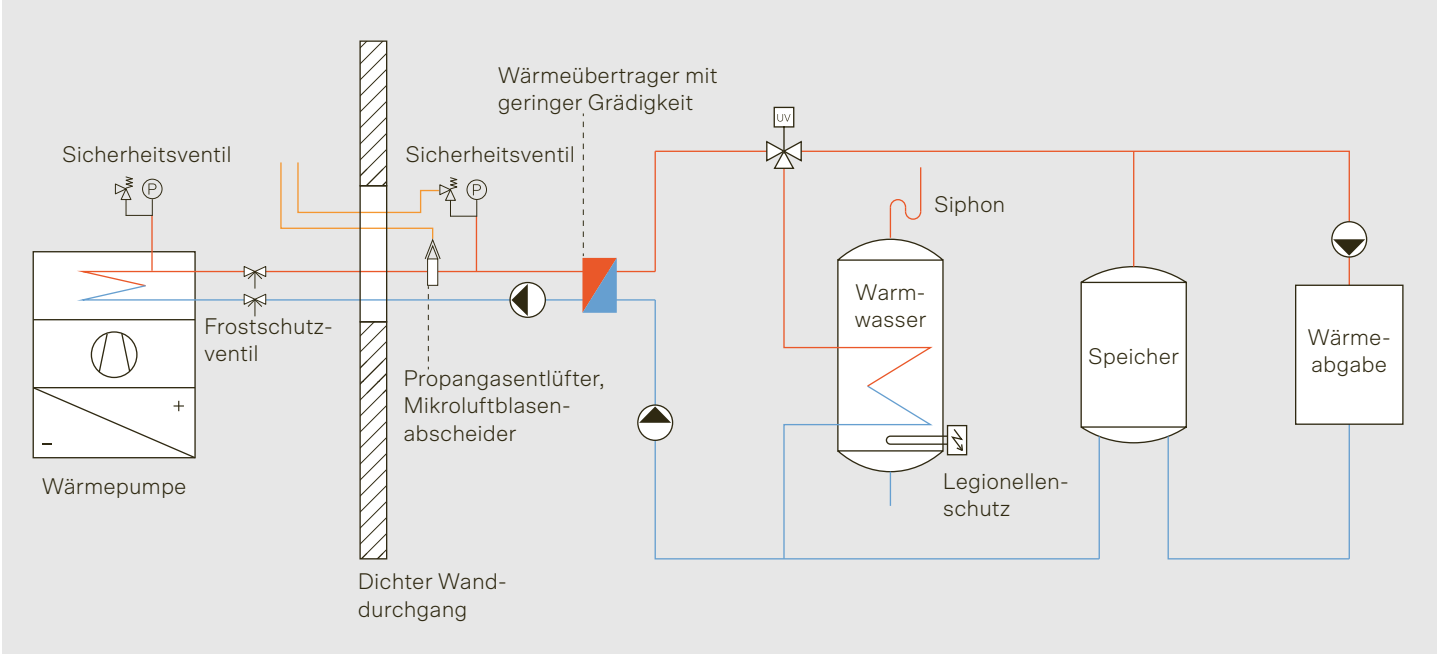


Bild 3.6: Sicherheitsmassnahmen bei Wärmepumpen mit Propan als Kältemittel.

ten gemäss SN EN 378. Das Einatmen hoher Konzentrationen kann schwerwiegende Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Dazu gehören Reizungen der Atemwege, Lungenschäden und Todesfolge in extremen Fällen. Ammoniak ist weniger gut brennbar als R290 (Propan), kann aber bei Konzentrationen von 16 bis 25 Volumenprozent in der Luft brennen. Es müssen Vorsichtsmassnahmen getroffen werden, um Zündquellen in Bereichen zu vermeiden, in denen sich Ammoniak ansammeln könnte. Das gilt besonders für geschlossene Räume. Elektrische Geräte darin müssen explosionsgeschützt sein. Ammoniak ist korrosiv, insbesondere gegenüber Kupfer und seinen Legierungen. Deshalb werden Komponenten wie Rohrleitungen, Ventile und Armaturen in der Regel aus Stahl, Edelstahl oder Aluminium gefertigt.
Üblicherweise wird Ammoniak für grosse gewerbliche und industrielle Wärmepumpen und Kälteanlagen verwendet, etwa für Kunsteisbahnen oder Fernwärmeanlagen. Bei ihnen ermöglicht die hohe spezifische Verdampfungsenthalpie von R717 kleine Aggregate.
Aufgrund der Toxizität und der Komplexität der Systeme wird Ammoniak in Wohngebäuden oder kleinen Anlagen hingegen kaum eingesetzt. Um das Risiko zu minimieren, werden Ammoniak-Anlagen oft im Freien oder in speziellen Maschinenräumen untergebracht, in denen mögliche Leckagen leicht gehandhabt werden können. In Innenräumen sind Gasleckanzeigen und Notlüftungssysteme vorgeschrieben, die austretendes Ammoniak schnell und sicher abführen. Notabschaltsysteme und automatische Sicherheitsventile sind in Ammoniak-Wärmepumpen besonders wichtig, um das Kältemittel im Falle eines Lecks oder eines Systemausfalls schnell zu isolieren. Insbesondere in industriellen Umgebungen müssen Notfallpläne für den Fall einer möglichen Freisetzung von Ammoniak vorhanden sein.

Bei der Lagerung und Handhabung von Ammoniak gelten strenge Sicherheitsprotokolle. Es sind spezielle Behälter, eine ordnungsgemässe Kennzeichnung und sichere Lagerorte erforderlich.
Für Fachpersonen, die mit Ammoniak-Systemen arbeiten, ist die Ausbildung zum Erhalt der «Fachbewilligung für den Umgang mit Kältemitteln» erforderlich, also die SVK-Kurse «Kältetechnik 1, Grundlagen» sowie «Umwelt & Ökologie». Der sichere Umgang bei Anlagen mit Ammoniak erfordert Kenntnisse über:
- Korrekte Wartung und Inspektion auf Leck, Korrosion und Druckanomalien
- Systemauslegung und Installationsverfahren
- Wartungsverfahren zur Vermeidung von Unfällen
- Zertifizierungs- und Schulungsprogramme

Ebenso müssen persönliche Schutzausrüstungen (PSA) für Arbeiter und Servicepersonal vor Ort zur Verfügung stehen.

Beispiel Kohlendioxid
Kohlendioxid (CO_2, R744) wird aufgrund seines niedrigen Treibhauspotenzials (GWP von 1) und dessen Umweltfreundlichkeit (ODP von 0) in Zukunft vermehrt eingesetzt. Bei der Planung, Installation und dem Betrieb von CO_2-Wärmepumpen müssen jedoch besondere Überlegungen aufgrund der thermodynamischen und betrieblichen Eigenschaften von CO_2 angestellt werden.
Kohlendioxid-Anlagen arbeiten bei wesentlich höheren Drücken als Anlagen mit herkömmlichen Kältemitteln. Je nach Anwendung und Betriebsbedingungen des Systems liegen die Drücke typischerweise zwischen 30 und 130 bar. Komponenten wie Verdichter, Wärmeübertrager und Rohrleitungen müssen für diese hohen Drücke ausgelegt sein, um Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Transkritischer Betrieb, Thermodynamischer Wirkungsgrad und COP: CO_2 hat gemäss Bild 3.1 eine relativ hohe volumetrische Kälte-/Wärmeleistung, was bedeutet, dass grosse Wärmemengen pro Volumeneinheit übertragen und dadurch kompakte Einheiten realisiert werden können. Im Gegensatz zu vielen anderen Kältemitteln wird CO_2 bei Heizanwendungen häufig im transkritischen Bereich betrieben, insbesondere wenn erhöhte Abgabetemperaturen erforderlich sind. Im transkritischen Kreislauf wird das Gas nicht vollständig kondensiert, sondern durchläuft einen Gaskühler anstelle eines Kondensators. Dies erfordert ein spezielles Systemdesign, um die Wärmeübertragung zu optimieren und die Effizienz im transkritischen Zustand zu erhalten.
CO_2-Wärmepumpen eignen sich gut für gewerbliche und industrielle Anwendungen, die eine Hochtemperatur-Wassererwärmung oder -Raumheizung erfordern, wie Krankenhäuser, Hotels, Lebensmittelverarbeitung und Fernwärme. Für Privathaushalte werden sie insbesondere für die Warmwasserbereitung eingesetzt.
CO_2-Wärmepumpen erfordern spezielle Komponenten, darunter Kompressoren, Gaskühler und Wärmeübertrager, die für den Hochdruck- und transkritischen Betrieb ausgelegt sind. Der COP von CO_2-Wärmepumpen ist bei niedrigen Abgabetemperaturen vergleichsweise gut, bei höheren Temperaturen sinkt die Effizienz jedoch aufgrund des transkritischen Verhaltens. Deshalb werden oft mehrstufige Verdichtungen und sogenannte Ejektoren eingesetzt, um den Prozesswirkungsgrad zu erhöhen. Die Optimierung eines CO_2-Systems erfordert eine präzise Steuerung der Druck- und Temperaturniveaus, um die Effizienz unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu erhalten.

Installations- und Wartungsanforderungen: Die Installationsfachleute müssen im Umgang mit Hochdrucksystemen geschult sein und benötigen unter Umständen spezielle Werkzeuge und Techniken für Wartung und Reparaturen. Die regelmässige Wartung ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass Druck- und Temperaturregelungen innerhalb der Auslegungsgrenzen bleiben und um Effizienzverluste oder Komponentenverschleiss zu vermeiden.

Kostenüberlegungen: Die Anschaffungskosten für CO_2-Wärmepumpen sind in der Regel höher als für herkömmliche Kältemittelsysteme, da sie hochdruckfeste Komponenten und spezielle Konstruktionen erfordern. Langfristig können aber Einsparungen durch niedrigere Betriebskosten erzielt werden, vor allem, wenn das System mit kombinierter Lieferung von Kälte und Hochtemperaturwärme betrieben werden kann. Hier sind CO_2-Wärmepumpen besonders effizient.

3.5 Maximale Kältemittelfüllmenge nach SN EN 378-1

Wenn das Kältemittel für eine Anwendung nach der ChemRRV eingesetzt werden darf, so muss die maximale Füllmenge gemäss SN EN 378-1 bestimmt werden. Bezüglich des Personenschutzes für den jeweiligen Zugangsbereich und des Aufstellungsorts der Wärmepumpe gelten Einschränkungen. Es werden folgende Kategorien unterschieden:

a Allgemeiner Zugangsbereich (Spitäler, Schulen, Hotels usw.)
b Überwachter Zugangsbereich (Geschäftsräume, Labore, Büros usw.)
c Zugangsbereich für befugte Personen (Produktionshallen usw.)

Die Aufstellungsorte sind folgendermassen klassifiziert:

– Klasse I: mechanische Geräte im Personenaufenthaltsbereich (Wärmepumpe respektive kältemittelführende Teile)

- Klasse II: Verdichter im Maschinenraum oder im Freien (Rohrleitungen im Personenaufenthaltsbereich)
- Klasse III: Maschinenraum oder im Freien (alle kältemittelführenden Teile im Maschinenraum oder im Freien)
- Klasse IV: belüftetes Gehäuse (alle kältemittelführenden Teile in belüftetem Gehäuse)

Bei der Bestimmung respektive Berechnung der Kältemittelfüllmengenbegrenzung werden die Toxizität und Brennbarkeit gemäss den Auswahltabellen SN EN 378-1 berücksichtigt.
Die elektronische Planungshilfe des Schweizerischen Verbands für Kältetechnik SVK vereinfacht die Umsetzung der Norm: https://bit.ly/SVK_378.

3.6 Treibhauseffekt und TEWI-Kennwert

TEWI (Total Equivalent Warming Impact, Totaler äquivalenter Erwärmungsbeitrag) ist ein Verfahren zur Abschätzung des Beitrags an die globale Erwärmung. Dabei werden sowohl der direkte Beitrag der Kältemittelemissionen in die Atmosphäre als auch des indirekten Beitrag durch die Betriebsenergie erfasst.

Bei einer gegebenen Anlage umfasst der TEWI:
- die direkte Auswirkung auf den Treibhauseffekt durch Kältemittelverlust unter bestimmten Bedingungen;
- die indirekte Auswirkung auf den Treibhauseffekt durch das CO_2, das bei der Erzeugung der zum Betrieb der Anlage erforderlichen Energie während ihrer Lebensdauer freigesetzt wird.

Das Wichtigste zum TEWI-Kennwert:
- Die Anwendung des TEWI ist sehr wirkungsvoll zur Beurteilung des Treibhauseffektes.
- Der TEWI-Faktor kann mit der Formel im im Kasten «Berechnungsverfahren für TEWI» errechnet werden.
- Der energetische Nutzungsgrad hat einen grossen Einfluss auf den TEWI (indem die Energieaufnahme verringert wird).
- Der TEWI kann stark reduziert werden, wenn die Wärmepumpe mit Strom betrieben wird, der vollständig aus erneuerbaren Energiequellen stammt.
- Der TEWI hat einen Einfluss auf die Betriebskosten.

Berechnungsverfahren für TEWI

TEWI = Total Equivalent Warming Impact

$$TEWI = (GWP \cdot L \cdot n) + (GWP \cdot m \cdot [1 - \alpha_{Rückgewinnung}]) + (n \cdot E_{Jahr} \cdot \beta)$$

Dabei ist

$GWP \cdot L \cdot n$	der Anteil der Verluste durch Leckage
$(GWP \cdot m\ [1 - \alpha_{Rückgewinnung}])$	der Anteil der Verluste bei Rückgewinnung
$(n \cdot E_{Jahr} \cdot \beta)$	der Anteil der Verluste aus der Energieaufnahme

Dabei ist

TEWI	der gesamte, äquivalente Erwärmungsbeitrag in kg CO_2
GWP	das Treibhauspotenzial, bezogen auf CO_2
L	die Leckrate in kg pro Jahr
n	die Betriebszeit der Anlage in Jahren
m	die Kältemittelfüllmenge in kg
$\alpha_{Rückgewinnung}$	der Faktor für Rückgewinnung respektive Recycling (0 bis 1)
E_{Jahr}	die Energieaufnahme in kWh pro Jahr
β	die CO_2-Emission in kg pro kWh

Wirkungsvolle Massnahmen zur TEWI-Reduktion:
- Natürliche Kältemittel oder Kältemittel mit kleinem GWP verwenden.
- Konstruktion beziehungsweise Auswahl der optimalen Kälteanlage und Kältemittel
- Optimierung der Anlage für maximale COP-/EER-Werte respektive Nutzungsgrade
- Sachgerechte Instandhaltung, ohne Kältemittelleckagen
- Rückgewinnung beziehungsweise Recycling von gebrauchten Kältemitteln

3.7 Life Cycle Climate Performance (LCCP)

Die Life Cycle Climate Performance (LCCP) ist eine noch umfassendere Kennzahl zur Bewertung der gesamten Umweltauswirkungen einer Wärmepumpe oder Kälteanlage während des gesamten Lebenszyklus. Dabei werden die direkten Emissionen von Kältemitteln berücksichtigt, wie auch die indirekten Emissionen aus Energieverbrauch, Produktion, Transport und Entsorgung (Bild 3.7). GWP und TEWI sind Teilkennzahlen der Methode.

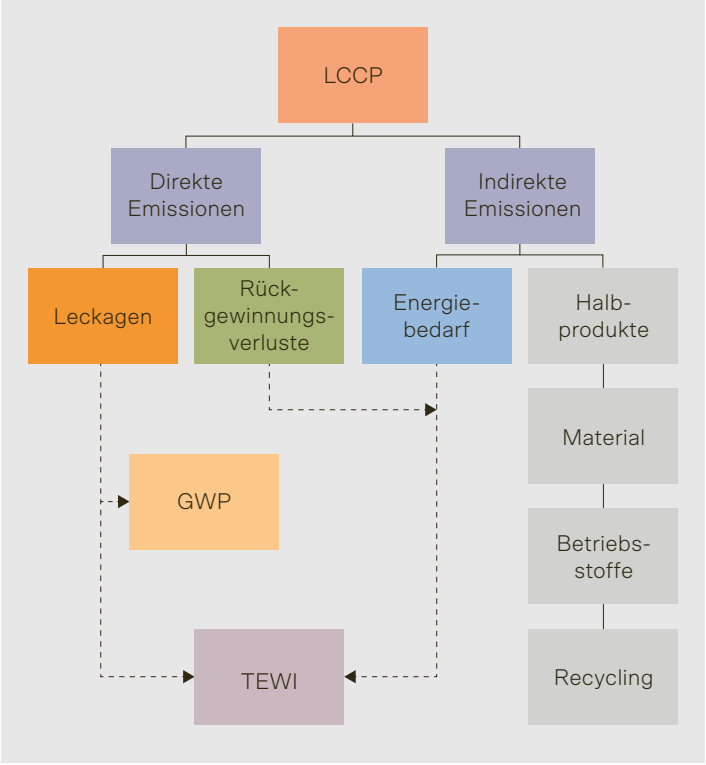


Bild 3.7: Aspekte, die bei der Bestimmung der Life Cycle Climate Performance berücksichtigt werden. (Quelle: SVK)

LCCP = Direkte Emissionen + Indirekte Emissionen + Emissionen aus Herstellung und Entsorgung in kg CO_2eq

Direkte Emissionen treten auf durch Leckagen während der gesamten Lebensdauer der Wärmepumpe, bei der Wartung und Ausserbetriebnahme. Kältemittel mit niedrigerem GWP wie R32, R290 oder CO_2 werden zunehmend bevorzugt, um die Auswirkungen von Leckagen zu verringern.
Indirekte Emissionen beinhalten den Energieverbrauch während des Betriebs von Wärmepumpen, basierend auf der Kohlenstoffintensität der Stromversorgung. Hohe Energieeffizienzwerte (COP, SCOP, JAZ) sind entscheidend für die Minimierung der energiebezogenen Emissionen. Weiter zu beachten sind die Belastungen infolge
- der Herstellung der Komponenten und des Kältemittels,
- der Transporte der Wärmepumpe vom Werk zum Endverbraucher,
- der gesamten Lieferkette, der Entsorgung und des Recyclings.

Langlebige Produkte verbessern die LCCP, und die regelmässige Wartung hilft, die Effizienz zu gewährleisten. Wärmepumpen, die mit erneuerbaren Energien (Wind, Sonne) betrieben werden oder in Regionen mit einer kohlenstoffarmen Stromversorgung installiert sind, haben wesentlich geringere indirekte Emissionen als solche, die mit aus fossilen Brennstoffen erzeugtem Strom betrieben werden. Die LCCP hängt auch von den Klima- und Lastbedingungen ab. In kalten Klimazonen ist der elektrische Energieverbrauch der Wärmepumpen höher.
Über- oder unterdimensionierte Systeme führen zu einem ineffizienten Betrieb, was im Laufe der Zeit zu höheren indirekten Emissionen führt. Die korrekte Dimensionierung des Systems für die

Heiz-/Kühllast des Gebäudes ist für eine optimierte LCCP daher unerlässlich.

3.8 Weitere Umweltauswirkungen: PFAS und TFA

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS), zu denen auch Trifluoressigsäure (TFA) gehört, entwickeln sich zu einem bedeutenden Umwelt- und Gesundheitsproblem im Zusammenhang mit Kältemitteln. Zu PFAS gehört eine Gruppe von synthetischen Chemikalien, die für ihre Stabilität, Hitzebeständigkeit und wasserabweisenden Eigenschaften bekannt sind. Aufgrund dieser Eigenschaften sind sie in sehr vielen Produkten des Alltags verbreitet. Sie können auch entstehen, wenn bestimmte Kältemittel, wie Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) und Fluorolefine (HFO), sich nach der Freisetzung in die Umwelt aufspalten.
PFAS werden oft als «Ewigkeitschemikalien» bezeichnet, da sie sich im Laufe der Zeit nicht natürlich abbauen. Sie werden mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit in Verbindung gebracht. Diese Chemikalien sind bioakkumulativ, das heisst, sie reichern sich im Laufe der Zeit in lebenden Organismen an, was zu langfristigen Gesundheitsrisiken führt. Regierungen und Umweltbehörden, insbesondere die US-amerikanische Environmental Protection Agency (EPA) und die Europäische Union, schränken PFAS deshalb zunehmend ein und legen Grenzwerte für ihre Konzentrationen in der Luft, im Wasser und in Verbraucherprodukten fest.
TFA (Trifluoressigsäure) ist eine kurzkettige perfluorierte Karbonsäure, die als Abbauprodukt bestimmter HFC und HFO wie R1234yf, R134a und R125 entsteht. TFA bildet sich in der Atmosphäre, wenn diese Kältemittel abgebaut werden, insbesondere durch die Wechselwirkung mit UV-Strahlung und atmosphärischen Prozessen. TFA ist gut wasserlöslich und kann sich in oberirdischen sowie unterirdischen Gewässern, Ozeanen und Böden anreichern. Ihre Langlebigkeit bedeutet, dass sie sich in aquatischen Systemen bioakkumulieren können. Im Gegensatz zu den längerkettigen PFAS-Chemikalien reichert sich die kurzkettige TFA im Körper nicht in demselben Ausmass an. TFA ist aber aufgrund ihres Potenzials, Trinkwasser und Ökosysteme zu verunreinigen, ein Problem für die Umwelt.
Durch die Wahl von natürlichen Kältemitteln lässt sich die spätere Bildung von PFAS von vornherein verhindern. In dieser Hinsicht empfiehlt es sich insbesondere HFC/HFO durch nicht fluorierte Kältemittel wie Ammoniak, CO_2 oder Propan zu ersetzen.

3.9 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Entwicklungen

Gemäss den von ihr ratifizierten internationalen Verträgen hat sich die Schweiz dazu verpflichtet, den Verbrauch von teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) bis zum Jahr 2036 auf 15 % des Ausgangswertes (durchschnittlicher Verbrauch in den Jahren 2011 bis 2013) zu reduzieren. Relevant sind hier insbesondere das ins Bundesrecht übernommene Montrealer Protokoll (SR 0.814.021) und dessen 5. Änderung («Kigali-Amendment», SR 0.814.021.5).
Solche teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe haben eine starke Treibhauswirkung und machen den grössten Teil der in der Luft stabilen Kältemittel aus. In Europa wird der Einsatz von Kältemitteln mit hohem GWP durch die sogenannte F-Gas-Verordnung vom 7. Februar 2024 geregelt (Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über fluorierte Treibhausgase). Die F-Gas-Verordnung ist in der Schweiz jedoch nicht gültig, hier gilt die daran angelehnte Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV). Mit der am 1. Januar 2025 in Kraft getretenen Revision der ChemRRV wurde somit si-

chergestellt, dass in der Schweiz und in der EU bezüglich in der Luft stabilen Kältemitteln vergleichbare Regelungen gelten.
Auch die Regelungen für das Inverkehrbringen von Anlagen mit synthetischen Kältemitteln werden im geltenden internationalen Recht um spezifische Verbote ergänzt. Somit werden darüberhinausgehende Regelungen in der EU sukzessive bis 2035 in Kraft treten. Dementsprechend sind weitere Verschärfungen in Anhang 2.10 ChemRRV bereits geplant, um die vorgesehenen Absenkungsschritte beim HFKW-Verbrauch (2027, 2029, 2030, 2032, 2033, 3035) einzuhalten und den aktuellen Stand der Technik abzubilden. Die Verordnungsänderung, die per 1.1.2025 in Kraft getreten ist, bildet die Regelungen ab, die auch in der EU auf dieses Datum Gültigkeit haben.
Für Anlagen ab 3 kg Kältemittel-Füllmenge muss ein Wartungsheft geführt werden. Darin werden alle Eingriffe und Wartungen, wie das Nachfüllen von Kältemittel, durch die ausführende Fachperson vermerkt. Werden ozonschichtabbauende oder in der Luft stabile Kältemittel verwendet, muss die Anlage zusätzlich bei den zuständigen Behörden angemeldet und regelmässig auf Dichtigkeit hin geprüft werden. Dies gilt für alle Anlagen ab 3 kg Füllmenge, sowie für Anlagen, die mehr als 5 Tonnen CO_2-Äquivalente von in der Luft stabilen Kältemittel enthalten. Die Dichtheitskontrollpflicht bei HFO-Anlagen wurde ebenfalls angepasst.

Mit der Anmeldung erhält die Anlage eine am Gerät anzubringende Vignette, anhand derer sie identifiziert werden kann. Als Anlaufstelle für weitere Informationen und Vorlagen für ein Wartungsheft sei hier auf die Webseite des Bafu «Meldung von Anlagen mit Kältemitteln» (https://bit.ly/M_BAFU) oder auf die beauftragte Meldestelle verwiesen.
Ozonschichtabbauende Kältemittel sind in der Schweiz seit einigen Jahren komplett verboten, auch zum Nachfüllen bei

Wann ist eine Wärmepumpe in der Schweiz «in Verkehr gebracht»?
Inverkehrbringen heisst «für Dritte bereitstellen» oder «an Dritte abgeben»; dazu gehört auch die Einfuhr zu beruflichen oder gewerblichen Zwecken (ChemRRV Art. 4 Absatz 1 Buchstabe i). Konkret heisst das, dass auch das Abgeben einer Wärmepumpe an einen Endkunden als Inverkehrbringen gilt. Wärmepumpen, die von Inverkehrbringungsverboten betroffen sind, dürfen also nach dem relevanten Stichdatum des Verbotes für die Inverkehrbringung nicht mehr an Endkunden ausgeliefert werden. Die Definition des Begriffs «Inverkehrbringen» kann im Chemikalienrecht (ChemRRV) und dem Energierecht (beispielsweise der EnEV) unterschiedlich sein. Für Kältemittel ist die ChemRRV massgebend.
Konkret bedeutet dies, dass Mono-Split-Anlagen mit < 3 kg Kältemittel und GWP ≥ 750 seit 1.1.2025 nicht mehr verkauft werden dürfen.

Verbot ab 1.1.2027	Heizleistungen			Kältemittel/GWP
Bauart	**<12 kW**	**>12 kW bis 50 kW**	**>50 kW bis 250 kW**	
Mono-Split-L/W	Nicht zulässig mit weniger als 3 kg Kältemittel			HFKW R134a, R407c, R410a >750 und < 2100
Split-L/W	Nicht zulässig	Zulässig bis 1.1.2029		
Monoblock	Nicht zulässig		Zulässig bis 1.1.2030	
Split-L/W	Nicht zulässig	Zulässig bis voraussichtlich 1.1.2033		HFKW/HFO R32, R452b, R454b >150 und < 750
Monoblock	Nicht zulässig		Zulässig bis 1.1.2030	
Split-L/W	Zulässig bis voraussichtlich 1.1.2035	Zulässig (kein Verbotsdatum bekannt)		HFO R454c <150
Monoblock	Zulässig bis voraussichtlich 1.1.2032	Zulässig (kein Verbotsdatum bekannt)		

Bild 3.8: Einschränkungen für Wärmepumpen mit in der Luft stabilen Kältemitteln. (Quelle: Grafische Zusammenfassung der Einschränkungen für Wärmepumpen gemäss ChemRRV, Stand 31.12.2025)

Leckagen an bestehenden Anlagen. Der Betrieb einer dichten Anlage ist jedoch nicht verboten. Die Verwendung von in der Luft stabilen Kältemitteln ist zudem nur noch eingeschränkt möglich. Wärmepumpen für den Komfortbereich mit dem ehemals stark verbreiteten R134a (ein HFKW) und einer Verdampferleistung über 600 kW dürfen beispielsweise nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Ab 2027 wird die maximale Leistung herabgesetzt.
Eine grafische Zusammenfassung der Regelungen zum Inverkehrbringen und Nachfüllen stationärer Anlagen mit Kältemitteln kann auf der Webseite «Kältemittel» des Bafu heruntergeladen werden (https://bit.ly/KM_BAFU).
In den letzten Jahren wird deshalb auf Stoffe mit einem geringen GWP umgestellt. Ausgehend von Automobilklimaanlagen wurden verschiedene Alternativen genauer untersucht, woraus das HFO-Kältemittel R1234yf und daraus abgeleitete Gemische entstanden sind. Die geringere Stabilität von R1234yf führte aber zu kontroversen Ansichten bezüglich der Verwendbarkeit, auch fehlen noch Langzeiterfahrungen zu diesen Stoffen. Eine Liste der wichtigsten Kältemittel, die bei Wärmepumpen zum Einsatz kommen, ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.
Der Markt für Wärmepumpen basiert heute grösstenteils auf Serienprodukten, die im Ausland für den ganzen europäischen Raum produziert, in die Schweiz importiert und in Standardkonfigurationen an Endkunden abgegeben werden. Die Anpassung des regulatorischen Rahmens hat in diesem Zusammenhang einen Trend zu natürlichen Kältemitteln bei den Herstellern von Wärmepumpen ausgelöst. Während für

Beispiele zum Inverkehrbringungsverbot

1. Hersteller A aus Europa liefert seiner Generalvertretung in der Schweiz am 20.12.yyyy in der Schweiz Ware an. Diese Ware steht nun den Installateuren nach Eintritt des Verbots zur Verfügung. Diese Ware ist mit dem Import in die Schweiz ein erstes Mal in Verkehr gebracht. Die Abgabe (physische Übergabe) an den Installateur gilt jedoch erneut als Inverkehrbringen und fällt unter die Regelungen beim Zeitpunkt der Abgabe, also in diesem Beispiel unter das Verbot.
2. Die Installateurin X nimmt am 20.12.yyyy zur Sicherheit noch 10 Wärmepumpen mit R410A an Lager, damit sie diese nach dem Verbot noch installieren kann. Sie hat mündliche Zusagen von Endkunden, dass sie diese Geräte in den nächsten 6 Monaten abrufen wollen. Dies ist jedoch nicht zulässig, da die Geräte erst nach Eintritt des Verbotes an die Kundschaft übergeben werden (Inverkehrbringen).
3. Der Endkunde lässt am 31.12.yyyy eine Wärmepumpe liefern und verrechnen, damit er diese nach dem Verbot im Herbst des darauffolgenden Jahres noch installieren kann. Dies ist zulässig. Durch die Abgabe an den Endkunden gilt die Anlage als in Verkehr gebracht – sogar, wenn die Rechnung noch nicht gestellt wäre.
4. Die Herstellerin B baut in der Schweiz eine Anlage auf Mass für einen Kunden in der Schweiz. Die Anlage ist zwar bezahlt, aber leider kann sie nicht bis zum 31.12.yyyy ausgeliefert werden, da noch Komponenten fehlen. Die Herstellerin könnte dem Endkunden das Produkt erst drei Monate nach Eintreten des Verbotes liefern und installieren. Dies ist jedoch nicht zulässig, da die Anlage erst bei der physischen Übergabe nach Eintreten des Verbots in Verkehr gebracht wird.
Quelle: Gebäudeklima Schweiz, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz)

Ein- und Zweifamilienhäuser bereits ein breites Portfolio aussenaufgestellter Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln am Markt vorhanden ist, entwickelt die Branche noch sichere und effiziente Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln für weitere Anwendungsbereiche, beispielsweise für die Innenaufstellung.
Mono-Split-Geräte mit < 3 kg Kältemittelinhalt und GWP ≥ 750 dürfen mit der am 1. Januar 2025 in Kraft getretenen Revision der ChemRRV wie in der EU nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Dies wird damit begründet, dass für diese Anwendungsbereiche bereits Alternativgeräte mit natürlichen Kältemitteln auf dem Markt zur Verfügung stehen. Zurzeit dürfen Geräte mit mehr als 600 kW Kälteleistung in der Schweiz nur noch mit in der Luft nicht stabilen Kältemitteln in Verkehr gebracht werden. Gemäss der weiteren und noch laufenden Vernehmlassung der ChemRRV soll diese Regelung ab dem 1. Januar 2027 auf tiefere Kälteleistungen, beispielsweise 200 kW, herabgesetzt werden; der genaue Wert war bei der Drucklegung dieses Buchs noch nicht bekannt. Die Anwendungsbereiche mit Kälteleistungen bis beispielsweise 200 kW sollen in diesem Zusammenhang analog der F-Gas-Verordnung geregelt werden und können von längeren Übergangsfristen profitieren. Zudem können die Behörden Ausnahmebewilligungen erteilen, wenn nach dem Stand der Technik ohne die Anwendung eines in der Luft stabilen Kältemittels die Normen: SN EN 378-1, -2 und -3 sowie IEC 603356-2-89 und IEC 60335-2-40, jeweils in der aktuell geltenden Fassung, nicht eingehalten werden können. Auch dies soll sich ab 2027 ändern: Statt Bewilligungen soll es direkt anwendbare Ausnahmen geben.
Diese rechtlichen Anpassungen sind nötig, um den vorgegebenen Absenkpfad der in der Luft stabilen Kältemittel zu erreichen. Die Industrie, die Fachverbände, die Planer und Installateure wissen um die Herausforderungen, die natürliche Kältemittel mit sich bringen. Es gilt nun, in Zusammenarbeit mit dem Bafu die Priorität der Umstellung von fossilen zu erneuerbaren Energien weiter engagiert zu verfolgen. Jede zusätzliche Wärmepumpe, die eine fossil betriebene Heizung ersetzt, ist nämlich unabhängig davon, mit welchem Kältemittel sie betrieben wird, ein klarer Mehrwert für den Klimaschutz. So wird angenommen, dass in einem typischen Einfamilienhaus eine Wärmepumpe gegenüber einem mit Erdgas befeuerten Heizkessel durchschnittlich 4 t CO_2 im Jahr einspart.

3.10 Weitere Informationen

- Bundesamt für Umwelt: Webseiten zu den Themen «Kältemittel» und «Meldung von Anlagen mit Kältemitteln»
- Bundesamt für Umwelt: Vollzugshilfen «Anlagen mit Kältemitteln: vom Konzept bis zum Inverkehrbringen», 2025, und «Anlagen und Geräte mit Kältemitteln: Betrieb und Wartung», 2025
- EnergieSchweiz: «Kältemittel-Fibel für Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Fachleute» Ausgabe 09/2025
- Gebäudeklima Schweiz, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz: Faktenblatt «Natürliche Kältemittel», Stand März 2024; Faktenblatt «Stand der Technik Kältemittel», März 2024
- Gebäudeklima Schweiz, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz: FAQ «Kältemittel in Wärmepumpen – was gilt und was müssen Sie beachten?», Stand September 2024
- Suissetec: Merkblatt «Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln», Dezember 2024
- Schweizerischer Verband für Kältetechnik: Merkblatt «Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln der Sicherheitsklasse A3 und A2L», Juli 2025

Kapitel 4

Wärmequellen

Folgende Arten von Wärmequellen können mit Wärmepumpen genutzt werden:
- Aussenluft
- Erdwärme
- Grund- und Oberflächenwasser
- Abwärme
- Gebäudekühlung

Grundsätzlich gilt, je tiefer das Temperaturniveau der Wärmequelle, desto schlechter ist die Effizienz (COP) der Wärmepumpe und umgekehrt.

4.1 Aussenluft

Die Aussenluft steht uns in unbeschränkter Menge als Wärmequelle zur Verfügung. Die geringe Wärmekapazität von Luft – im Vergleich zu Sole oder Wasser – ist aber nachteilig: Sie erfordert vergleichsweise hohe Volumenströme am Verdampfer. Auch kann sich am Verdampfer (bei kühler, feuchter Aussenluft) gefrierendes Kondensat anlagern, das regelmässig abgetaut werden muss. Zu beachten ist auch, dass die Wärmequellentemperatur gegenläufig zur benötigten Heizsystemtemperatur ist. Bei steigenden Aussentemperaturen nimmt die Heizleistung des Geräts zu. Diesem Effekt kann durch Kaskadierung oder Drehzahlregelung von Verdichtern entgegengewirkt werden (Bild 4.1). Der Lufttransport durch den Ventilator kann störende Schallemissionen verursachen. Aus diesem Grund verlangen die kommunalen Baubewilligungsbehörden in der Regel einen Lärmschutznachweis (Kapitel 8).

Systeme

Man unterscheidet folgende Bauarten:
- Kompaktanlage für Innenaufstellung: Diese Bauart wird in der Regel für kleinere und mittlere Anlagen eingesetzt (Heizleistung: 5 kW bis 50 kW).
- Kompaktanlage für Aussenaufstellung: Diese Bauart kommt zum Einsatz, wenn im Gebäude kein Platz vorhanden ist (oder dies von der Bauherrschaft gewünscht wird).
- Split-Anlage: Kommt dort zum Einsatz, wo die Aussenluft aufgrund der erforderlichen Luftvolumenstrommenge nicht direkt dem im Gebäude platzierten Aggregat zugeführt werden kann. Der Verdampferteil wird im Freien aufgestellt, der Verflüssiger im Gebäude. Der Verdichter kann sich in der Aussen- oder der Inneneinheit befinden.

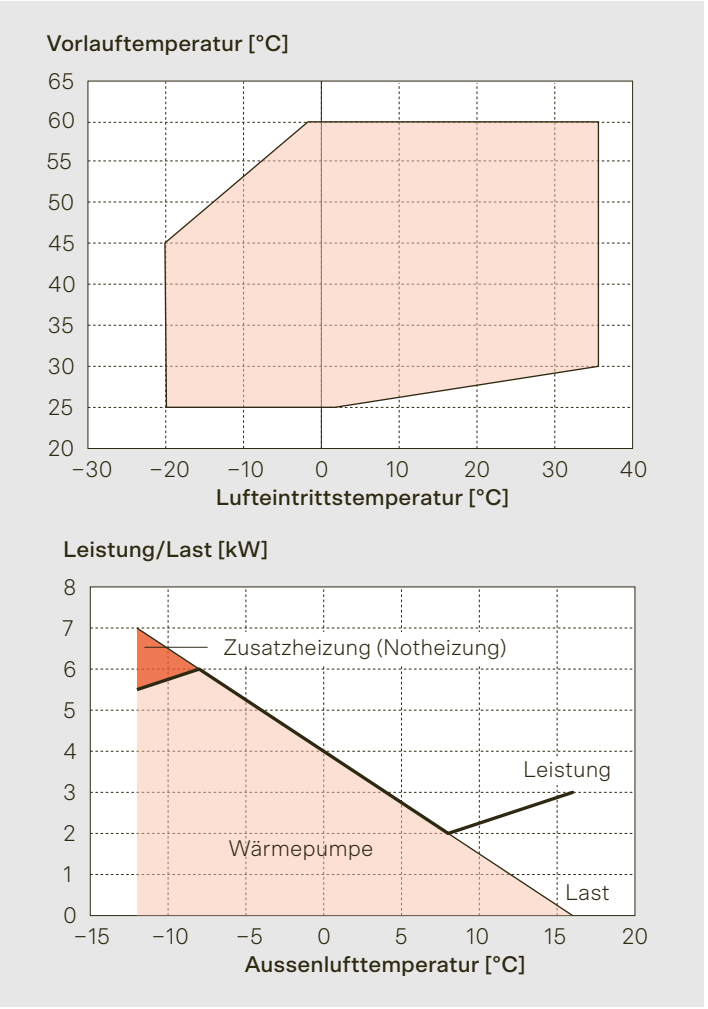


Bild 4.1: Beispiel Einsatzgrenzen einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (oben). Bei tiefen Lufteintrittstemperaturen sind nur noch reduzierte Vorlauftemperaturen erreichbar. Unten: Gebäudelast und Heizleistung (leistungsgeregelte WP). Bei tiefen Aussenlufttemperaturen muss deshalb eine Zusatzheizung die Last abdecken. Achtung: Von Gesetzes wegen muss die Wärmepumpe bis zur Auslegungstemperatur den Bedarf alleine abdecken können.

Planungshinweise

Die Nutzung von Aussenluft als Wärmequelle ist grundsätzlich nicht bewilligungspflichtig, der Elektroanschluss ist jedoch durch das zuständige Elektrizitätswerk zu bewilligen. Ebenso sind die jeweiligen Anforderungen der kantonalen und kommunalen Baubewilligungsverfahren, insbesondere zum Lärmschutz zu berücksichtigen.

- Die Heizsystemtemperatur kann aufgrund der zeitweise tiefen Quellentemperatur eingeschränkt sein (Bild 4.1).
- Wärmepumpen müssen von Gesetzes wegen (MuKEn) so dimensioniert sein, dass sie im Auslegungsfall den gesamten Leistungsbedarf abdecken.



Bild 4.2: Kompaktanlage für Innenaufstellung. (Quelle: BKW AG)



Bild 4.3: Kompaktanlage für Aussenaufstellung. (Quelle: BKW AG)



Bild 4.4: Erdwärmesonde. (Quelle: BKW AG)

- Bei Aussentemperaturen unter rund +5 °C und entsprechender Luftfeuchtigkeit kann der Verdampfer vereisen. Es ist eine automatische Abtauung notwendig. Die gerätespezifischen Anforderungen sind zu berücksichtigen.
- Durch die Abkühlung unter den Taupunkt der Luft entsteht Kondenswasser. Dieses muss gesammelt und in einer frostsicheren Leitung abgeführt werden. Dies gilt auch für die Verrohrung des Verdampfers.
- Es ist zu beachten, dass die abgekühlte Luft der Wärmepumpe nicht vom Aussenluftstrom erfasst wird (Kurzschluss). Es besteht zudem die Gefahr, dass sich ein «Kaltluftsee» bildet.
- Mit dem Einsatz von Erdluftwärmeübertragern oder durch die Platzierung der Luftfassung an «warmen» Standorten (Autoeinstellhalle, Gebäudeabluftanlage, Technikzentralen etc.) kann die Energieeffizienz der Wärmepumpe gesteigert werden.
- Die Wärmepumpe ist vor Beschädigung und Funktionsbeeinträchtigungen durch Personen sowie Schnee, Laub, Staubpartikeln und Kleintieren zu schützen. Umgekehrt sind Personen vor beweglichen Teilen (Ventilatoren, Verdichtern und Pumpen) zu schützen (inklusive Elektroanschlüsse).
- Eine feste Installation von Aussengeräten bedingt eine Baubewilligung.
- Bei der Planung einer Split-Anlage sind die kältetechnischen Grundregeln besonders zu beachten.
- Grosse Beachtung ist dem Thema Schallemissionen zu widmen (Kapitel 8).

4.2 Erdwärme

Das Erdreich ist ein idealer Wärmelieferant. Bereits etwa 10 m unter der Erdoberfläche weist das Erdreich eine über das ganze Jahr annähernd konstante Temperatur auf. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Temperatur im Unter-

grund um ca. 3 K pro 100 m. Die jahreszeitliche Konstanz bildet eine ideale Voraussetzung zur Nutzung von Erdwärme zu Heizzwecken. Erdwärmesonden werden normalerweise zwischen 50 m bis zu 350 m tief gebohrt. Die Nutzung von Erdwärme ist bewilligungspflichtig. Als Grundlage zur Auslegung und zum Einbau dient die Norm SIA 384/6 «Erdwärmesonden».

Erdwärmesonden (EWS)
Zur Wärmegewinnung aus dem Erdreich sowie zur passiven oder aktiven Kühlung werden heute in der Regel mit Wasser oder einem Wasser-Glykol-Gemisch gefüllte EWS oder EWS-Felder eingesetzt.



Bild 4.5: Bohrpfahl. (Quelle: Enercret Röthis)

Systeme
Es handelt sich praktisch durchwegs um PE-Kunststoffrohre, die in verschiedenen Anordnungen eingesetzt werden können. Diese kommen als einfaches (Simplex-EWS), doppeltes U-Rohr (Duplex-EWS) oder als Koaxialausführung vor. Aufgrund ihrer Effizienz (grosse Wärmeübertragungsfläche) und einfachen Handhabung hat sich vor allem die Anordnung mit zwei Doppel-U-Rohren durchgesetzt. In der Mitte ist ein zusätzliches Rohr angeordnet, durch welches das Bohrloch mit einem Bentonit-Zement-Wasser-Gemisch von unten ausgefüllt wird und welches sicherstellt, dass die wasserführenden Rohre nicht von der Bohrwand wegrutschen.
EWS-Anlagen sind unter folgenden energierelevanten Aspekten auszulegen:
- Übertragungsleistung der Sonde (Entzug oder Einspeisung)
- Energiebedarf: Umfang und Dauer des Wärmeentzugs und der allfälligen Rückspeisung (Regeneration, Kühlung) im Jahresverlauf



Bild 4.6: Rammpfahl. (Quelle: Enercret Röthis)



Bild 4.7: Pfahlarmierungskorb mit befestigten Sonden. (Quelle: Haka-Gerodur)

- Geologie des Untergrunds: Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Wärmekapazität, Grundwasser-Vorkommen etc.
- Anzahl Sonden mit Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung
- Sondenlänge respektive Sondentiefe
- Sondenabstand
- Bohr- und Rohrdurchmesser
- Wasser- oder Frostschutzfüllung, ohne Eisbildung
- Druckverlust des Systems

Planungshinweise

- Wo Erdwärme genutzt werden darf, ist aus den Geoinformationsportalen (Erdwärmenutzungskarten) der Kantone ersichtlich
- EWS-Anlagen werden durch zertifizierte Bohrfirmen ausgeführt und sind in jedem Fall bewilligungspflichtig (Zuständigkeit: Kantone). Die FWS vergibt ein Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen, deren Berücksichtigung wird empfohlen. Für das Wärmepumpen-Systemmodul (Kapitel 9.2) ist dies Pflicht.
- Die Auslegung muss nach Norm SIA 384/6 erfolgen, für einfache Anlagen bis vier Sonden beschreibt diese ein vereinfachtes Verfahren. Grundsatz: Je grösser das Erdwärmesondenfeld, desto geringer ist der mögliche langfristige Wärmeentzug je Laufmeter Sonde. Zu berücksichtigen sind auch nicht vollständig regenerierte Nachbarsonden.
- Wird die EWS-Anlage auch als «Kältequelle» für Kühlzwecke (Freecooling) eingesetzt, kann das Erdreich durch den Wärmeeintrag teilweise «regeneriert» werden. Die Auswirkungen der Regeneration auf die EWS-Dimensionierung sind durch einen ausgewiesenen Spezialisten abzuklären respektive mit einem geeigneten Softwaretool zu simulieren.
- EWS-Anlagen dürfen nicht zur Bauaustrocknung eingesetzt werden, da die erwähnten Rahmenbedingungen in der Regel überschritten werden.
- Die Zufahrt zur Bohrstelle mit dem Bohrgerät ist sicherzustellen.
- Hinweise zur Erdwärmesondengeometrie sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.
- Die Erdwärmesonden-Anschlussleitungen werden in einem Verteiler zusammengefasst. Dieser kann sich ausserhalb oder innerhalb des Gebäudes befinden (Frostschutz beachten: Wärmedämmung oder Leitungsfüllung mit Frostschutz). Bild 4.8 zeigt einen externen, begehbaren Verteiler.
- Der Verteiler muss über die gesamte Lebensdauer zugänglich sein. Es muss gekennzeichnet werden, welche EWS wo am Verteiler angeschlossen sind. Bei Anlagen mit zwei oder mehr Sonden Volumenstrom-Regelventile einbauen und einregulieren.
- EWS auf lange Lebensdauer auslegen und nicht zu knapp dimensionieren (Reserve bei WP-Ersatz mit besserer Effizienz).

Tabelle 4.1: Länge und Inhalt von Sonden sowie Bohrlochdurchmesser. Annahme: Doppel-U-Rohr.

EWS-Rohrdurchmesser	Inhalt pro Meter	Bohrlochdurchmesser*	Maximale Länge
32 mm	2,12 Liter	112 bis 115 mm	ca. 150 m
40 mm	3,34 Liter	127 bis 135 mm	ca. 300 m**
50 mm	5,18 Liter	152 mm	über 300 m**

* Spühlbohrungen in grundbruchgefährdetem Untergrund (Siltsande etc.) erfordern grössere Durchmesser (4 ¾" bis 7 ⅝"), je nach EWS-Durchmesser und Bodenverhältnissen.
** Ab ca. 250 m sind EWS mit höherer Druckbeständigkeit zu verwenden.

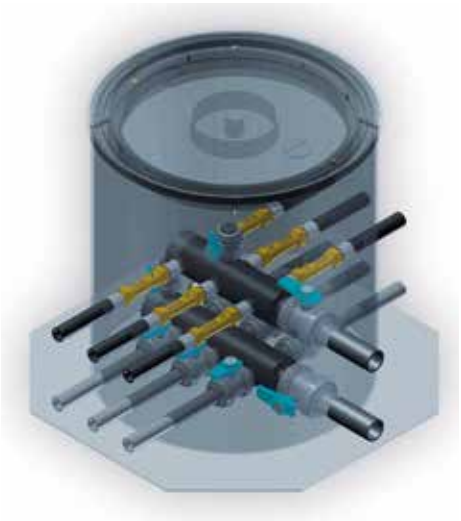


Bild 4.8: Externer begehbarer Verteiler. (Quelle: Jansen AG)

Erdwärmesonde mit CO_2-Technik
Als Alternative zur Erdwärmesonde mit einer Wasser- oder Wasser-Glykol-Füllung kann die Sonde mit CO_2 betrieben werden. Die CO_2-Sonde funktioniert nach dem Prinzip des Wärmerohres (heat pipe). Ungiftiges CO_2 (Kohlendioxid) zirkuliert in der Erdwärmesonde. Das CO_2 wird in flüssigem Zustand unter Druck in die Erdwärmesonde gefüllt. Es sinkt ab und erwärmt sich mit der steigenden Temperatur im Erdreich. Dabei verdampft die Flüssigkeit und kondensiert wieder an der kältesten Stelle, das heisst im Verdampfer der Wärmepumpe, und überträgt so die Erdwärme zur Wärmepumpe. Das CO_2 zirkuliert im Gegensatz zum Wärmeträger einer herkömmlichen Erdwärmesonde ohne Hilfsenergie, wodurch sich Energieeinsparungen ergeben. Allerdings können diese Sonden im Sommer durch Wärmeeintrag einer Wärmepumpe nicht regeneriert werden. Eine Gebäudekühlung ist mit dieser Sonde auch nicht möglich.

Erdwärmeregister
Anstelle von EWS werden auch Erdwärmeregister verwendet. Diese bestehen aus horizontal verlegten Rohrschlangen im Erdreich, 1,2 bis 1,5 Meter unter der Terrainoberfläche (Bild 4.10). Die Erdwärmeregister entziehen dem Erdreich mehrheitlich jene Wärme, welche durch Sonneneinstrahlung und Regen eingetragen wird. In der Regel wird ein Frostschutzgemisch als Wärmeträger verwendet.

Systeme
Erdwärmeregister bestehen in der Regel aus Kunststoffen oder kunststoffummantelten Kupferrohren. Diese werden im Gebäude oder in einem

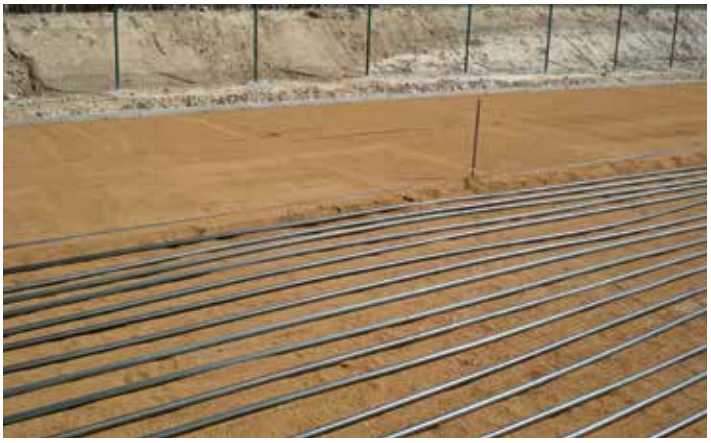
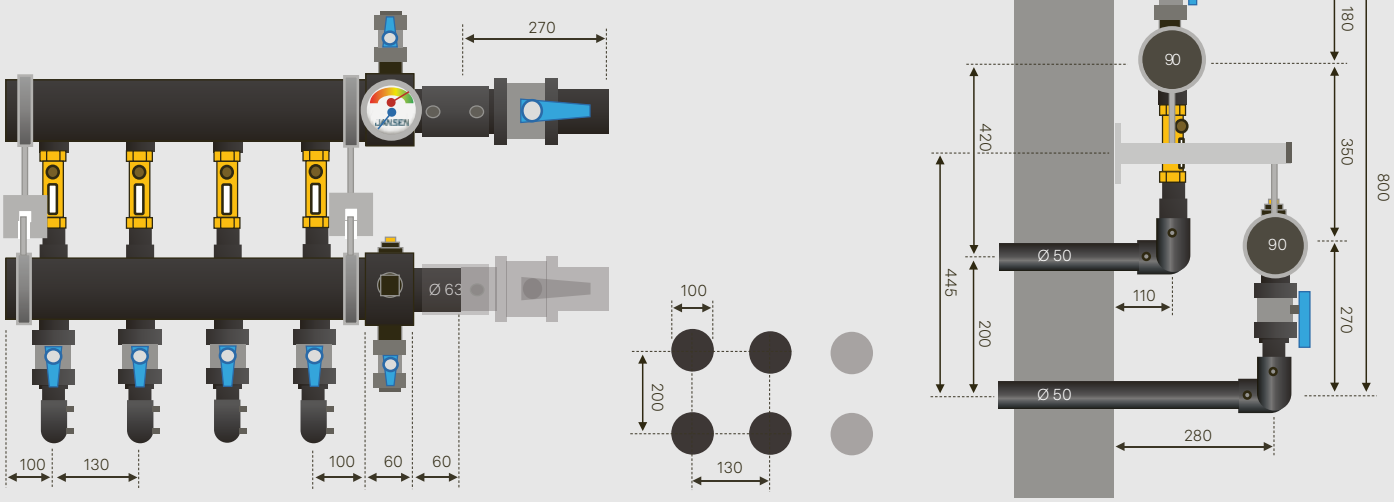


Bild 4.10: Neuanlage eines Erdwärmeregisters. Dieses wird anschliessend wieder mit Erdreich überdeckt. (Quelle: HakaGerodur)



Vorderansicht | Lochbild Kernbohrungen für Soleleitungen | Seitenansicht

Bild 4.9: Beispiel eines EWS-Verteilers. (Quelle: Jansen AG)



1 Dicht verschweisst: Alle Leitungen sind mit der Schachtwand dicht verschweisst und gewährleisten absolute Dichtigkeit.



2 Hochwertige Schachtabdeckung: UV-beständiger, tagwasserdichter PE-Kunststoffdeckel in stabiler Ausführung.



3 Robust und funktional: Aus bis zu 12 mm dicken PE-Platten gefertigt. Erfüllt hohe statische Anforderungen. Tragfähige Ösen für Sicherung, Transport und Einbau.



4 Absperrbare Hauptleitung: Je nach Schachttyp entweder mit Kugelhahn oder mit Absperrklappe; für korrekte Installation und optimalen Betrieb.



5 Soleleitungen und Durchflussanzeigen: Alle Soleleitungen sind absperrbar. Die Durchflussanzeigen sind mit 1¼"-Überwurfmuttern befestigt und können so bei Bedarf einfach gewartet werden.



6 Spülanschluss: Die 1"-Spülanschlüsse sind absperrbar und ermöglichen ein schnelles Spülen und Befüllen der Anlage.

Bild 4.11: Kompletter Verteiler. (Quelle: Jansen AG)

Schacht ausserhalb des Gebäudes auf einem Verteiler respektive Sammler zusammengefasst.

Planungshinweise
- Erdwärmeregister können bewilligungspflichtig sein (Zuständigkeit: Kantone).
- Die maximale Entzugsleistung (Kälteleistung) bei guten Bodenverhältnissen beträgt pro m² Erdregisterfläche ca. 25 W bis 30 W oder ca. 60 kWh während einer Heizperiode. Bei schlechtem Boden (trocken) liegen die Werte bei 10 W/m² bis 15 W/m².
- Bei Eindeckung des Erdwärmeregisters muss das System unter Druck sein, um allfällige Beschädigungen zu erkennen. (Steine, Bauschutt etc. sind für das Überdecken nicht geeignet.)
- Bei Erdwärmeregistern kann es jahreszeitlich zu Erdbewegungen kommen, wenn diese vereisen.

Energiepfähle

Energiepfähle kommen in der Regel an Orten mit instabilem Baugrund als Fundationspfähle zum Einsatz. Der Energiepfahl wird also primär als statisches Element eingesetzt. Anordnung und Umfang richtet sich nach den Anforderungen, die an das Gebäude respektive den Baugrund gestellt werden. Der Energiegewinn ist demnach von den geologischen Verhältnissen und den statisch bedingten Massnahmen (Länge und Anordnung) abhängig. In der Regel wird ein Frostschutzgemisch als Wärmeträger verwendet.

Systeme

Man unterscheidet zwei Bauarten von Energiepfählen:
- Bohrpfähle bestehen aus Armierungskörben, an denen Rohre befestigt werden. Sie werden in ein Bohrloch versenkt, das anschliessend mit Beton aufgefüllt wird.
- Rammpfähle sind vorgefertigte Betonpfähle, in denen im Werk die Rohre verlegt und eingegossen werden. Beim Einrammen muss sichergestellt werden, dass die Leitungsanschlüsse am Pfahlende nicht beschädigt werden.

Planungshinweise
- Energiepfähle sind bewilligungspflichtig (Zuständigkeit: Kantone).
- Sie sind durch ausgewiesene Spezialisten zu berechnen.
- Die Zufahrt zur Bohr- respektive Rammstelle mit dem Arbeitsgerät ist sicherzustellen.
- Die Zuleitungen ab Energiepfahl zum Verteiler sind in genügender Tiefe zu verlegen und mit einer Wärmedämmung zu versehen.
- Je nach Untergrund und Auslegung ist der Betrieb nur mit Wasser als Wärmeträger möglich.

Erdwärmekörbe

Erdwärmekörbe sind spiralförmig aufgerollte Kunststoffrohre, die in einer Tiefe von 1,5 m bis 3,5 m eingebracht werden (Bild 4.12). Sie werden wie Erdwärmeregister durch die Witterung an der Erdoberfläche beeinflusst.

Erdwärmegraben

In 1 m bis 1,5 m tiefen Gräben werden Kunststoffrohre horizontal verlegt. Sie sind ebenfalls durch die Witterung an der Erdoberfläche beeinflusst.

Bild 4.12: Erdwärmekörbe. (Quelle: Calmotherm)



Schlitzwände

Schlitzwände werden je nach Boden oder Tiefe mit einem Greifer oder einer Fräse abgeteuft. In das ausgehobene Schlitzsegment wird der Armierungskorb mit den befestigten Kunststoffrohren eingebracht und anschliessend mit Beton aufgefüllt.

Anbindung des Erdwärmenutzungssystems

Nebst der richtigen Auslegung der Quellennutzung sollte immer auch der Hydraulik des Primärkreises genügend Beachtung geschenkt werden.

Wärmeträger

Üblicherweise werden Erdwärmeentzugssysteme mit einem Frostschutz-Gemisch betrieben. Erdwärmeentzugssysteme können aber bei entsprechender Auslegung (z. B. durch Simulationsrechnung), mit Wasser ohne Zusätze betrieben werden. Dabei darf die Verdampfungstemperatur nur so tief gewählt werden, dass keine Eisbildung möglich ist. Die Konzentration des Frostschutzgemisches sollte den Vorschriften des Geräteherstellers respektive des Gerätelieferanten entsprechen (Korrosionsschutz). Die physikalischen Eigenschaften des Frostschutzgemischs ändern sich je nach Temperatur und Wärmekapazität.

Umwälzpumpen

Die Umwälzpumpe ist immer anlagespezifisch auszulegen und zu berechnen. Je nach Länge und Anordnung der EWS ist der Druckverlust beträchtlich. Eine über- oder unterdimensionierte Umwälzpumpe kann den Wirkungsgrad der Gesamtanlage wesentlich verschlechtern. Generell ist ein möglichst hoher Wirkungsgrad der Umwälzpumpe anzustreben. Bei leistungsregulierten Wärmepumpen ist auch die Leistung der Umwälzpumpe im Sondenkreislauf dem Bedarf anzupassen. Der Schwitzwasserbildung ist Rechnung zu tragen.

Sicherheitseinrichtungen

- Die Drucküberwachung schaltet die Wärmepumpenanlage bei einem Druckabfall im Primärkreis aus.
- Das Expansionsgefäss kompensiert die Druckveränderungen im System, die sich durch Temperaturänderung und Veränderungen am Material (z. B. Kriechen der Kunststoffrohre) ergeben.
- Um die Anlage vor Überdruck zu schützen, ist ein Sicherheitsventil einzubauen. Der Überlauf ist in ein Auffanggefäss zu führen.

Rohrsysteme

- Es sind korrosionsbeständige Materialien wie Kunststoff, Chromstahl (V4A) oder gegen Korrosion behandelter Stahl zu verwenden. Es dürfen keine

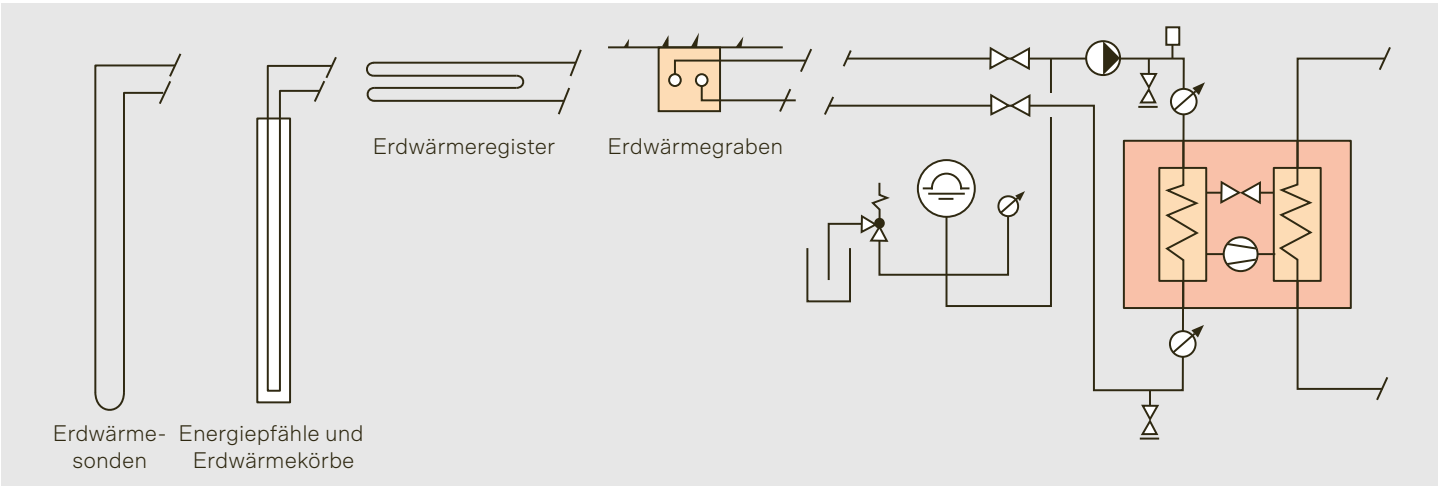


Bild 4.13: Anbindung an Erdwärmenutzungssysteme.

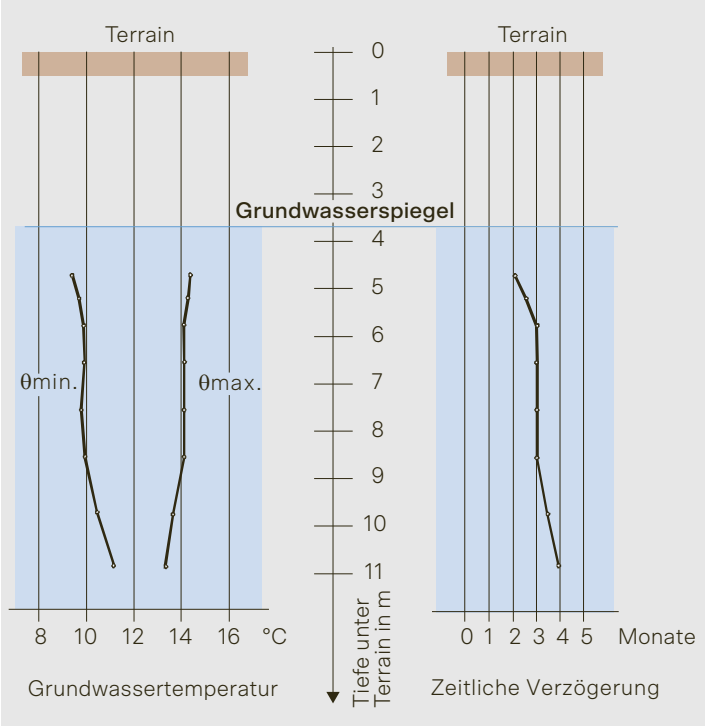
verzinkten Rohre oder Fittinge verwendet werden.
- Im Gebäude ist das Leitungsnetz inklusive Armaturen dampfdicht zu dämmen, um Schwitzwasser zu vermeiden.

Hydraulischer Abgleich
Die einzelnen EWS-Kreise sind untereinander hydraulisch abzugleichen. Am EWS-Verteiler sind entsprechende Regelarmaturen einzubauen.

4.3 Grundwasser

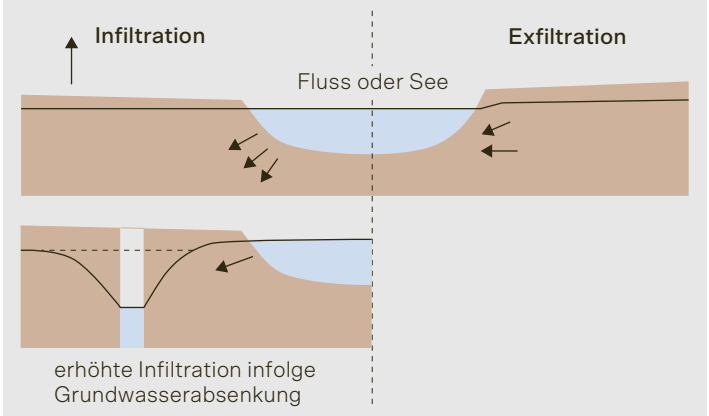
Grundwasservorkommen
Wasser, welches im Untergrund Gesteinsporen, Risse oder Klüfte füllt, wird als Grundwasser bezeichnet. Es fliesst unter Einwirkung der Schwerkraft vorwiegend entlang der durchlässigeren Zonen in Locker- und Festgesteinen (kies- und sandreiche Lagen, Sandstein, geklüfteter oder verkarsteter Fels). Oberflächennahes Grundwasser wird meist aus Tiefen von wenigen Metern bis mehreren 10 Metern vorwiegend aus kiesreichen Lockergesteinsvorkommen (Schotter) gefördert. Oberflächennahes Grundwasser wird teilweise auch als Trinkwasser verwendet, die Nutzung ist daher durch Grundwasserschutzgesetze geregelt und immer bewilligungs- respektive konzessionspflichtig.
Die mittlere Jahrestemperatur von oberflächennahem Grundwasser liegt in der Regel bei 9 °C bis 11 °C und damit über dem Mittelwert von Aussenluft. Die Temperatur kann durch zusickerndes Oberflächenwasser oder durch die Lufttemperatur beeinflusst werden. Ist der Einfluss durch Oberflächengewässer relativ gering und liegt die Fördertiefe mehrere Meter unter Terrain, sind die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen jedoch minimal. Mit zunehmender Tiefe verzögern sich die Maximal- und Minimalwerte stärker. Die maximale Temperaturschwankung liegt bei etwa 5 K (Bild 4.14). Aufgrund des relativ hohen und konstanten Temperaturniveaus ist Grundwasser eine ideale und zuverlässige Wärmequelle für Wärmepumpen. Es kann sowohl für Heiz- als auch für Kühlzwecke genutzt werden. Als Grundlagen zur Auslegung dient die Norm SIA 384/7 «Grundwasserwärmenutzung».

Bild 4.14: Grundwassertemperaturen.



Grundwasserqualität
Die Qualität von Grundwasser kann durch Infiltration aus Oberflächengewässern entscheidend beeinflusst werden (Bild 4.15). Neben der thermischen Beeinflussung ist auch der Qualität des Grundwassers Beachtung zu schenken. Grundwasser ist in den meisten Fällen nicht aggressiv. Insbesondere der Eintrag von organischem Material oder

Bild 4.15: Infiltration von Oberflächenwasser.



Sauerstoff durch Zutritt von Oberflächenwasser kann zu unerwünschten Reaktionen führen. Aus diesen Gründen ist eine einfache Analyse der Grundwasserqualität empfehlenswert. Folgende Grenzwerte sollten eingehalten werden:

- pH-Wert: ≥ 7
- Eisen (gelöst): ≤ 0,15 mg/l
- Mangan (gelöst): ≤ 0,1 mg/l

Verunreinigungen durch Sand, welche in der Anlage mechanische Schäden verursachen können, sollten bei einer fachgerecht erstellten Anlage weder durch Oberflächenwassereinfluss noch durch die Förderung im Filterbrunnen auftreten. Um dies zu gewährleisten, soll sowohl der Entnahme- als auch der Rückgabebrunnen unter fachkundiger Aufsicht geplant und erstellt werden. Dabei spielt die fachgerechte Entsandung vor der Fertigstellung und Inbetriebnahme des Brunnens eine wichtige Rolle.



Bild 4.16: Entnahme- und Rückgabebrunnen. (Quelle: BKW AG)

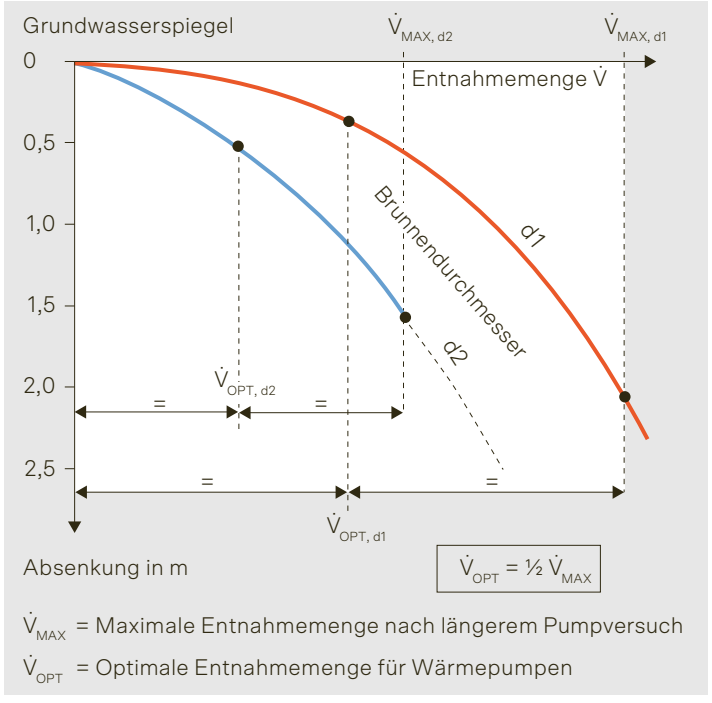


Bild 4.17: Zwei Beispiele für die Dimensionierung einer Grundwasserfassung.

$\dot{V}_{MAX}$ = Maximale Entnahmemenge nach längerem Pumpversuch

$\dot{V}_{OPT}$ = Optimale Entnahmemenge für Wärmepumpen

Grundwasserfassung und -rückgabe

Die Dimensionierung des Entnahme- und Rückgabebrunnens (Bild 4.16) richtet sich vor allem nach den Eigenschaften des wasserführenden Gesteins sowie der von der Wärmepumpe benötigten Fördermenge. Die optimale Entnahmemenge aus einem Förderbrunnen liegt im Bereich der halben maximalen Entnahmemenge (Bild 4.17). Die benötigte Fördermenge pro kW Wärmebedarf liegt in der Regel zwischen 150 l/h und 200 l/h. Mit steigender Entnahmemenge sind in der Regel grössere Bohrdurchmesser notwendig. Die Dimensionierung der Bohrungen hängt aber stark von den lokalen Gegebenheiten ab und sollte durch eine Fachperson erfolgen. Die Rückgabe erfolgt oft auch über einen untiefen Versickerungsschacht. Dazu muss die Sickerfähigkeit des Untergrundes abgeklärt werden. Fallweise kann die Rückgabe in ein nahe liegendes Oberflächengewässer erfolgen.

Hinweise zur Planung und Umsetzung

- Wo Grundwasser genutzt werden darf, ist aus den Geoinformationsportalen (Gewässerschutz- und Wärmenutzungskarten) der Kantone ersichtlich.
- Für eine Grundwassernutzung ist eine amtliche Bewilligung respektive Konzession notwendig. Dies betrifft auch Probebohrungen. Die Bewilligungspraxis ist kantonal unterschiedlich. Häufig werden Niveau- und Temperaturüberwachungen des Grundwassers im Brunnen verlangt. Beispielsweise müssen spezielle Druckfühler sowie Temperatursensoren mit der Grundwasserpumpe abgesenkt werden.

- Planung und Umsetzung sollten unter Einbezug eines beratenden Geologen oder Hydrogeologen erfolgen.
- Eine einfache Wasseranalyse ist empfehlenswert. Es ist allerdings zu beachten, dass die Wasserqualität saisonal schwanken kann. Auf die Materialisierung der Leitungen und Komponenten ist zu achten (Korrosion und Verschmutzung).
- Bei Fassungen in der Nähe von Oberflächengewässern ist eine mögliche Infiltration durch diese zu beachten.
- Bei der Lokalisierung von Entnahme und Rückgabestelle ist die Grundwasserströmung zu berücksichtigen (keine Rückgabe im Anströmbereich der Entnahme).
- Die Leistung der Förderpumpe sollte auf den niedrigsten zu erwartenden Grundwasserstand ausgelegt werden.
- Eine Temperatur- und Strömungsüberwachung bietet Schutz vor Abkühlung des genutzten Wassers unter den Gefrierpunkt sowie vor Übernutzung der Fassung.
- Bei Verunreinigungen des Grundwassers ist ein Zwischenkreis einzubauen, der den Wärmeübertrager der Wärmepumpe schützt.

Das komplette Anlagensystem muss nach Norm SIA 384/7 folgende Systemkomponenten umfassen (Bild 4.18):

- Entnahmebrunnen
- Fördersystem (Pumpe, Spülstutzen, Rohrleitungen und Wärmeübertrager), um das Grundwasser aus dem Entnahmebrunnen bis zur Rückgabe zu leiten.
- Sicherheitseinrichtungen zum Schutz der Förderpumpe (Trockenlauf)
- Einrichtungen zum Schutz des Wärmeübertragers (vor mechanischer oder chemischer Überbeanspruchung)
- Rückgabe (Brunnen oder Versickerung)

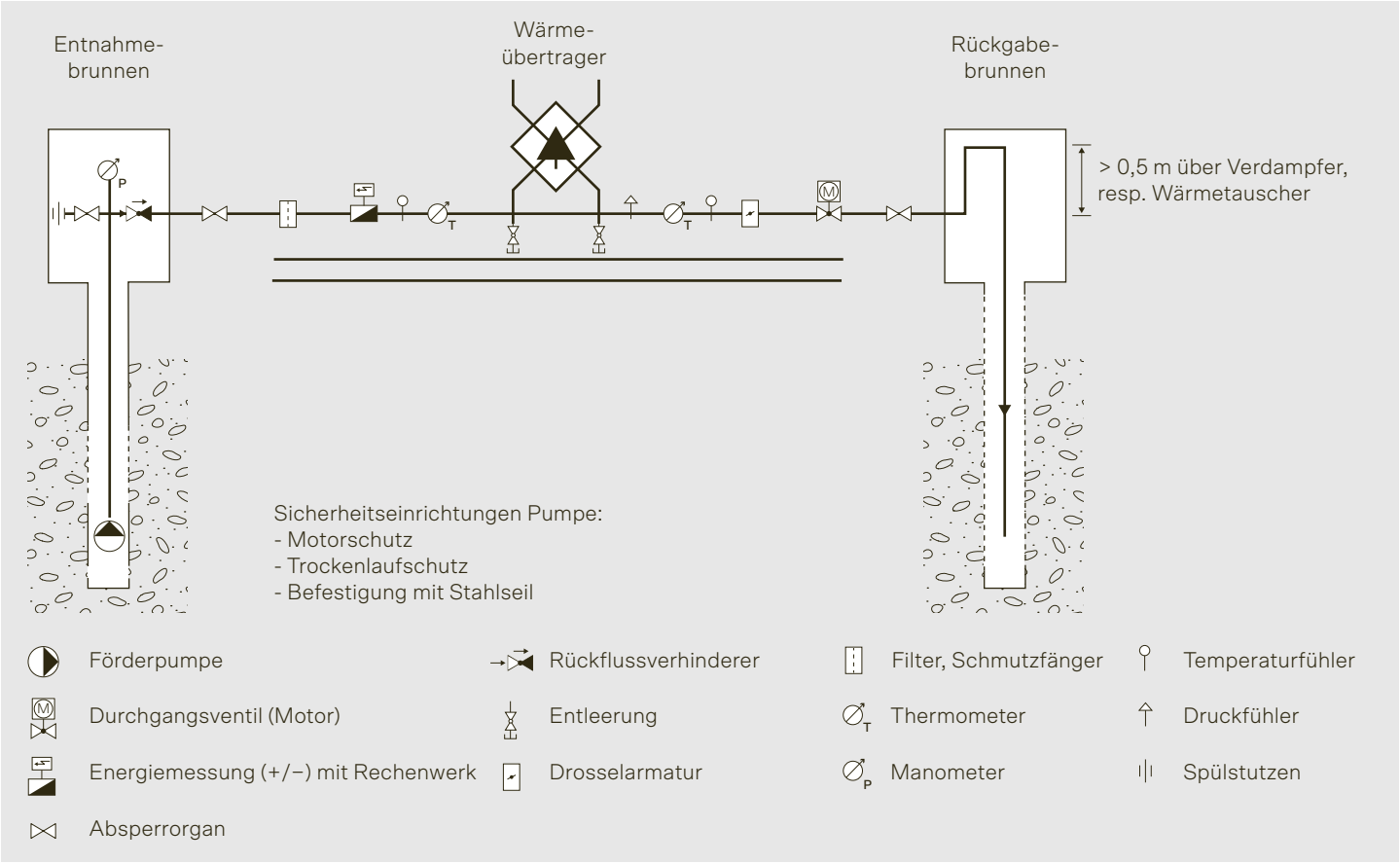
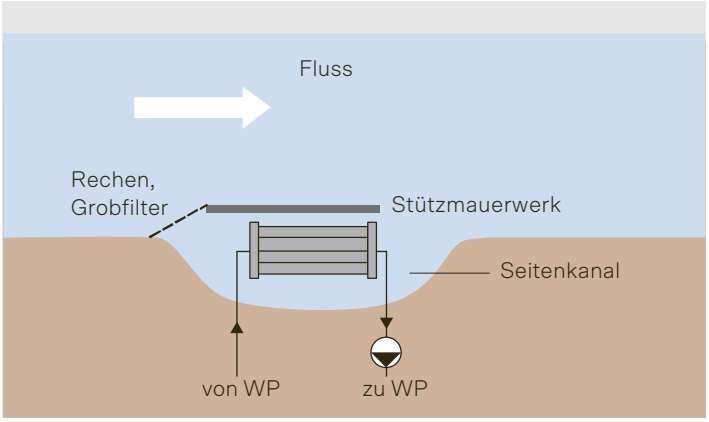


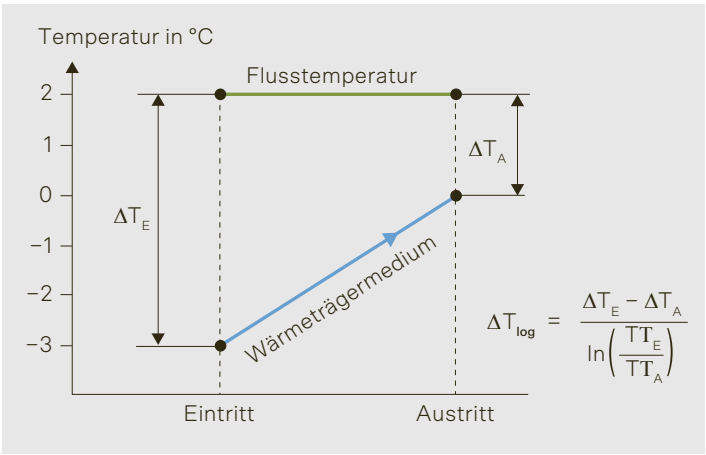
Bild 4.18: Überblick über die Systemkomponenten. Symbole nach SIA 410. (Quelle: Norm SIA 384/7)

– Einrichtungen zur Überwachung des geförderten Grundwassers (Wassermenge, Wassertemperaturen von Entnahme und Rückgabe)
– Einrichtung zur Überwachung des Grundwassers (Wasserstand)

Bild 4.19: Register im Fliessgewässer.

Bild 4.20: Definition mittlere logarithmische Temperaturdifferenz.





Oberflächenwasser

Oberflächengewässer enthalten ein beachtliches Potenzial zum Heizen und Kühlen nahe gelegener Gebäude, wobei aber auch Rücksicht auf das Ökosystem genommen werden muss. Daher ist auch die Nutzung von Oberflächenwasser bewilligungs- respektive konzessionspflichtig, Ansprechpartner sind die Kantone oder Gemeinden. Die relativ grossen Temperaturschwankungen von Oberflächengewässern (Fluss-, Bach- oder Seewasser) lassen einen monovalenten Betrieb mit Direktnutzung in der Regel nicht zu. Es findet deshalb meist eine indirekte Nutzung statt: Die Wärmequelle gibt ihre Wärme an einen Wärmeübertrager ab, der durch einen Zwischenkreislauf mit der Wärmepumpe verbunden ist. Der Zwischenkreislauf enthält ein Frostschutzgemisch, damit die Verdampfungstemperatur

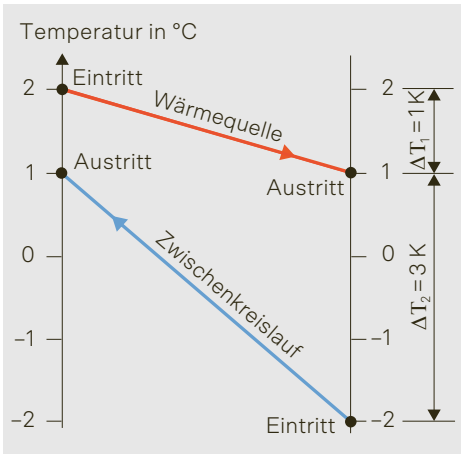


Bild 4.21: Temperaturen Wärmequellen und Zwischenkreislauf.

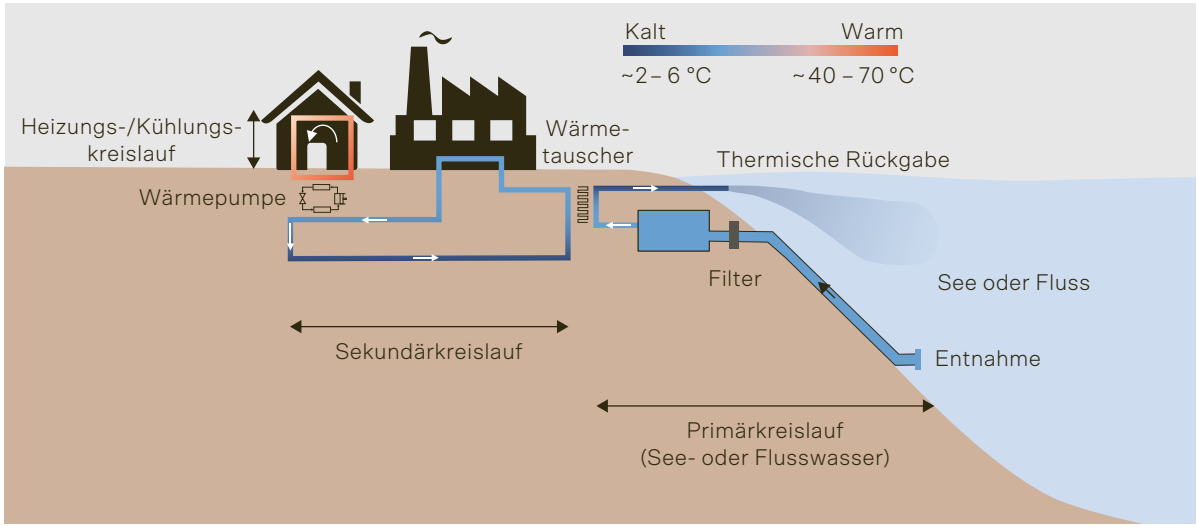


Bild 4.22: Filterbrunnen bei Seewassernutzung. Im Beispiel wird der Sekundärkreislauf zum Kühlen (industrieller Prozess) und Heizen (Gebäude) genutzt, das Rückgabewasser ist kälter als das Entnahmewasser. (Quelle: EAWAG 2018)

schadlos unter 0 °C sinken darf. Der oft auch behördlich geforderte Zwischenkreis schützt zudem das Gewässer vor Kältemittelkontamination im Schadenfall.
Der Wärmeentzug aus Oberflächengewässern ist grundsätzlich auf zwei Arten möglich:

- Register im Fliessgewässer (Bild 4.19): Es fliesst eine sehr grosse Wassermenge durch das Register, die Abkühlung ist entsprechend klein (Bild 4.20).
- Filterbrunnenlösung (Bild 4.22): Das Wasser wird in einem Filterbrunnen direkt neben dem Oberflächengewässer gesammelt und von hier aus zu einem Wärmeübertrager gepumpt.

Für die Registerlösung ist es empfehlenswert, mit einer mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz (Bild 4.20) von maximal 5 K bis 6 K zu rechnen. Zur Dimensionierung der Wärmeübertragerfläche kann man U-Werte von 200 bis 300 W/m² K annehmen (Strömungsgeschwindigkeit über 0,5 m/s). Es ist empfehlenswert, einen Sicherheitszuschlag von etwa 25 % für eine mögliche Verschmutzung des Registers zu machen. Die rasch nachfliessende Wärmequelle (Bach- und Flusswasser) verhindert eine Eisbildung. Der Rohrabstand muss im Minimum 4 cm betragen. Zudem muss das Register durch bauliche Massnahmen gegen Geröll geschützt werden und gut zu reinigen sein. Bei stehenden Gewässern ist diese Lösung nur bedingt brauchbar. Der Vorteil der Filterbrunnen-Lösung ist die praktisch verschmutzungsfreie Wasserentnahme. Ein monovalenter Betrieb ist häufig möglich. Bei der Nutzung von Seewasser ist dessen Temperaturschichtung zu beachten: die Entnahme sollte in mindestens 15 m Tiefe erfolgen, für Kältenutzung noch tiefer (Bereich 30 m bis 70 m). Die Rückgabe sollte Oberflächenschichten nicht zusätzlich erwärmen.
Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Ein Zwischenkreislauf ergibt tiefere Verdampfungstemperaturen und damit schlechtere Leistungszahlen (Bild 4.21).
- Das Wasserangebot von Flüssen ist oft schwankend (insbesondere bei kleineren Fliessgewässern).
- Bei Fliessgewässern ist auch ober- und unterliegende (d. h. stromaufwärts respektive -abwärts) Nutzung zu berücksichtigen.
- Pro kW Wärmebedarf liegt der Wasserbedarf in der Regel bei ca. 300 l/h bis 400 l/h.
- Die Realisierung ist eher schwierig (insbesondere die Registerlösung, Seewasserfassungen sind relativ unproblematisch).
- Zur Nutzung von Oberflächengewässern ist eine amtliche Bewilligung notwendig. Das Bewilligungsverfahren und der Unterhalt können insbesondere bei der Registerlösung sehr aufwendig sein.
- Eine Wasseranalyse ist unbedingt empfehlenswert. Es ist allerdings zu beachten, dass die Wasserqualität saisonal schwanken kann. Auf die Materialisierung der Leitungen und Komponenten ist zu achten (Korrosion und Verschmutzung).
- Verschmutzungen oder Verstopfungen durch Wandermuscheln oder Biofilm beachten.
- Sommerlicher Wärmeeintrag ist aus ökologischer Sicht am heikelsten und wird daher kaum bewilligt.

4.4 Abwärme

Wenn immer möglich sollte Abwärme direkt genutzt werden. Ist eine Direktnutzung aufgrund der geforderten Nutzungstemperaturen nicht möglich, so kann die vorhandene Abwärme mittels einer Wärmepumpe auf das notwendige Temperaturniveau angehoben werden.

Abwasser

Abwasser ist in verschiedenen Formen vorhanden, z. B. ungereinigt in der Kanalisation, vorgereinigt in Industriebe-

trieben mit hohem Frischwasserbedarf oder gereinigt am Ende der Kläranlage. Die Wassertemperaturen bewegen sich zwischen 10 °C und 25 °C in der Kanalisation und in der Kläranlage sowie bis über 60 °C in Industriebetrieben.
Die Abkühlung des Abwassers ist bei richtig geplanten und entsprechend den Vorgaben der Kläranlagenbetreiber dimensionierten Anlagen kein Problem. Zudem ist eine solche Energienutzung weder für die Abwasserreinigung noch für Gewässer von Nachteil.

Systeme
– Kanalwärmeübertrager: Die Energiegewinnung erfolgt über einen Wärmeübertrager, der in die Sohle des Abwasserkanals integriert wird. Bei neuen Abwasserkanälen werden auch direkt im Kanal einbetonierte Rohre zum Wärmeentzug eingesetzt.
– Wärmeübertrager im Bypass: Der Einbau erfolgt parallel zum Abwasserkanal. Dies hat den Vorteil, dass während der Bauzeit fast keine Beeinträchtigung des Abwasserkanals stattfindet.
– Energieentnahme ohne Kanalwärmeübertrager: Dies ist bei grossen Anlagen, bei denen der Einsatz von Kanalwärmeübertragern an technische Grenzen stösst, von Vorteil. Hier wird mit dem Abwasser mit oder ohne Zwischenkreislauf über den Verdampfer der Wärmepumpe gefahren. Damit der Verdampfer respektive der Wärmeübertrager nicht verschmutzt, ist entweder eine Vorreinigung des Abwassers nötig oder die Apparate sind konstruktiv auf die Abwasserqualität auszulegen.
– Abwasser-Wärmepumpen: Der Energieentzug erfolgt direkt im oder neben dem Gebäude bevor das Abwasser der Kanalisation zugeleitet wird. Es sind verschiedene herstellerspezifische Systeme erhältlich.

Planungshinweise
– Diese Anlagen erfordern aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine Mindestwassermenge.
– Beim Einsatz von Kanalwärmeübertragern kann mit einer spezifischen Entzugsleistung von ca. 1,5 kW/m² bis 2 kW/m² kalkuliert werden.
– Hohe Abwassertemperaturen erlauben eine grössere Abkühlung und damit einen grossen Energieentzug. Ideale Voraussetzungen sind bei Abwassertemperaturen gegeben, die im schlechtesten Fall über 10 °C liegen.
– Eine wichtige Voraussetzung ist ein kontinuierlicher Abwasseranfall. Auch nachts und an den Wochenenden sollten die betriebstechnisch notwendigen Mindestwassermengen eingehalten werden.
– Die Zugänglichkeit muss für den Einbau und die spätere Wartung gewährleistet sein.
– Die Wärmeübertrager im Bypass-Kanal müssen vor Verschmutzung und vor Fremdkörpern (Sand, Steine, Schlamm) freigehalten werden.
– Die Distanz zwischen der Wärmequelle und dem Standort der Wärmepumpe sollte möglichst kurz sein, da sonst für den Transport der gewonnenen Energie viel Transportenergie verbraucht wird, die sich auf die JAZ negativ auswirkt.
– Solche Anlagen sind von Spezialisten mit entsprechender Erfahrung zu planen.
– Das zuständige Amt für den Abwasserbereich von Anfang an miteinbeziehen.
– Nicht geeignet für Kleinanlagen.

Hinweis: Abwärmenutzung ist oft auch von Gesetzes wegen vorgeschrieben. Dabei ist nicht nur an Abwasser zu denken, Abwärmequelle kann z. B. auch die Rückkühlung von Kälteanlagen sein.

4.5 Gebäudekühlung

Normen und gesetzliche Grundlagen
Gebäude müssen so geplant und ausgeführt werden, dass bei Nutzungen mit mässigen internen spezifischen Wärmeeinträgen die Behaglichkeitsanfor-

derungen nach SIA 180 ohne aktive oder passive Kühlung erfüllt sind. Dabei wird vorausgesetzt, dass die beweglichen Sonnenschutzeinrichtungen bestimmungsgemäss bedient werden und bedarfsgerecht gelüftet wird. Die gängigen Begrifflichkeiten und massgebenden Normen sind im Flussdiagramm des Planungsvorgehens dargestellt (Bild 4.24, folgende Seite).
Bei aktiver Kühlung arbeitet die Wärmepumpe im umgekehrten Betrieb als Kältemaschine – die Rollen des Verflüssigers und Kondensators werden getauscht. Dies erfordert gegenüber einer passiven Kühlung zusätzliche elektrische Energie für den Verdichter.

Notwendigkeit einer Kühlung

Norm SIA 380/2 stellt bauliche Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, beispielsweise betreffend Sonnenschutz, Wärmedämmung, Wärmespeicherfähigkeit und Lüftung. Werden diese als Voraussetzung erfüllt, kann eine Gebäudekühlung trotzdem noch «notwendig» oder zumindest «erwünscht» sein. Die kann etwa der Fall sein, wenn interne Wärmeeinträge durch Personen oder Geräte inklusive Beleuchtung die Behaglichkeit beeinträchtigen (Tabelle 4.2). Primär sollten daher immer die internen Lasten möglichst klein gehalten werden.

Gesetzliche Vorgaben

Für den Einsatz von aktiver Kühlung müssen die gesetzlichen Anforderungen gemäss MuKEn und den Energiegesetzen der jeweiligen Kantone erfüllt sein. Die Anforderungen reichen vom sommerlichen Wärmeschutz (g-Wert der Fenster, Verglasung gemäss SIA 180, automatischer Sonnenschutz fassadenweise, windfester Sonnenschutz) bis hin zur Vorgabe für die Nutzung der Abwärme, soweit dies technisch und betrieblich möglich und wirt-

Interne Wärmeeinträge pro Tag in Wh/m²			Kühlung
mit Fensterlüftung Tag und Nacht	mit Fensterlüftung bei Belegung	ohne Fensterlüftung	
> 200	> 140	> 120	notwendig
140 – 200	100 – 140	80 – 120	erwünscht*
< 140	< 100	< 80	nicht notwendig*

* Erlaubt ist nur eine minimale Kühlung bis max. 7 W/m² Nettogeschossfläche. Bei bestehenden Anlagen oder Sanierungen sind 12 W/m² erlaubt.

Tabelle 4.2: Beurteilung der Notwendigkeit einer Kühlung anhand der Wärmeeinträge je m² Nettogeschossfläche. (Quelle: SIA 380/2)

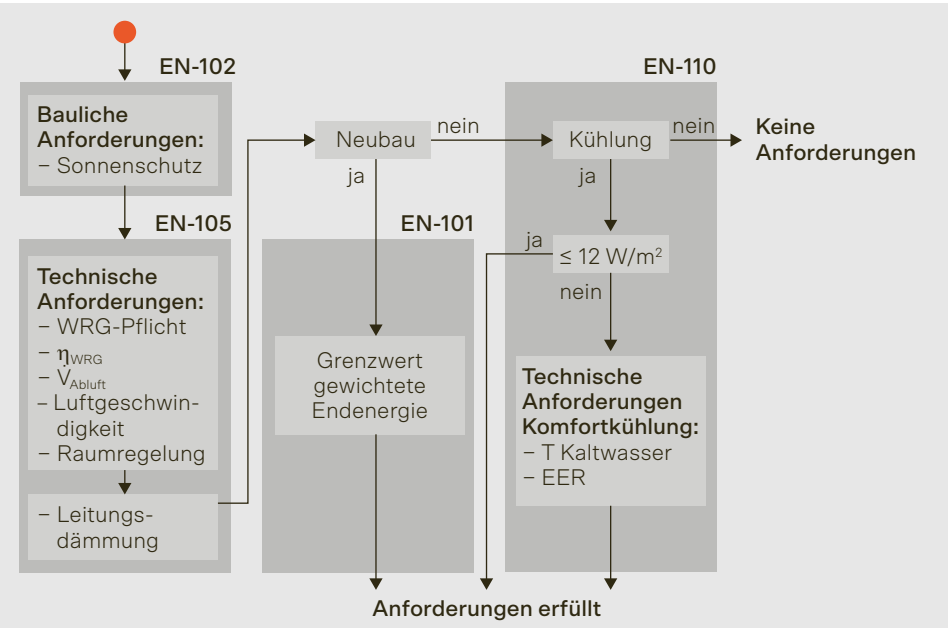


Bild 4.23: Übersicht über die gesetzlichen Anforderungen für den Einsatz von aktiver Kühlung. (Quelle: Vollzugshilfe EN-110 Kühlen, Be- und Entfeuchten)

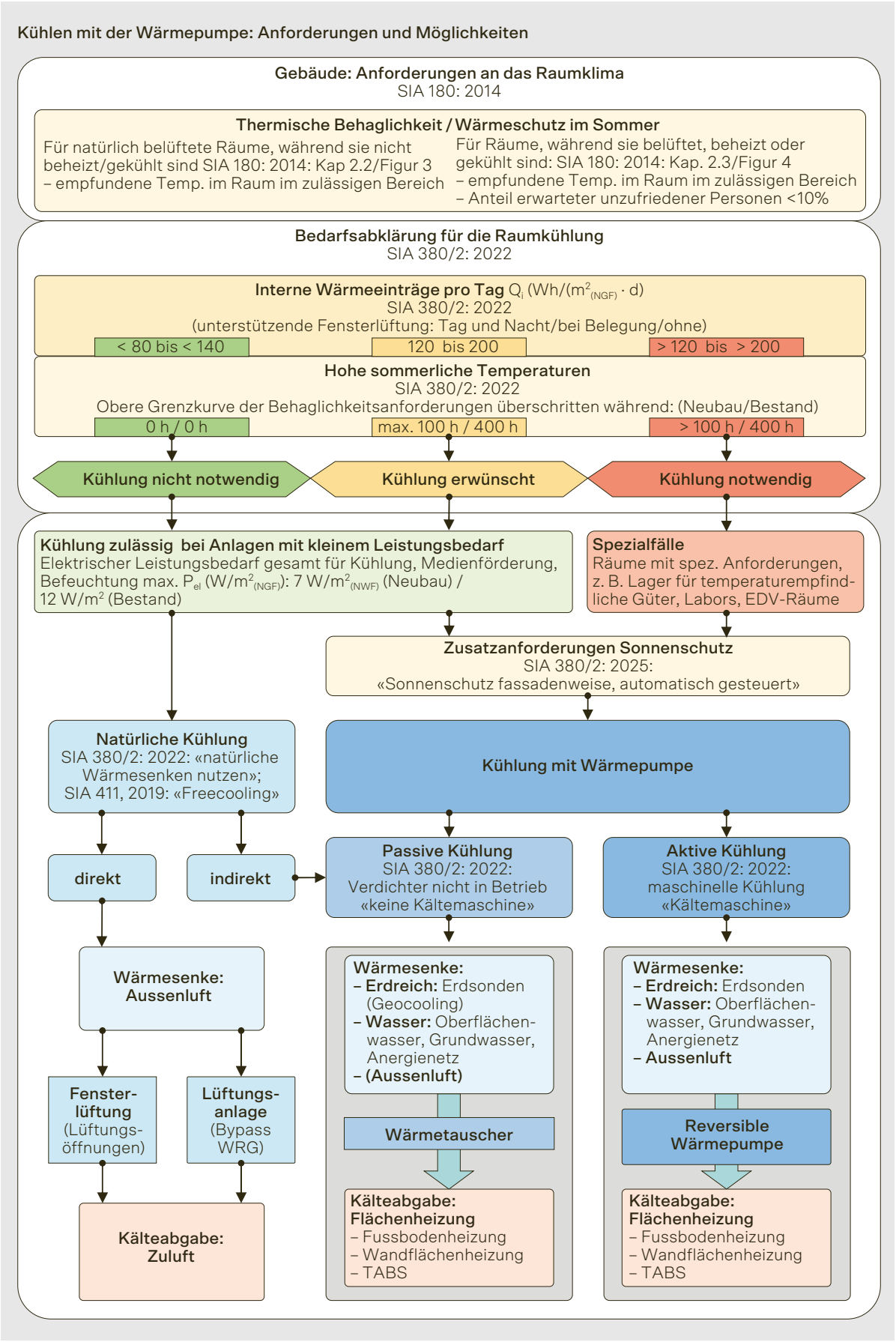


Bild 4.24: Flussdiagramm Planung von Kühlung mit Wärmepumpen. (Quelle: Christoph Sibold, FHNW INEB)

schaftlich zumutbar ist. Der Bedarfsnachweis für Kühl-, Be-, und Entfeuchtungsanlagen, wurde durch die technischen Anforderungen abgelöst. Eine Übersicht über die gesetzlichen Anforderungen zeigt Bild 4.23.

Auswertungskriterium Sollwert der Raumtemperatur im Kühlfall

Durch eine thermische Simulation der jeweiligen Zone kann mithilfe eines Nachweisverfahrens geprüft werden, ob eine Kühlung zur Einhaltung der Behaglichkeit notwendig ist. Dabei wird die Querverbindung zur Figur 1 im Komfortdiagramm der SIA 380/2 hergestellt. Als gleichwertige Methodik gilt das Messverfahren der Raumtemperatur der jeweiligen Zone. Dabei gelten die folgenden Beurteilungskriterien:

- Neubau: Beim Überschreiten der oberen Grenzkurve der Figur 1 (siehe Bild 4.25) während mehr als 100 h pro Jahr, ist eine Kühlung notwendig.
- Im Bestand wird eine erhöhte Toleranz der Nutzer angenommen. Hier gelten 400 h pro Jahr als Grenzwert.

Einflüsse des Klimawandels

Der Klimawandel lässt die Temperaturen steigen, das zeigt sich beispielsweise an der Länge der Vegetationsperiode. Sie hat sich zwischen 1971 und 2020 um etwa zehn Tage pro Jahrzehnt verlängert, also durchschnittlich um einen Tag pro Jahr. Die steigenden Temperaturen erhöhen auch den Kühlbedarf von Gebäuden, wobei es zu erwähnen gilt, dass zumindest ein Teil davon durch mehr Verdunstungskühlung in grünen Umgebungen ausgeglichen werden könnte [1]. Insgesamt haben die Tage, an denen gekühlt werden muss, seit 1960 deutlich zugenommen (Bild 4.26). Bezüglich des Kühlbedarfs von Gebäuden ist die Anzahl der Tropennächte ein guter Indikator, also der Nächte, in denen die Aussenlufttemperatur 20 °C nicht unterschreitet. Sie ist in der Schweiz in den letzten Jahren deutlich gestiegen, was sich beispielsweise an der Statistik für die Wetterstation von Locarno-Monti zeigt. Dort hat sich die Anzahl der Tropennächte seit 1960 etwa verzehnfacht (Bild 4.27). 2024 wurden dort 33 Tropennächte verzeichnet, das ist der zweithöchste Wert seit Beginn der Messungen 1901 [2].
Die steigende Anzahl an Tropennächten wirkt sich direkt auf die Gebäudekühlung aus. Normalerweise gibt es in der Nacht einen Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Aussentemperatur, der es ermöglicht, Gebäude durch passive Nachtauskühlung abzukühlen. Wenn jedoch die Aussentemperaturen

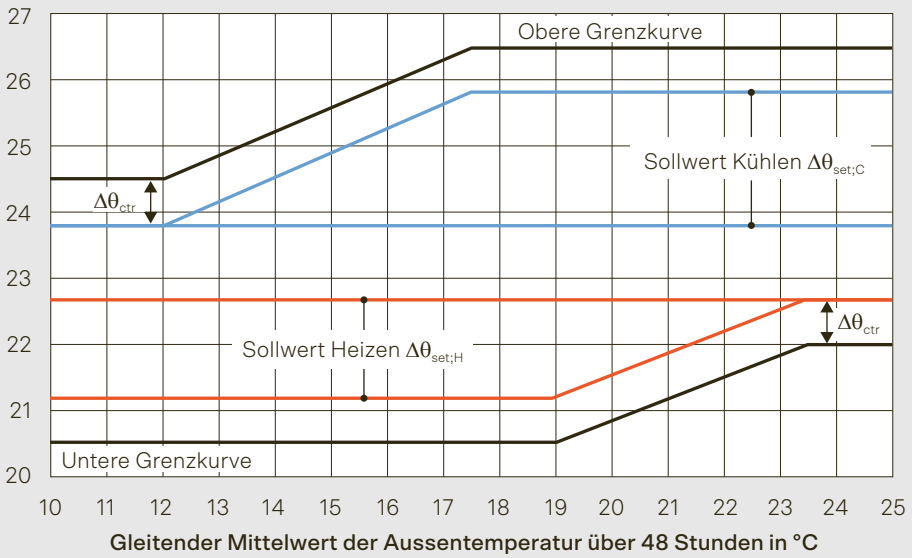


Bild 4.25: Raumtemperatursollwerte für Heizen und Kühlen. (Quelle: Norm SIA 380/2)

Bild 4.26: Entwicklung Kühlgradtage zur Referenztemperatur 18,3 °C. Klimastation Basel-Binningen. Eingezeichnet sind auch die Trendlinien über den ganzen Zeitraum und die letzten 40 Jahre. (Andreas Genkinger, FHNW. Datenquelle: MeteoSchweiz)

Bild 4.27: Tropennächte Locarno Monti. (Quelle: MeteoSchweiz)

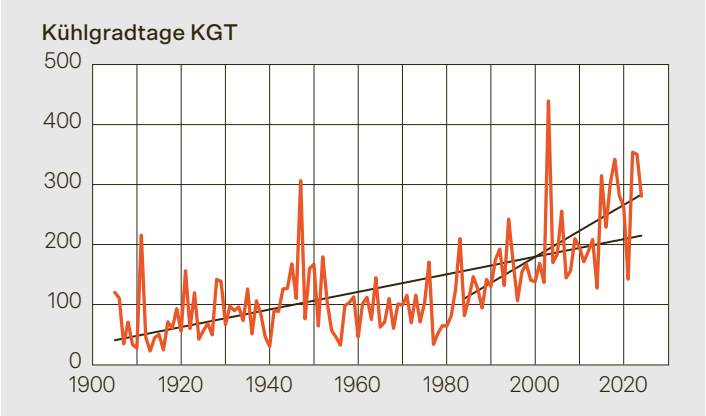
während der Nacht nicht mehr unter 20 °C sinken, funktioniert das nicht mehr ausreichend und die gespeicherte Wärme bleibt über Nacht erhalten. Folglich wird sich die gewünschte Behaglichkeit mit natürlicher Nachtauskühlung alleine nicht mehr aufrecht erhalten lassen.

Kühlsysteme

Angesichts der klimatischen Veränderungen ist es sinnvoll, gebäudetechnische Systeme zu wählen, die ausser zum Heizen auch zum Kühlen von Gebäuden dienen können. Eine Sole-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer Fussbodenheizung ist eine solche Kombination. Sie sorgt für eine effiziente Heizung und ermöglicht durch die Anbindung des kühlen Erdreichs oder gar mittels Umkehrbetrieb der Wärmepumpe die Gebäudekühlung. Da der Kühlbedarf, zumindest im Bereich der Komfortkälte, in der Regel mit Zeiten hoher Solarstrahlung einhergeht, ist die Kombination mit einer Photovoltaikanlage sinnvoll.

Gebäude, die vor 1960 gebaut wurden, werden mehrheitlich über Heizkörper beheizt. Dies kann aber je nach Standort in der Schweiz stark variieren. Generell lässt sich sagen, dass die Möglichkeiten zum Kühlen in Bestandsgebäuden eingeschränkt sind. Der Taupunkt der Oberfläche eines Heizkörpers liegt im Sommer auf 400 m ü. M. und bei einer relativen Raumluftfeuchte von 60 % bereits bei etwa 18 °C. Die Bildung von Kondenswasser muss aber unbedingt vermieden werden, da sie zu Korrosion («Rost») und zu allgemeinen Feuchtigkeitsproblemen führen und damit Bauschäden verursachen kann. Weil aus den erwähnten Gründen bei Heizkörpern nur wenige Kelvin Temperaturdifferenz zur Raumluft möglich sind und die Kühlfläche begrenzt ist, kann der erforderliche spezifische Klimakälteleistungsbedarf nur durch den Einsatz zusätzlicher (aktiver) Kühlsysteme gedeckt werden.

Sobald die Kühlmitteltemperatur unter den Taupunkt der Raumluft sinkt, sind auch offen, nicht wärmegedämmt geführte Kälteleitungen und Armaturen, schwitzwassergefährdet. Deshalb müssen kalte Leitungen und Armaturen stets diffusionsdicht gedämmt werden



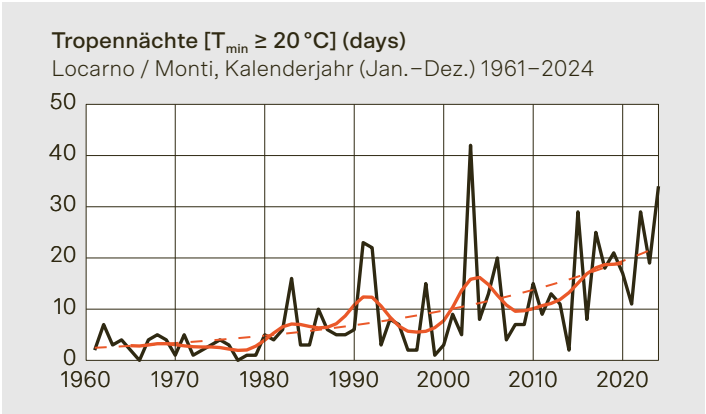


Tabelle 4.3: Empfohlene minimale Dämmstärken für kälteführende Rohre. (Quelle: [3])

Mediumtemperatur[1]: +6 °C, Raumtemperatur: +25 °C, rel. Luftfeuchtigkeit: 60 %														
	Dämmstärke in mm													
Rohrdurchmesser	17	21	22	28	35	42	48	60	76	89	114	140	168	219
λ ≤ 0,03	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	30[2]	40[2]	40[2]
λ >0,03 – ≤0,04	19	19	19	25	25	25	25	25	32	32	32	38	2 x 19 = 38	2 x 25 = 50
λ >0,04 – ≤0,05	30	30	30	30	30	40	40	40	40	50	50	50	60	80

1: Die Mediumtemperatur bezieht sich auf den Vorlauf; der Rücklauf ist gleich dem Vorlauf zu dämmen.
2: Die Dämmungen mit PIR-Dämmstoffen sind zusätzlich mit einer Dampfbremse ≥ 50 m (μ x s) zu versehen.

(Tabelle 4.3). Gemäss MuKEn gelten Mindestdämmanforderungen für kälteführende Leitungen sowie Mindestabstände zwischen den Rohren.

Freecooling über Fussbodenheizung
Wird eine Fussbodenheizung zur Gebäudekühlung (Changeover-Bodenkühlung) verwendet und die Wärme, beispielsweise mittels Wärmeübertrager, direkt der Erdwärmesondenanlage zugeführt (Rückkühlung), handelt es sich um passive Kühlung (Bild 4.28). Dies wird auch als «Natural Cooling» oder Geocooling bezeichnet. Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens ist beschränkt, der Mehraufwand finanziell und energetisch dafür sehr gering.

Regeneration von Erdwärmesonden
Bei der Regeneration von Erdwärmesonden darf die Einspeisetemperatur gemäss Suissetec höchstens 40 °C erreichen [4]. Zu hohe Temperaturen reduzieren die Wärmeaufnahme des Erdreichs und können lokale Wärmestaus verursachen. Zudem kann sich die Bodenstruktur verändern, wodurch die Wärmeübertragung verschlechtert wird. Auch die Sondenflüssigkeit altert bei

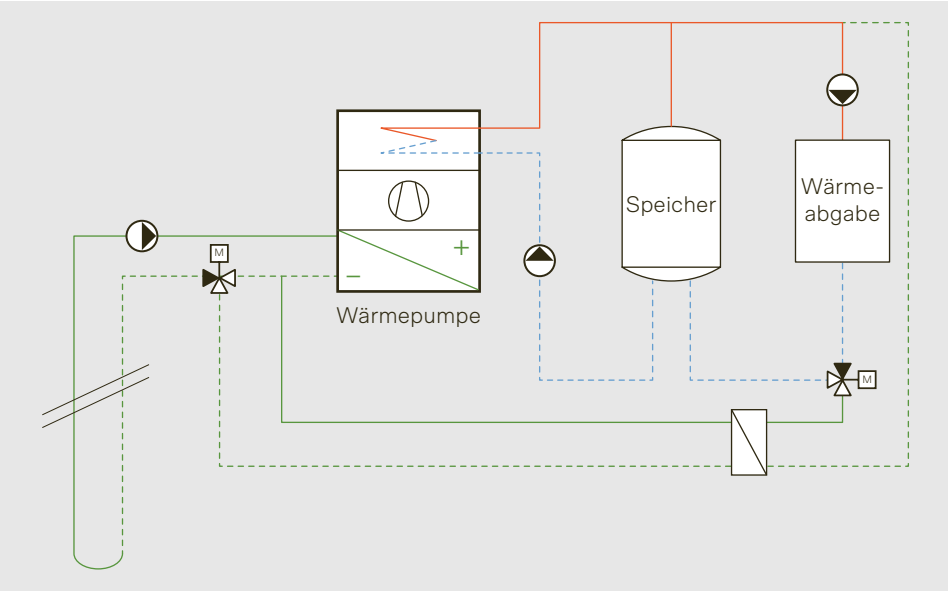


Bild 4.28: Prinzipschema für Geocooling, ohne Regeneration.

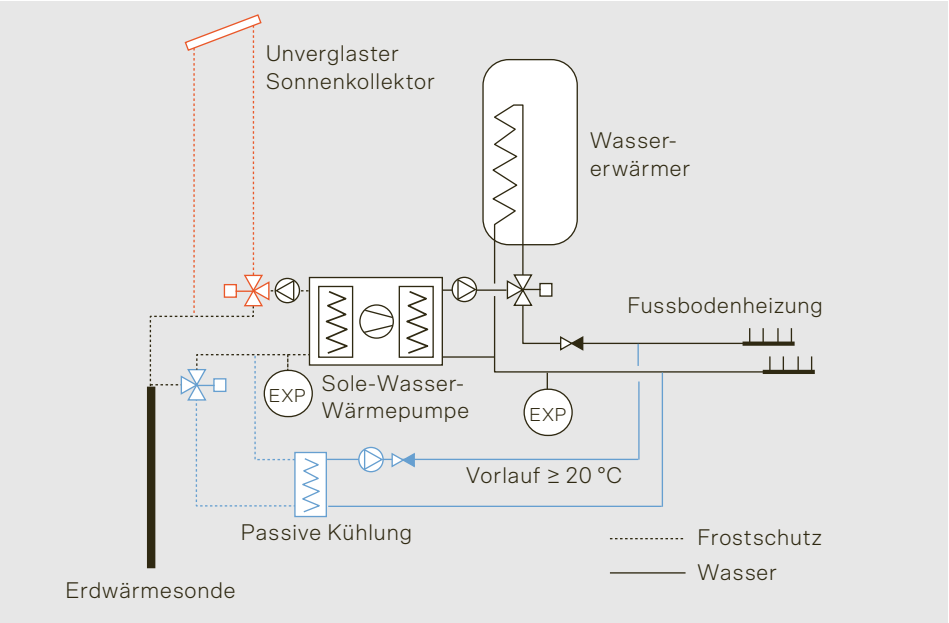


Bild 4.29: Ergänzung eines bestehenden Heizsystems für Fussbodenheizung und Wassererwärmung mit einer Regeneration durch passive Kühlung und/oder unverglastem Sonnenkollektor. Eine Taupunktüberwachung respektive Begrenzung der Vorlauftemperatur auf minimal 20 °C sorgt dafür, dass keine Kondensation auftritt. (Quelle: [4])

hohen Temperaturen rascher. Umgekehrt können tiefe Temperaturen an einem Sonnenkollektor zu Kondensation und damit zu Schäden führen, speziell bei verglasten Typen. Eine kontrollierte Temperaturbegrenzung stellt einen effizienten und langlebigen Betrieb sicher. Bild 4.29 und Bild 4.30 zeigen mögliche Systeme zur Regeneration.

Kennwerte

Bei der Kühlung wird die Geräteeffizienz mit dem EER (Energy Efficiency Ratio) und dem SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) angegeben. Diese entsprechen dem COP und SCOP im Heizfall. Der EER-Wert ist das Verhältnis zwischen Kühlleistung und der benötigten elektrischen Leistung. Wie der COP gilt auch der EER nur für einen ganz bestimmten Betriebszustand. Ein höherer EER-Wert deutet auf eine effizientere Nutzung der elektrischen Energie sowie daraus resultierende geringere Betriebskosten hin. Der SEER-Wert misst die Nutzung der Kälteanlage über das ganze Jahr hinweg und berücksichtigt somit die unterschiedlichen, im Jahresverlauf vorkommenden Betriebszustände. Je höher der SEER-Wert ist, desto höher ist die Effizienz des Systems. Typische Durchschnittswerte von marktgängigen, reversiblen Kleinwärmepumpen sind in Tabelle 4.4 zusammengestellt.

Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb

Das Heizen und Kühlen in zu schnellem Wechsel kann einen erheblichen Energiemehraufwand zur Folge haben. Grund dafür ist, dass beim Wechsel zwischen Heizen und Kühlen die thermische Masse des Wärmeabgabesystems und/oder der technischen Speicher abwechselnd aufheizt und abkühlt werden muss. Im Extremfall wird frühmorgens geheizt, tagsüber aber gekühlt. Dies kann durch eine geeignete Regelung vermieden werden. Die wichtigen Regelparameter hierbei sind:

- Heizgrenze
- Kühlgrenze
- Mittelungszeit Aussenlufttemperatur

Tabelle 4.4: Typische Werte von EER und SEER von reversiblen Kleinwärmepumpen, Stand 2024.

EER +7 °C/+12 °C	3,0
EER +18 °C/+23 °C	4,5
SEER +7 °C/+12 °C	4,9
SEER +18 °C/+23 °C	6,6

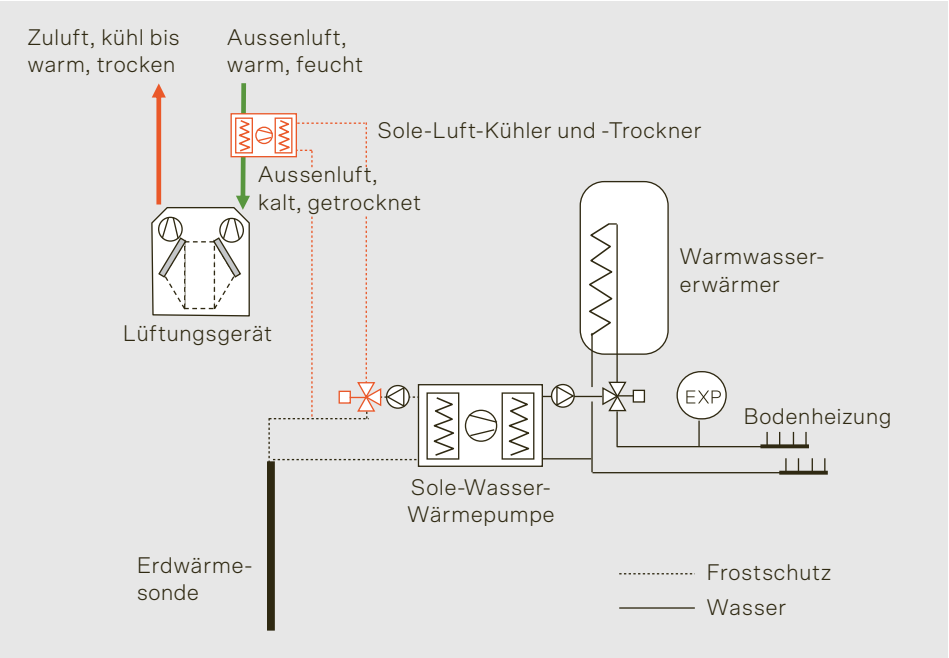


Bild 4.30: Ergänzung eines bestehenden Heizsystems für Fussbodenheizung und Wassererwärmung mit einer Regeneration durch Wärmeentzug aus Aussenluft (und Trocknung). (Quelle: [4])

Die wichtigen Messgrössen am Reglereingang sind:
- Aussenlufttemperatur
- Raumlufttemperatur
- Luftfeuchte

Ein Beispiel typischer Heiz-/Kühlkurven für den alternierenden Betrieb einer Anlage mit Freecooling via Fussbodenheizung zeigt Bild 4.31. Grundlage ist eine über einen genügend langen Zeitraum gleitend gemittelte Aussenlufttemperatur, empfehlenswert sind mindestens 12 bis 24 h. Zwischen Heizgrenze und Kühlgrenze sollten mindestens 4 °C Unterschied liegen (neutrale Zone). In Bild 4.31 beträgt die Heizgrenze 14 °C und die Kühlgrenze 18 °C.
Durch die hier gewählte lange Mittelungszeit der Aussenlufttemperatur wird das Heizen und Kühlen am selben Tag weitgehend vermieden. Trotzdem wird eine Totzeit von mindestens 12 h zwischen Heiz- und Kühlbetrieb empfohlen.
Bei allem muss auf die Gefahr von Kondensation auf dem Fussboden (Rutschgefahr) oder den Verteilleitungen respektive Armaturen geachtet werden. Die Oberflächentemperatur des Fussbodens liegt beim Kühlbetrieb in der Regel 1 bis 2 K über der Temperatur des darin zirkulierenden Mediums. Bei 20 °C Oberflächentemperatur besteht im typischen Schweizer Klima nur wenig Gefahr von Tauwasser. Diese Temperatur wird mit Schuhwerk auch noch als behaglich empfunden. Für den Tessin liegt die Grenze zur Kondensationsgefahr ungefähr 1 K höher.
Die Kühlkurve in Bild 4.31 hat keine Steigung. Dadurch steigt mit zunehmender Aussenlufttemperatur die Kühlleistung. Es erhöht sich aber auch die Gefahr von Kondensation. Deshalb wird eine mit zunehmender Aussenlufttemperatur leicht steigende Kühlkurve empfohlen. Alternativ oder ergänzend kann die Anlage mit einer Taupunktüberwachung ausgerüstet werden. Wichtig ist zudem, dass Raumthermostaten gewählt werden, die sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlbetrieb genutzt werden können – Raumthermostaten, die einzig für den Heizbetrieb ausgelegt sind, bleiben im Sommer «zu».

Planungshinweise
- Kantonale Umwelt-, Energie- und Bauvorschriften beachten.
- Den Wärme- und Kältebedarf des Gebäudes mit den zugehörigen Medientemperaturen in einer frühen Phase definieren.
- Bei Erdwärmesondenanlagen muss bei der Wahl der Sondenlänge die pri-

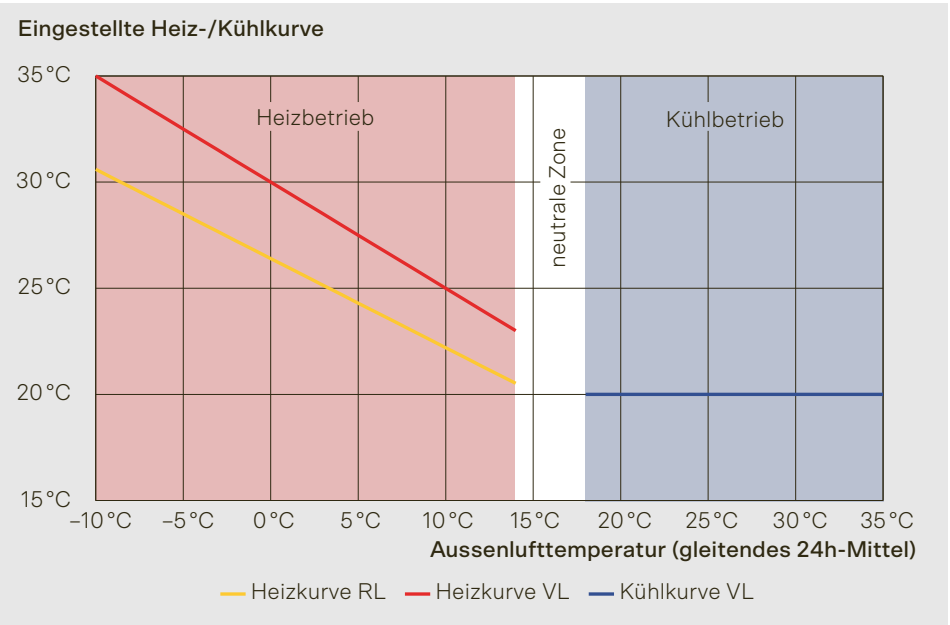


Bild 4.31: Beispiel einer Heiz-/Kühlkurve für Freecooling mittels Fussbodenheizung. (Quelle: Andreas Genkinger, FHNW INEB)

märe Nutzung (Heizen oder Kühlen) berücksichtigt werden.
- Bei Grund-, Oberflächen- und Abwassernutzungen gilt es unbedingt, die maximalen Rückgabetemperaturen mit den zuständigen Behörden zu klären.
- Die Auslegung und die Definition der Einsatzgrenzen sowie die hydraulische und regeltechnische Schnittstelle sind zwingend mit dem Hersteller oder Lieferanten der Kälteanlage zu klären.
- Der Wärmedämmung (Schwitzwasser) des Rückkühlsystems ist ebenfalls Beachtung zu schenken, falls im Freecooling-Betrieb gefahren wird (kalte Leitungen der Rückkühlung im Warmbereich).
- Speziell zu beachten ist die richtige Wahl der regeltechnischen Schnittstellen zwischen Erzeugung, Verteilung und Verbraucher. Eine klare und zweckmässige Trennung erleichtert Planung, Realisierung und Betrieb, vor allem bei komplexen Anlagen.
- Bei Fussbodenheizungen ist eine Vorlauftemperaturbegrenzung (mindestens 18 °C) vorzusehen (Vorbeugung von Kondensatbildung auf Bodenoberfläche respektive im Unterlagsboden).

Lüftungs- und Klimaanlagen

Systeme

Der Einsatz von Wärmepumpen ist auch bei Lüftungs- und Klimaanlagen sinnvoll. Dort ist sie eine ideale Komponente für die Wärmerückgewinnung (WRG) oder Abwärmenutzung (AWN). Damit ist es möglich, sowohl die sensible als auch die latente Wärme aus einem Abluftstrom zurückzugewinnen und diese Wärmeenergie samt des dazu benötigten Kraftbedarfs wieder in den Kreislauf zurückzubringen. Standardisierte Lösungen findet man beispielsweise bei Hallenbad-Lüftungsgeräten und bei Gebäuden mit kontrollierter Lüftung.
In Hallenbädern steht vor allem die Entfeuchtung der Raumluft im Vordergrund. Bei solchen Geräten wird der Luftstrom zuerst über den Verdampfer (Entfeuchtung) und anschliessend über den Verflüssiger (Wiedererwärmung des Luftstroms) geleitet. Die überschüssige Wärme wird oft zur Badwassererwärmung genutzt.
Eine weitere Anwendung ist bei dezentralen Lüftungsanlagen zu finden. Bei kleineren Anlagen mit weniger als 25 m Distanz zwischen Fort- und Zuluftanlagen wird der Verdampfer direkt in den Fortluft-Monobloc respektive der Verflüssiger in den Zuluft-Monobloc eingebaut. Bei grossen Anlagen oder grossen Distanzen ist ein Zwischenkreislauf empfehlenswert. Bei einem Wärmeüberschuss können die Anlagen zur Gebäudeheizung oder ausserhalb der Heizperiode zur Warmwasserbereitung genutzt werden.

Planungshinweise

- Die Wärmeübertrager in den Lüftungsanlagen müssen für eine regelmässige Reinigung gut zugänglich sein. Weiter ist eine geeignete Wärmedämmung vorzusehen (Schwitzwasser).
- Die beiden Energieströme (Quelle und Senke) sollten möglichst gleichzeitig verfügbar sein, da sonst eine Energiespeicherung benötigt wird, die sehr schnell hohe Kosten verursachen kann.

4.6 Quellen

[1] Calanca, P., Holzkämper, A., Isotta, F. A., Die thermische Vegetationszeit im Wandel des Klimas. Agrarforschung Schweiz 14: S. 150–158, 2023
[2] MeteoSchweiz. Klimabulletin Jahr 2024. Zürich, 2025
[3] Merkblatt Technische Dämmung in der Gebäudetechnik, Suissetec 2023
[4] Merkblatt 5, Erdwärmesonden: Entlastung oder Regeneration, Suissetec, 2020

Kapitel 5

Wärmeabgabe

Mit Wärmeübergabe wird das System bezeichnet, mit dem die von der Wärme- respektive Kälteerzeugung bereitgestellte und vom Verteilsystem transportierte Wärme oder Kälte an den Raum übergeben wird. Im Folgenden wird auf den Heizfall fokussiert, dann wird üblicherweise vom Wärmeabgabesystem gesprochen. Die Temperaturen des Wärmeabgabesystems sind direkt von der Norm-Heizlast (Wärmeleistungsbedarf) des Gebäudes und damit von dessen energetischen Konstellation (Standort, Lage, Geometrie, Konstruktion, Wärmedämmung, Nutzung) und von den gesetzlichen Vorschriften abhängig. So hatte die Reduktion des Energiebedarfs durch die seit den 1980er-Jahren eingeführten Energiegesetze einen direkten Einfluss auf den Wärmeleistungsbedarf und die Auslegung von Raumheizungssystemen. Heute sind die maximal zulässigen Vorlauftemperaturen durch den Gesetzgeber vorgegeben.

Ein wesentliches Kriterium bezüglich der notwendigen Temperaturen im Heizsystem betrifft die Ausführung. Insbesondere die Grösse der Wärmeübertragungsfläche ist relevant, die beispielsweise Fussbodenheizungen von Radiatorheizungen deutlich unterscheiden. Da Wärmepumpen bei kleineren Temperaturhüben zwischen Verdampfer und Verflüssiger die eingesetzte Verdichter-Energie effizienter nutzen, ist eine möglichst tiefe Verflüssigungstemperatur und damit Vorlauftemperatur im Heizsystem anzustreben. Im Besonderen ist im Teillastfall eine gleitende Vorlauftemperatur der konstanten Betriebsweise vorzuziehen, wobei hiermit die Austrittstemperatur der Wärmepumpe und nicht nur des Wärmeabgabesystems als ausschlaggebende Grösse zu verstehen ist. Wärmepumpen mit unnötig hohen Austrittstemperaturen verschwenden hochwertige elektrische Energie und belasten das Betriebsbudget des Betreibers. Zudem ist die technische Lebensdauer der Komponenten bei höheren Betriebsdrücken (im Kältekreis) kürzer. Energetisch bieten Niedrigstenergiehäuser mit Flächenabgabesystemen allerbeste Voraussetzungen für den Betrieb von Wärmepumpen. Diese unterliegen in ihrer Funktion jedoch auch thermodynamischen und konstruktiven Gesetzmässigkeiten. Dadurch sind der Auslegung auch Grenzen gesetzt. Modernere Geräte ermöglichen teilweise zwar eine Leistungsmodulation, der Modulationsbereich bleibt aber stets mehr oder weniger beschränkt. Im Gegensatz zu einer Kesselanlage, bei der die Brennerleistung und damit die Kesselleistung in begrenztem Rahmen angehoben werden kann, ist dies bei der Wärmepumpe nicht möglich. Daher sind Wärmepumpen beispielsweise schlecht geeignet, um mit einer erhöhten Vorlauftemperatur eine Bauaustrocknung zu bewältigen oder eine Nachtabsenkung energetisch auszugleichen.

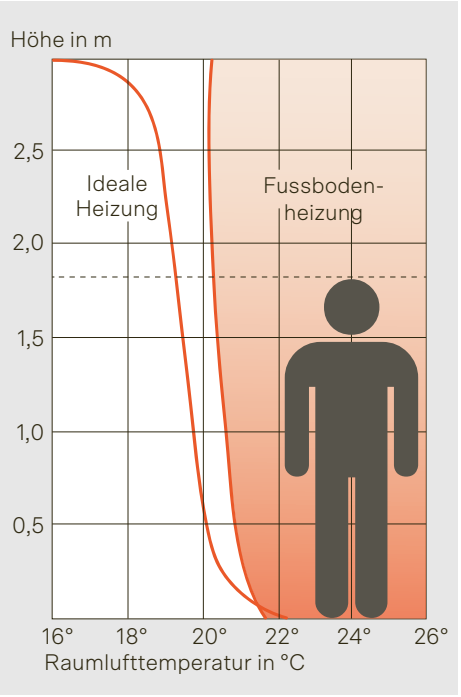


Bild 5.1: Verlauf der Temperatur in einem Raum mit Fussbodenheizung. Die Temperatur sinkt mit der Höhe leicht ab und wird als angenehm empfunden.

5.1 Warmwasserheizung

Fussbodenheizung

Systeme

Wärmeabgabesysteme bei Warmwasserheizungen beziehen sich vorwiegend auf Fussboden- und Heizkörperheizungen oder Kombinationen der beiden Systeme. In den vergangenen Jahren kommen, vor allem in Niedrigenergiebauten, auch thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) zum Einsatz.
Physikalisch basiert die Wärmeabgabe an den Raum beinahe ausschliesslich über Konvektion und Wärmestrahlung. Das Verhältnis von Konvektion zu Strahlung wird für jedes Wärmeabgabesystem durch den Heizkörper-Exponenten n in der Heizkörper-Auswahlliste angegeben und ist für weitere Berechnungen wichtig. Je kleiner der Heizkörper-Exponent ist, desto grösser ist der Strahlungsanteil. Der Heizkörper-Exponent beträgt etwa:

- Plattenheizkörper: n = 1,2 – 1,3
- Radiatoren: n = 1,3
- Fussbodenheizungen: n = 1,1

Vorteile

- Grosse Wärmeabgabe bei tiefen Vorlauftemperaturen aufgrund der Kompensation durch die grosse Fussbodenfläche.
- Selbstregeleffekt: Die Wärmeabgabe von Bodenheizungen regelt sich bis zu einem gewissen Grad selbst. Beispiel: Erwärmt sich die Raumluft durch Sonneneinstrahlung oder erhöhte Personenbelegung, vermindert sich automatisch die Wärmeabgabe der Fussbodenoberfläche. Dieser Selbstregeleffekt ist bei Fussbodenheizungen aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur der Heizfläche (in der Regel rund 2 K) besonders ausgeprägt. Gute Temperaturverteilung über die Raumhöhe (Bild 5.1).
- Unterlagsboden (Estrich) kann als Speicher benutzt werden.
- Bodenheizung kann im Sommer auch zur (sanften) Bodenkühlung genutzt werden (Change-over). Es muss lediglich ein zusätzlicher Wärmeübertrager als Netztrennung zwischen heizen und kühler installiert werden. Kondensatbildung vermeiden (Taupunktregelung)!

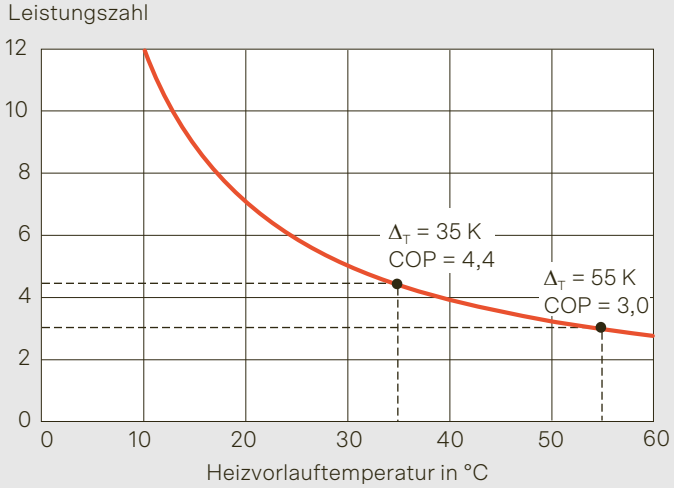


Bild 5.2: Verlauf der Leistungszahl in Abhängigkeit der Heizvorlauftemperatur (°C) einer Wärmepumpe mit Erdkollektor (0 °C) und Fussbodenheizung (Winter).

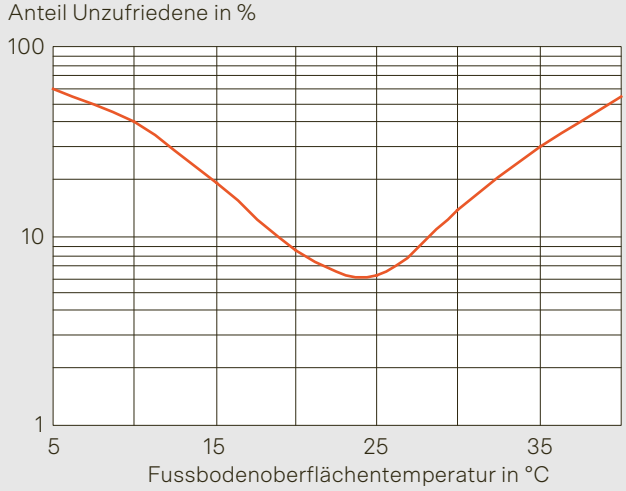


Bild 5.3: Prozentsatz unzufriedener Personen, die leichte Hausschuhe tragen, in Funktion der Fussbodenoberflächentemperatur.

Nachteile
- Trägheit durch den Einbau im Unterlagsboden
- Wärmeabgabesystem ist nach der Erstellung nicht mehr zugänglich.

Die Reduktion des Energiebedarfs durch die seit den 1980er-Jahren eingeführten Energiegesetze hat einen direkten Einfluss auf den Wärmeleistungsbedarf und die Auslegung von Raumheizungssystemen. In der Folge können die Vorlauftemperaturen zum Teil massiv gesenkt werden. Mit der tiefen Vorlauftemperatur erreichen wir bei der Wärmepumpe einen effizienteren Energieeinsatz.
Die gängige Vorstellung von «Fussbodenheizung gleich warmer Fussboden» entspricht nicht der Realität. Es ist die Pflicht der Planer und Installateure, Architekten und Bauherrschaften darüber zu informieren, dass die tiefen Vorlauftemperaturen für die Materialwahl des Fussbodenbelages eine nicht zu unterschätzende Bedeutung hat. Denn Fussbodenheizungen führen häufig aufgrund kalter Oberflächen zu Reklamationen (siehe Bild 5.3).
Bild 5.4 zeigt sehr eindrücklich den Wärmeabfluss aus dem Fuss bei unterschiedlichen Materialien der Fussbodenoberfläche.

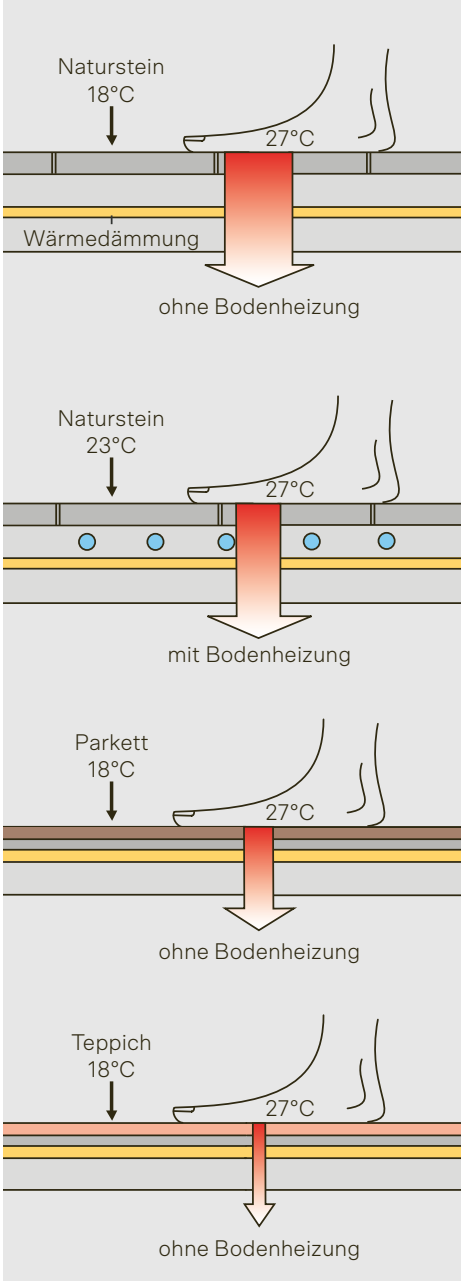


Bild 5.4: Wärmeabfluss vom Fuss bei unterschiedlichen Bodenbelägen.

Thermoaktive Bauteilsysteme
Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) sind Bauteile, die als Teil der Raumumschliessungsflächen über ein integriertes Rohrsystem mit einem Heiz- oder Kühlmedium beaufschlagt werden können und so die Beheizung oder Kühlung des Raumes ermöglichen. Die Konstruktionsvielfalt reicht nach diesem Verständnis von Heiz- beziehungsweise Kühldecken über Geschosstrenndecken mit kernintegrierten Rohren bis hin zu Fussbodenheizungen. Die darin enthaltenen (extrem) trägen Systeme werden bewusst eingesetzt, um Energieangebot und Raumenergiebedarf unter dem Aspekt der rationellen Energieanwendung zeitlich zu entkoppeln, z. B. aktive Bauteilkühlung in der Nacht, passive Raumkühlung über den kühlen Bauteil am Tage. Gebäude- und Anlagenkon-

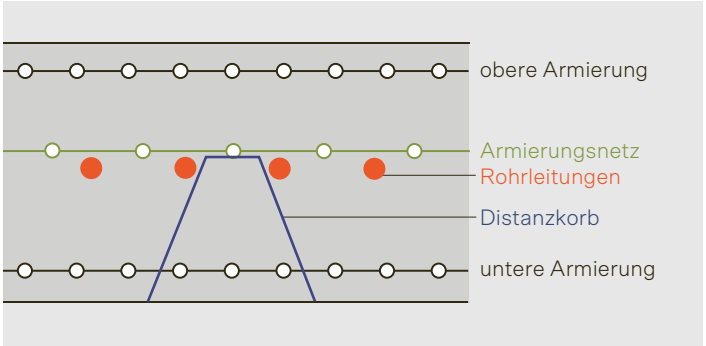


Bild 5.5: Detailschnitt TABS.

zepte, die träge reagierende thermoaktive Bauteilsysteme vorsehen, setzen im kompetenten und verantwortungsvollen Planungsprozess den Einsatz von modernen Gebäudesimulationswerkzeugen voraus, um fundierte Aussagen über Behaglichkeit und Energiebedarf treffen zu können.
Entscheidend ist der Wärmeübergang: Für den Wärmeaustausch zwischen thermoaktiven Bauteilen und dem Raum kann mit einem kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten (α) für Strahlung und Konvektion gerechnet werden. Bei horizontalen oder vertikal nach oben gerichteten Wärmeströmen beträgt dieser kombinierte Koeffizient ca. 7 bis 8 W/m²K (durch Konvektion ca. 2 bis 3 W/m²K, jener durch Strahlung ca. 5 W/m²K). Beispielsweise ergibt dies bei einem typischen Temperaturunterschied zwischen Bauteiloberfläche und Raumluft von 6 K (Bauteiloberflächentemperatur von 19 °C und Raumlufttemperatur von 25 °C) einen Wärmeübergang von rund 50 W/m². Wirkt eine Wärmeleistung von 50 W/m² während 24 Vollbetriebsstunden der Bauteilkonditionierung, so ergibt sich eine Wärmemenge von 1,2 kWh/m², die pro Tag an den Raum abgegeben werden kann.

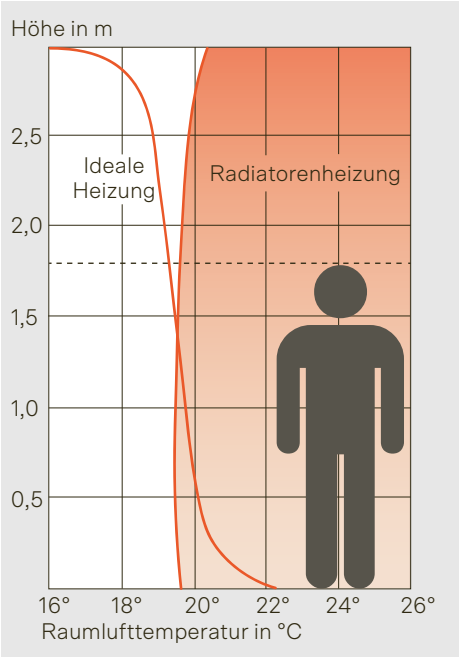


Bild 5.6: Temperaturverlauf mit Radiatorenheizung.

Heizkörperheizung

Vorteile

- Reagiert schnell auf Laständerungen.
- Wärmeabgabesystem ist jederzeit zugänglich.
- Kaltluftabfall an kalten Oberflächen kann je nach der Platzierung des Heizkörpers vermieden werden.
- Hohe Flexibilität bei Umbauten, da Heizkörper einfach demontiert und versetzt werden können.

Nachteile

- Kleinere Wärmeleistung bei tiefen Vorlauftemperaturen
- Schlechtere Temperaturverteilung über die Raumhöhe (Bild 5.6)
- Kalter Boden bei Steinplatten
- Benötigt relativ grosse Heizkörperflächen.
- Mit diesem System kann nicht gekühlt werden.

Auch bei Heizkörperheizungen verändern sich die Heizflächen (Fläche, die aktiv zur Wärmeabgabe beiträgt) in Abhängigkeit der Systemtemperaturen und des Heizbedarfs, wobei hier Grenzen bezüglich Ansichtsfläche (Fläche, mit der die Heizfläche von vorne wahrgenommen wird) und Materialeinsatz gesetzt werden.

Planungshinweise

- Tiefstmögliche Vorlauftemperaturen wählen (Niedertemperatur-Heizkörper).
- Gesetzliche Rahmenbedingungen (maximale Vorlauftemperaturen) beachten.
- Bei der Kältemittelwahl muss die Temperaturdifferenz berücksichtigt werden (Temperaturgleit).
- Maximale Vorlauftemperatur der im Estrich oder im Unterlagsboden verlegten Leitungen beachten (SIA-Normen).

5.2 Raumlufttechnische Anlagen

Luftheizung

Systeme

Die Luftheizung als Zusatzfunktion einer Wohnungslüftung (oft auch Komfortlüftung genannt) ist für Minergie-P- und Passivhäuser eine mögliche Alternative zu den wasserführenden Wärmeabgabesystemen. Ihr Hauptvorteil liegt darin, dass auf ein separates, wasserführendes Heizsystem verzichtet werden kann. Voraussetzung ist eine äusserst sorgfältige Planung.

Vorteile

- Reagiert schnell auf Laständerungen
- Wärmeabgabesystem ist bei nicht einbetonierten Systemen jederzeit zugänglich.
- Kein zusätzliches Verteilsystem notwendig (Nutzung des Lüftungssystems zu Heizzwecken)

Nachteile

- Schlechtere Temperaturverteilung über die Raumhöhe
- Kalter Boden bei Steinplatten
- Möglicher Kaltluftabfall an den kalten Oberflächen
- Hygiene im Luftkanalnetz
- Höhere Verflüssigungstemperatur notwendig (schlechterer COP)
- Wasser hat eine um den Faktor 3200 höhere Wärmekapazität als Luft (Volumen bezogen), entsprechend sind Lüftungen weniger energieeffizient als wasserführende Systeme (hohe Luftvolumenströme notwendig).
- Gefahr trockener Luft

Planungshinweise

- Tiefstmögliche Zulufttemperaturen wählen. Jedoch muss sichergestellt sein, dass keine Zugserscheinungen auftreten.
- Bei der Kältemittelwahl muss die Temperaturdifferenz berücksichtigt werden (Temperaturgleit).
- Zuluftöffnung im Aufenthaltsbereich meiden

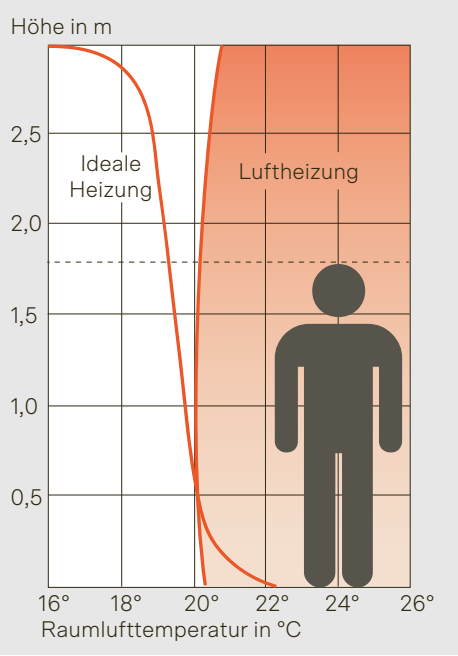


Bild 5.7: Temperaturverlauf mit Luftheizung.

5.3 Trinkwarmwasser

Systeme

Die Wassererwärmung mittels Wärmepumpe kann grundsätzlich in zwei Systeme unterteilt werden.

- Indirekte Erwärmung: Das Wasser wird indirekt durch einen oder mehrere Wärmeübertrager vom Heizsystem erwärmt.
- Direkte Erwärmung: Das Wasser wird direkt durch einen oder mehrere Wärmeübertrager vom Kältekreislauf erwärmt.

Selbstverständlich sind auch beide Systeme kombinierbar (z. B. Warmwasser-Wärmepumpe, oft als Wärmepumpen-Boiler bezeichnet).
Eine Legionellenschaltung wird grundsätzlich nicht mehr empfohlen, weder täglich noch wöchentlich. Je nach Gebäudenutzung, beispielweise bei Gesundheitseinrichtungen, Beherbergungsanlagen, Schulen und Weiteren sollte dies separat betrachtet werden. Der Fokus für die Prävention von Legionellen liegt heute auf dem Verteilsystem und nicht auf dem Speicher.

Indirekte Erwärmung

Vorteile

- Einfache Einbindung mit standardisierten hydraulischen Schaltungen
- Hohe Verfügbarkeit von Standardkomponenten

Nachteile

- (Gleichzeitiger) Parallelbetrieb Heizung und Wassererwärmung nur bei tieferem Gesamtwirkungsgrad der Anlage möglich
- Tieferer Wirkungsgrad wegen zusätzlichem Wärmeübertrager
- Tiefere Wassertemperaturen wegen zusätzlichem Wärmeübertrager

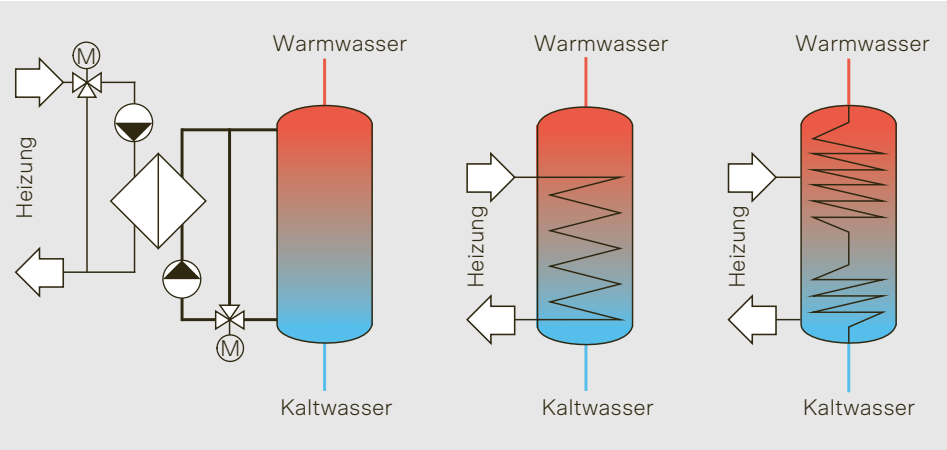


Bild 5.8: Systeme mit indirekter Wassererwärmung.

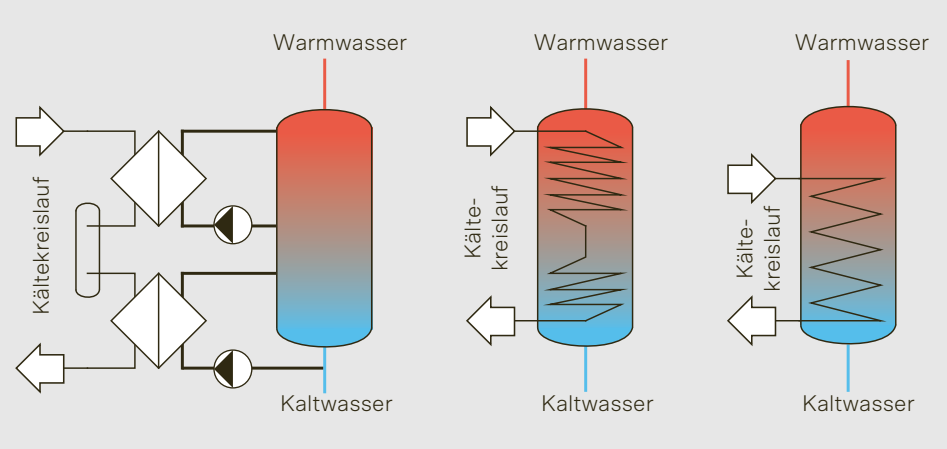


Bild 5.9: Systeme mit direkter Wassererwärmung.

Typische Beispiele für indirekte Nutzung:
- Speicher mit aussen liegendem Wärmeübertrager
- Register-Speicher
- Kombi- oder Spiro-Speicher

Hinweis: Eine Warmwasservorrangschaltung mit angepasstem Temperaturniveau (z. B. 55 °C für Warmwasserladung, 40 °C für Heizbetrieb) ist dem (gleichzeitigen) Parallelbetrieb von Heizung und Wassererwärmung vorzuziehen. Damit kann die Wärmepumpe im jeweils optimalen Betriebspunkt (tiefstmögliche Austrittstemperaturen; grösstmögliche Effizienz) arbeiten.

Direkte Erwärmung

Vorteile
- Höherer Wirkungsgrad
- Temperaturgerechte Wärmenutzung durch Enthitzen, Verflüssigen und Unterkühlen des Kältemittels

Nachteile
- Kältemittelseitig sind getrennte Wärmeübertrager für Heizung und Trinkwassererwärmung von Vorteil.
- Grössere Kältemittelinhalte
- Höhere Kalkausscheidung, dadurch häufigere Reinigung der Wärmeübertrager (Enthitzer, Verflüssiger)
- Öl-Kälte-Kreislauf muss lebensmitteltauglich ausgeführt sein (doppelwandige Rohre mit Kältemittelfühler).

Temperaturgerechte Wärmeauskopplung: Der Temperaturhub bei der Wassererwärmung ist im Vergleich zur Heizwassererwärmung meistens wesentlich höher. Dieser Umstand kann insofern genutzt werden, als dass bei der Auslegung der Wärmepumpe und der hydraulischen Einbindung die Enthitzungs-, Verflüssigungs- und Unterkühlungswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus entnommen werden. Diese Optimierung der Wärmeentnahme kann mit unterschiedlichen Systemen umgesetzt werden.
- Getrennte Wärmeübertrager (Enthitzer, Verflüssiger, Unterkühler).
- Konstruktive Massnahmen zur Nutzung der Unterkühlung und Enthitzung im Verflüssiger.

Typische Beispiele für indirekte Erwärmung sind:
- Speicher mit aussen liegendem Verflüssiger und Unterkühler
- Speicher mit getrennten Register-Zonen für Enthitzung, Verflüssigung und Unterkühlung
- Speicher mit einfachem Register

Planungshinweise
- Bei monovalenten Systemen ist der Einsatz einer elektrischen Notheizung zu prüfen (gesetzliche Vorgaben beachten).
- Zur Verhinderung von Legionellen sind im ganzen Warmwassernetz die notwendigen Vorkehrungen zu treffen.
- Die Wassererwärmung sollte ganzjährig über die Wärmepumpe erfolgen, nicht nur in der Heizsaison. Bei der Auslegung von Erdwärmesonden ist dies zu berücksichtigen.
- Zu hohe Temperaturen auf den Wärmeübertrager-Oberflächen fördern die Kalkausscheidung im zu erwärmenden Wasser.
- Dem Einfluss der Zirkulation ist Rechnung zu tragen.
- Die Schichtung im Warmwasserspeicher muss gewährleistet sein (bei bestehenden Speichern prüfen).
- Die Wärmeübertrager im Warmwasserspeicher müssen auf die maximale Leistung der Wärmepumpe ausgelegt werden. (Luft-Wasser-Wärmepumpen haben im Sommer fast die doppelte Leistung.)
- Aufstellort möglichst nahe beim Hauptverbraucher, um Verteilverluste und Ausstosszeiten gering zu halten.

Legionellen

Bakterien der Klasse Legionellen kommen fast überall in der Natur vor, auch im Trinkwasser. Durch Einatmen von Legionellen entsteht ein Erkrankungsrisiko («Legionellose»), vor allem für Lungenentzündungen. Ideale Lebensbedingungen finden Legionellen in einem Temperaturbereich zwischen 25 °C und 45 °C vor, eine Abtötung findet erst ab 55 °C statt. Die Norm SIA 385/1 (Ausgabe 2020) fordert deshalb Mindesttemperaturen von 55 °C am Speicheraustritt bei warmgehaltenen Wasserleitungen und 52 °C bei nicht warmgehaltenen Wasserleitungen. Bei der Verwendung von Propan als Kältemittel, können Austrittstemperaturen von 65 °C erreicht werden. Warmgehaltene Leitungen müssen an jedem Punkt im System auf mindestens 55 °C gehalten werden, an der Zapfstelle darf die Temperatur nicht unter 50 °C liegen. Kaltwasserleitungen sollten so installiert sein, dass sie sich nicht (z. B. durch parallellaufende Warmwasser- oder Heizungsleitungen) aufwärmen. Die Legionellenschaltung, bei der die Temperatur wöchentlich auf mindesten 60 °C aufgewärmt wird, wird aufgrund des Risikos unerwünschter Selektion von Legionellenstämmen mit einer erhöhten Temperaturtoleranz und Infektiosität gemäss SIA 385/1:2020 nicht mehr empfohlen. Trinkwarmwasser, das innert 24 Stunden genutzt wird, hat kein Risiko für Legionellenbildung, weshalb Speicher nicht zu gross gewählt werden sollten (Dimensionierung nach Norm SIA 385/2). Weitere Massnahmen am Verteilnetz sind:

- Trennung nicht genutzter Leitungsteile vom Netz
- Kurze Leitungslängen
- Gute Durchspülung (kein stagnierendes Wasser)
- Selten benutzte Entnahmestellen sowie Duschschläuche, Bad- und Duscharmaturen regelmässig spülen und reinigen.

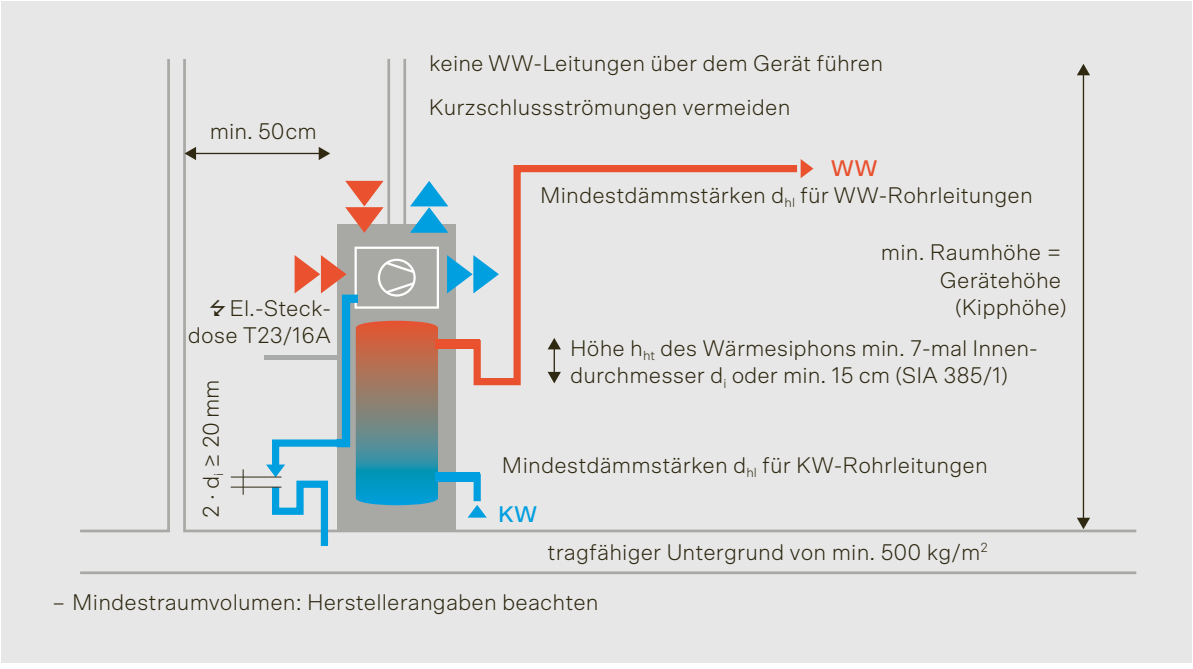


Bild 5.10: Aufstellung von Wärmepumpen-Wassererwärmern. (Quelle: GKS Merkblatt «Warmwasser-Wärmepumpen»).

5.4 Andere Systeme

Wärmepumpen-Wassererwärmer
Der Wärmepumpen-Wassererwärmer (Wärmepumpen-Boiler) ist eine kompakte Einheit, bestehend aus Luft-Wasser-Wärmepumpe und Speicher. Die benötigte Energie aus der Luft kann dem Aufstellungsraum, der Aussenluft, einem benachbarten Raum oder der Abluft des Gebäudes entzogen werden. Die Luft wird am Verdampfer abgekühlt und entfeuchtet, d. h. sie kann für Vorrats- oder Trocknungsräume genutzt werden. Richtige Dimensionierung, Siphonierung der Warmwasser-Anschlüsse (je nach Verteilsystem, z. B. bei Begleitheizungen nicht notwendig) und vollständige Wärmedämmung sorgen für hohe Energieeffizienz, wodurch sich die Geräte zum Ersatz von Elektroboilern anbieten. Nebst den Kompaktgeräte sind auch Split-Geräte zur einfachen Nutzung von Aussenluft als Wärmequelle erhältlich.

Planungshinweise
- Die Energiebilanz muss sehr gut abgeklärt werden, damit kein Wärmediebstahl aus beheizten Räumen entsteht.
- Sehr gute Wärmedämmung gegen beheizte Räume vorsehen.
- Zur Verhinderung von Legionellen sind im ganzen Trinkwassernetz die notwendigen Vorkehrungen zu treffen (siehe Kapitel 5.3, «Legionellen»).

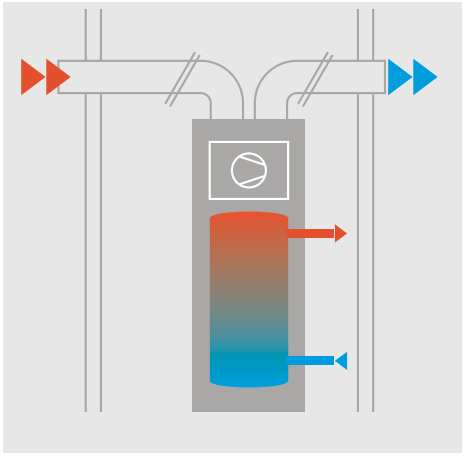


Bild 5.11: Wärmepumpen-Wassererwärmer mit Kanalsystem zur Nutzung von Aussenluft als Wärmequelle (Quelle: GKS-Merkblatt «Warmwasser-Wärmepumpen»).

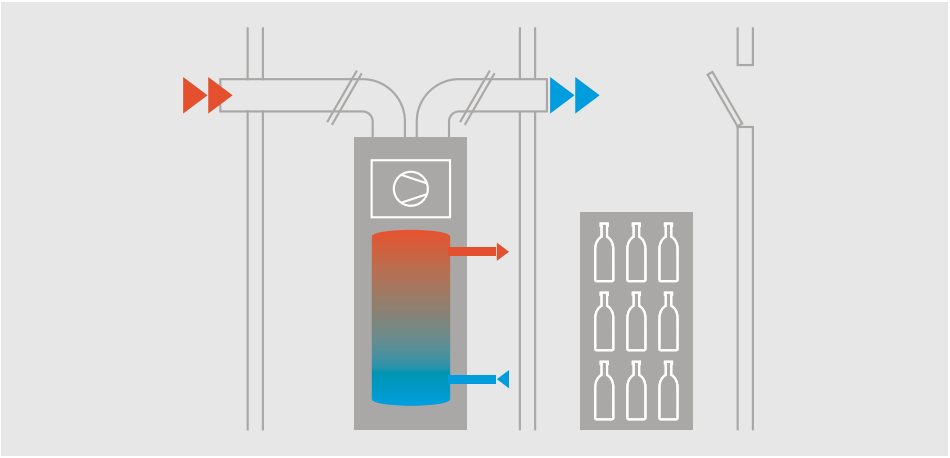


Bild 5.12: Aufstellung von Wärmepumpen-Wassererwärmer zur Raumkühlung.

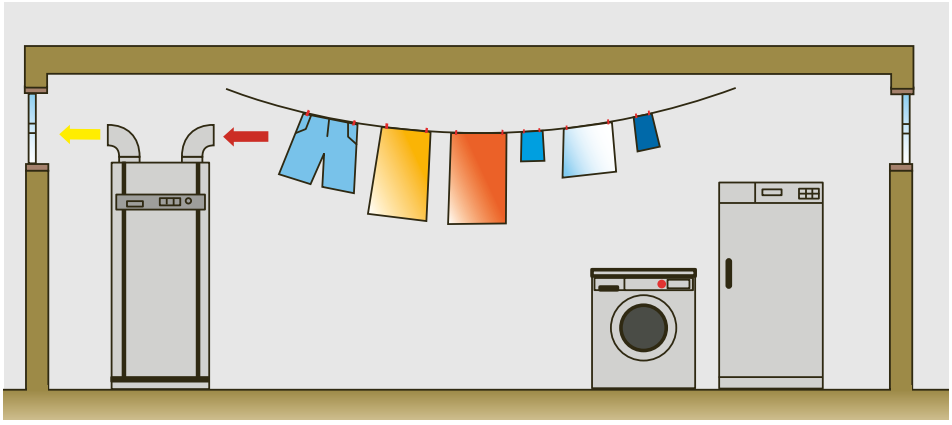


Bild 5.13: Aufstellung von Wärmepumpen-Wassererwärmer zur Raumentfeuchtung.

- Für Notfälle ist ein zusätzlicher Elektroheizstab vorzusehen.
- Kondensatablauf erforderlich.

Schwimmbadwasser-Wärmepumpe
Luft-Wasser-Wärmepumpe für die Beheizung von Aussenschwimmbädern in der warmen Jahreszeit.

Planungshinweise
- Kantonale Vorschriften betreffend Erstellung und Energie (z. B. Abdeckung der Wasserfläche) beachten.
- Materialwahl bei den Komponenten beachten.
- Aufstellungsort bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (Akustik, Verschmutzung, Grenzabstände) beachten.
- Vorschriften beachten (Bewilligungen).

Kapitel 6

Einbindung in die Gebäudetechnik

6.1 Grundsatz

Die Wärmepumpe wird ins hydraulische System der Gebäudetechnik eingebunden. Dabei soll die Schnittstelle so gestaltet werden, dass ein energieeffizienter, ökonomischer und störungsarmer Betrieb gewährleistet wird. Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

- Korrekte hydraulische Einbindung, ohne Serieschaltung von Umwälzpumpen u. ä.
- Allfällige hydraulische Entkoppelung der Wärmeerzeugung von der Wärmeverteilung mittels Speicher oder eventuell mit einer hydraulischen Weiche (wenn nötig)
- Spülen der Anlage vor dem Anschluss der Wärmepumpe.
- Wärmeleistungsabgabe (allenfalls inklusive Verluste des Verflüssigeranschlusses)
- Deckungsgrad der Wärmepumpe (wenn möglich monovalent)
- Möglicher beziehungsweise notwendiger Luftvolumenstrom bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Abtauprozess bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Betriebstemperaturen Wärmeabgabesystem (insbesondere maximale Vorlauftemperatur)
- Einsatzgrenzen der Wärmepumpe
- Anpassung an die Teillastfälle
- Die verfügbare Leistung aus der Umwelt (allenfalls inklusive Verdampferanschluss)
- Die Vorschriften für die Belüftung der Heizzentrale sowie die räumliche Trennung von Kessel und Wärmepumpe ist abhängig von Art und Menge des Kältemittels sowie des Zusatzenergieträgers.
- Schallschutz (innen und aussen)
- Bei Betriebsoptimierungen siehe Merkblatt SIA 2048 (Checklisten)

6.2 Betriebsarten

Monovalenter Betrieb

Beim monovalenten Betrieb stellt die Wärmepumpe in allen möglichen Betriebszuständen die erforderliche Heizleistung zur Verfügung. Die Wärmepumpe muss somit auf den maximalen

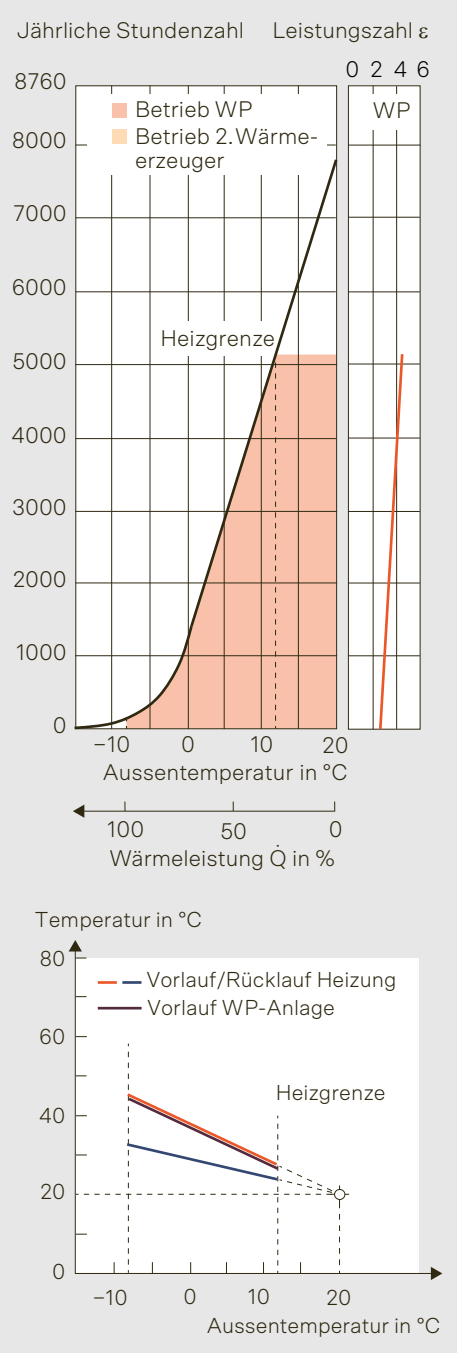


Bild 6.1: Monovalenter Betrieb.

Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes sowie für die maximal notwendige Vorlauftemperatur ausgelegt werden (Bild 6.1).

Bivalenter Betrieb

Kann oder soll die Wärmepumpe nicht die gesamte Heizleistung erbringen, so wird ein zweiter Wärmeerzeuger benötigt. In diesem Fall wird von einem bivalenten System respektive bivalentem Betrieb gesprochen.

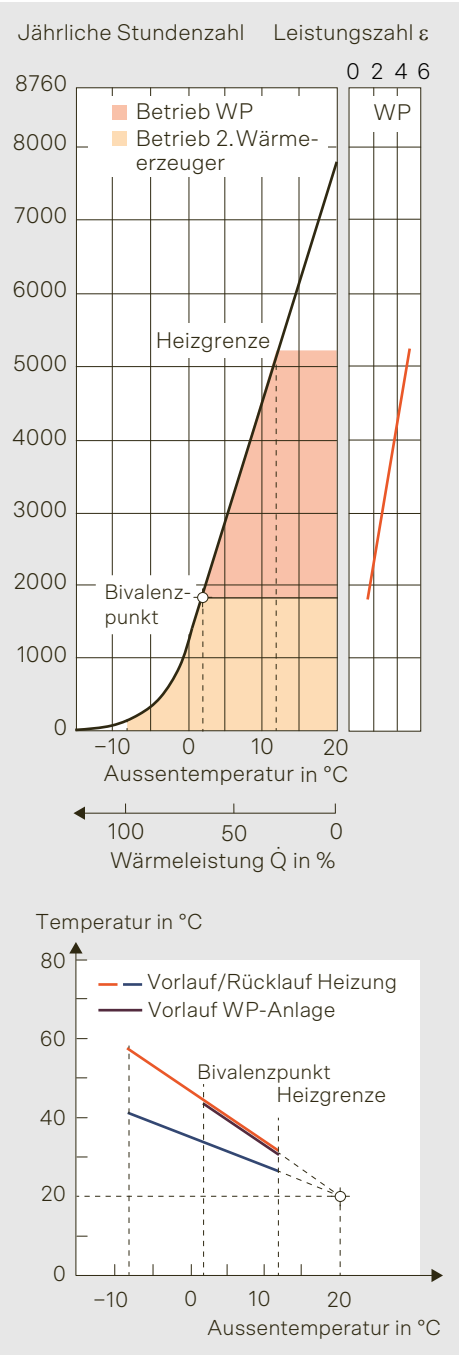


Bild 6.2: Bivalent-alternativer Betrieb.

Der Betriebspunkt bis zu dem die Wärmepumpe die Heizleistung alleine erbringt, ist abhängig von der Aussenlufttemperatur. Dieser wird Bivalenzpunkt, die zugehörige Temperatur «Bivalenztemperatur» genannt. Der Bivalenzpunkt ist von verschiedenen Kriterien abhängig:

- Die erforderliche oder mögliche elektrische Anschlussleistung
- Maximale Vorlauftemperatur
- Platzbedarf zweiter Wärmeerzeuger
- Wärmequellentemperaturen

Bei grösseren Anlagen auch

- Wirtschaftlichkeit
- Redundanz

Hinweise

- Für den Öltank respektive Holzlagerraum, Heizkessel, Speicher und Kamin einer Zusatzheizung ist mehr Platz notwendig.
- Bivalente Wärmeerzeugersysteme sind bei Kleinanlagen (EFH, kleine MFH) möglichst zu vermeiden (zu hohe Komplexität).

Zu unterscheiden sind zwei Betriebsarten.

Bivalent-alternativer Betrieb

Die Wärmepumpe deckt den Wärmeleistungsbedarf bei höheren Aussenlufttemperaturen (über dem Bivalenzpunkt) ab. In der Zeit mit tiefen Aussenlufttemperaturen übernimmt ein alternativer Wärmeerzeuger (Holz-, Gas-

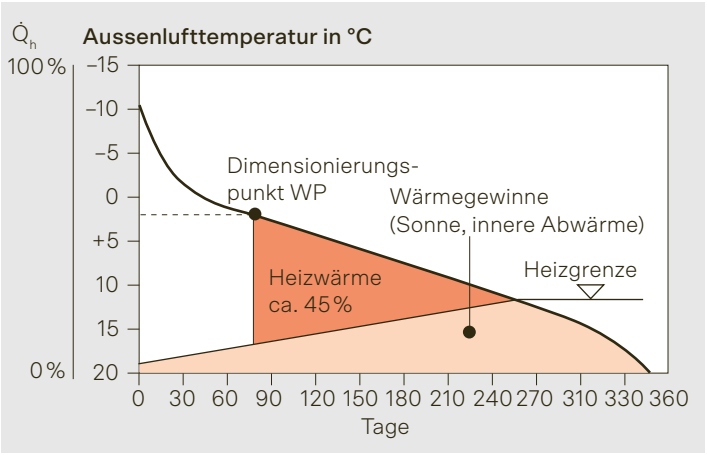


Bild 6.3: Bivalent-alternativer Betrieb.

oder Ölkessel) die Deckung des Wärmeleistungsbedarfs alleine. Die Wärmepumpe muss auf den Bivalenzpunkt, der zweite Wärmeerzeuger auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes ausgelegt werden (Bild 6.2).

Bivalent-paralleler oder bivalent-teilparalleler Betrieb

Bei der bivalent-teilparallelen Betriebsweise arbeiten die Wärmeerzeuger zeitweise gemeinsam. Die Wärmepumpe deckt den Wärmeleistungsbedarf bei höheren Aussentemperaturen (über dem Bivalenzpunkt) ab.
Unterhalb des Bivalenzpunktes, das heisst bei tieferen Aussenlufttemperaturen, wird der zweite Wärmeerzeuger (Holz-, Gas- oder Ölkessel) zugeschaltet. In dieser Phase arbeiten die beiden Wärmeerzeuger im Parallelbetrieb (Bild 6.4).
Bei teilparallelem Betrieb wird die Wärmepumpe ab einer bestimmten Aussenlufttemperatur ganz abgestellt. Dieses gilt vor allem für Luft-Wasser-Wärmepumpen. Der zweite Wärmeerzeuger (Kessel) muss somit nur bei teilparallelem Betrieb auf die Auslegeleistung ausgelegt werden.

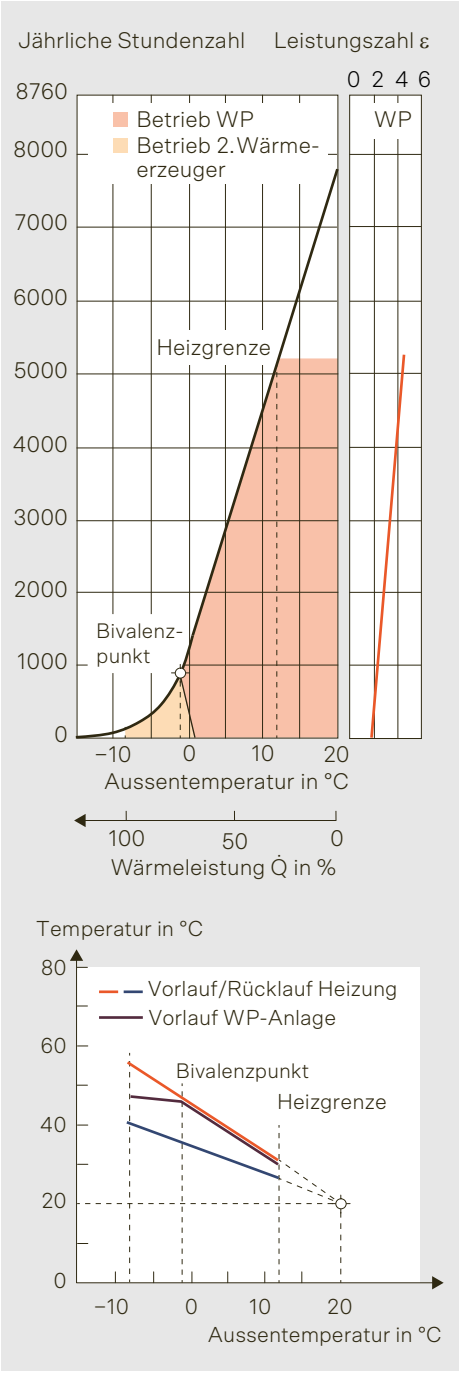


Bild 6.4: Bivalent-paralleler oder bivalent-teilparalleler Betrieb.

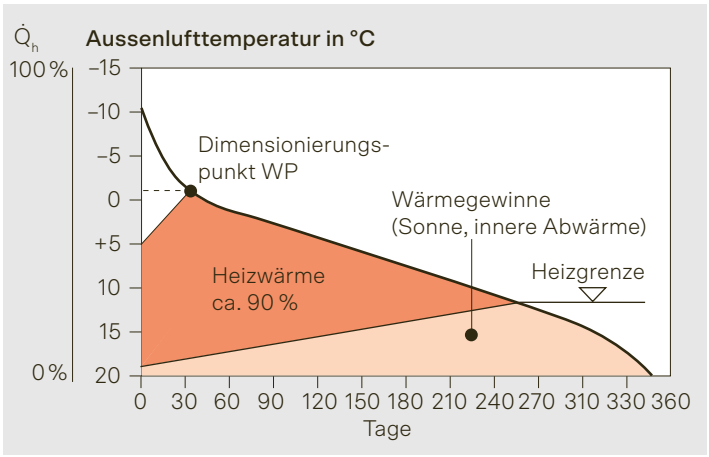


Bild 6.5: Bivalent-paralleler Betrieb.

6.3 Hydraulik

Temperaturdifferenz und Volumenstrom über den Wärmeübertragern
Die Wärmeleistung und die Temperaturdifferenz über den Wärmeübertragern bestimmt die Fördermenge, die Förderhöhe und den Stromverbrauch der zugeordneten Umwälzpumpen oder Ventilatoren. Wärmeabgabesysteme werden je nach erforderlicher Heizmitteltemperatur zwischen maximal 40 °C/30 °C bei Heizkörpern (bei Erneuerungen maximal 50 °C möglich) und mindestens 26 °C/22 °C bei Flächenheizungen ausgelegt (maximal 35 °C). Selbstregelnde Bodenheizungen (maximal 30 °C Vorlauftemperatur) benötigen keine Einzelraumregulierung und daher auch keine hydraulische Entkopplung.

Hydraulische Entkopplung: Durch die Reduktion der Gebäudelast, zum Beispiel bei höheren Aussenlufttemperaturen, verringert sich der Verbrauchermassenstrom. Um dem veränderlichen Verbrauch gerecht zu werden, ist bei Wärmepumpen ohne modulierenden Betrieb eine hydraulische Entkopplung in Form eines Speichers oder eines Bypasses erforderlich (Bild 6.6). Wärmepumpen mit modulierendem Betrieb können beispielsweise nur mit einer hydraulischen Weiche betrieben werden.

Wärmespeicher: Mit einem Wärmespeicher können u. a. Sperrzeiten des Elektrizitätsversorgungsunternehmens überbrückt werden. Es ist zweckmässig, die Speicher wie folgt zu unterscheiden:
- Technischer Speicher zur hydraulischen Trennung und zur Gewährleistung einer maximal zulässigen Schalthäufigkeit.
- Energie-Wärmespeicher zur Speicherung von Wärmeenergie zur Spitzenabdeckung und Überbrückung von Sperrzeiten und damit minimalen Vergrösserung des Anlageinhaltes (Speichermasse).
- Hydraulische Weiche zur Abkopplung des Wärmeerzeuger-Heizkreises vom Verbraucherkreis, dadurch keine Serieschaltung von Umwälzpumpen.

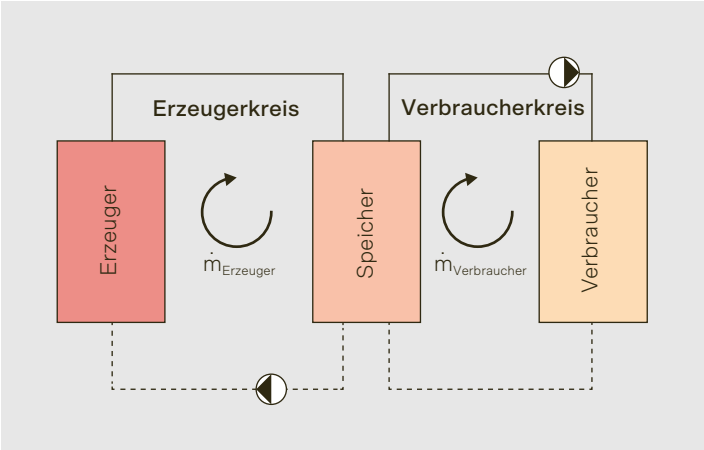


Bild 6.6: Der Massenstrom über dem Erzeugerkreis muss immer grösser dimensioniert sein als der Massenstrom über den Verbrauchern: $m_{Erzeuger} > m_{Verbraucher}$

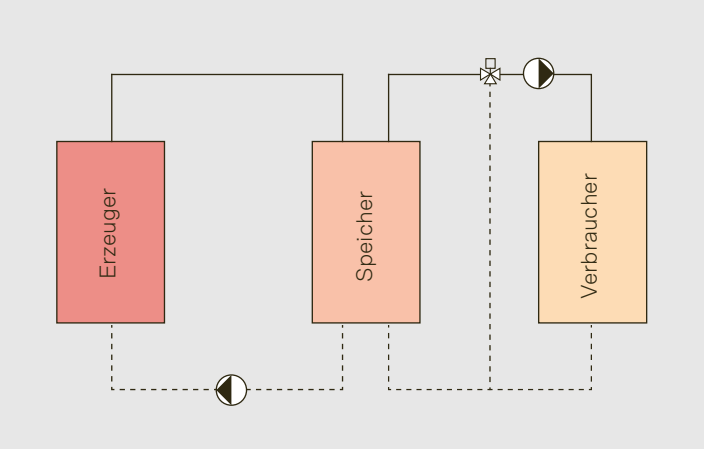


Bild 6.7: Hydraulische Schaltung für Stufenladung.

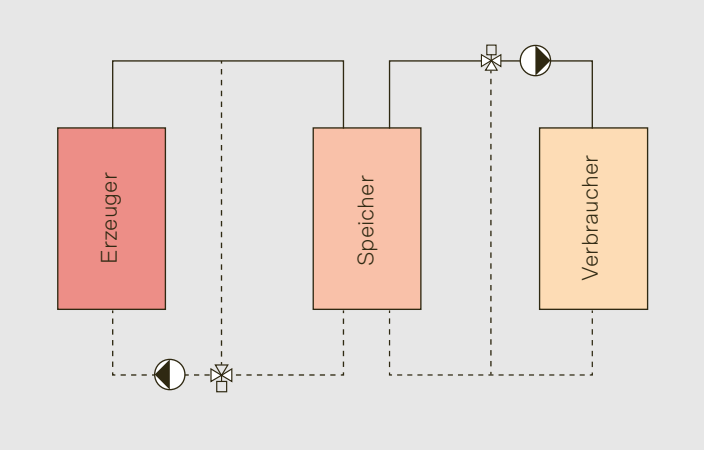


Bild 6.8: Hydraulische Schaltung für Schichtladung.

Ladestrategien für Speicher

- Stufenladung: Bei einer Stufenladung des Wärmespeichers ist der Massenstrom über den Wärmeerzeuger konstant. Der Wärmeerzeuger kann die Rücklauftemperatur nur um eine bestimmte Temperaturdifferenz anheben. Damit wird die Speichertemperatur bei jedem Durchgang um diese Differenz angehoben. Dies führt vor allem im ersten Ladezyklus zu besseren Leistungszahlen als bei der Schichtladung. Die Speicherendtemperaturen schwanken aber deutlich, je nach Ausgangszustand vor der Speicherladung (Bild 6.7).
- Schichtladung: Bei der Schichtladung des Wärmespeichers wird die Wärmeerzeugertemperatur (Speicher-Ladetemperatur), unabhängig von der Rücklauftemperatur des Verbrauchers, mit einer Laderegulierung auf einen bestimmten Sollwert geregelt. Die Sollwerttemperatur kann auf einen konstanten Wert eingestellt oder gleitend, z. B. nach Aussenlufttemperatur, geregelt werden. Die Schichtladung hat den Vorteil, dass der Speicher mit einer definierten Temperatur geladen wird und somit für den Verbraucher eine definierte Temperatur zur Verfügung steht (Bild 6.8).

Hinweis: Für Kleinanlagen hat sich die die Stufenladung als betriebssichere und energieeffiziente Variante etabliert. Entsprechend sollte für solche Anlagen diese Variante realisiert werden.

Planungshinweise

- Um die Laufzeit der Wärmepumpe zu verlängern, ist eine genügende thermische Speichermasse erforderlich. Diese kann in der Baumasse (Bodenheizung, TABS) oder durch einen technischen Speicher (Heizungspuffer) verfügbar sein. Im ersten Fall ist also – auch bei Fussbodenheizungen – ein Heizungspuffer nicht zwingend notwendig. Die Mindestlaufzeit pro Verdichterstart sollte rund 20 bis 30 Minuten betragen.
- Bei selbstregelnden Bodenheizungen ohne Thermostatventile ist ein präziser hydraulischer Abgleich besonders wichtig. Ideal ist der hydraulische Abgleich aller Bodenheizkreise im Tichelmann-System.
- Ein technischer Speicher (kleiner Wasserinhalt) wird vor allem als hydraulische Weiche eingesetzt (Beispiel: mehrere Heizgruppen).
- Hydraulische Wärmespeicheranschlüsse sind mit einem Thermosiphon anzuschliessen und zu dämmen (zur Reduzierung der Speicherverluste).

Frischwasser-Module

Frischwasser-Module sind externe Plattenwärmeübertrager (oder interne Spiralrohrwärmeübertrager), die das Trinkwarmwasser im Durchlaufprinzip im Moment der Zapfung erwärmen. Die Energie dazu stammt aus einem Speicher (Bild 6.9). Der Vorteil dieser Lösung liegt im Wesentlichen in der Hygiene: Es wird – ausser in den Verteilleitungen – kaum Warmwasser gespeichert. Dadurch kann die Warmwassertemperatur tief gehalten werden, was der Effizienz der Wärmepumpe zu Gute kommt.

Vorteile

- Tiefe Warmwassertemperaturen möglich
- Kein stehendes Trinkwarmwasser

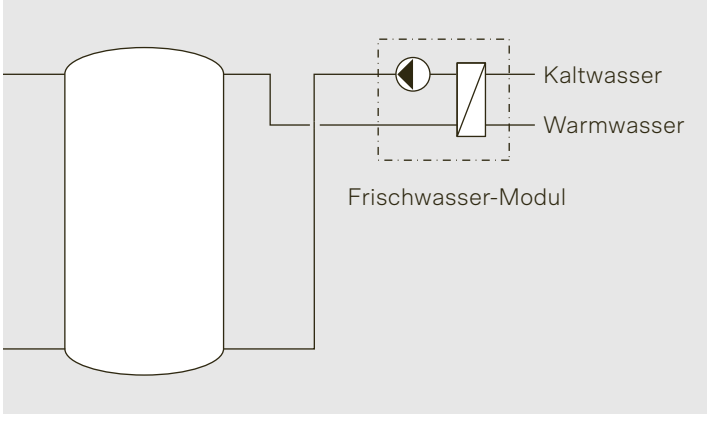
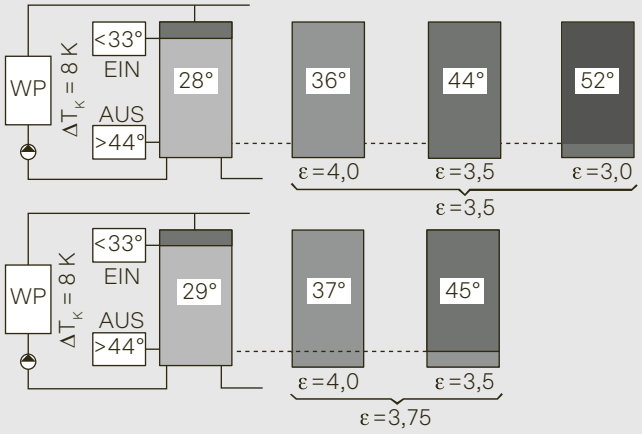


Bild 6.9: Frischwasser-Modul mit Anbindung an Speicher. Der interne Aufbau des Moduls ist hier vereinfacht dargestellt.

Stufenladung



Beschreibung
Der Speicher wird stufenweise in mehreren Durchgängen mit steigender Verflüssigeraustrittstemperatur geladen. Der Speicher kann nicht auf eine exakte Endtemperatur geladen werden. Diese schwankt um die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger.

Vorteile
- Tiefere Verflüssigungstemperatur
- Geringere Kosten (keine Laderegelung)

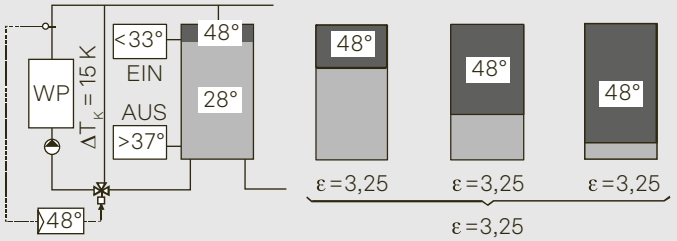
Nachteile
- Speichertemperatur variabel
- Vorlauftemperaturschwankungen beim Laden
- Unterdeckung im ersten Durchgang
- Grössere Verflüssigerpumpenleistung
- Speicherkapazität nicht maximal genutzt
- Schlechtere Schichtung
- Rückwirkung auf Verdampfer (spez. Anfahren!)

Verflüssigerdurchfluss $\dot{V}_K$ bei Verflüssiger-/Heizleistung Φ_K
$\dot{V}_K$ (m³/h) = 0,86 · Φ_K (kW) / ΔT_K (K)
Es muss ein Kompromiss gefunden werden:
- Möglichst grosser Durchfluss, damit Verflüssigungstemperatur tief, Speichertemperaturschwankung klein und Speicherkapazität gross
- Möglichst kleiner Durchfluss, damit Verflüssigerpumpenleistung klein

Empfehlung Auslegetemperaturdifferenz Verflüssiger ΔT_K
Wärmequelle annähernd konstant
- monovalent $\Delta T_K = 0{,}5 \cdot \Delta T_{Auslegung}$
- bivalent-parallel $\Delta T_K = 0{,}7 \cdot \Delta T_{Bivalenz}$
- bivalent-alternativ $\Delta T_K = 0{,}7 \cdot \Delta T_{Bivalenz}$

Wärmequelle stark variabel
- monovalent $\Delta T_K = 0{,}5 \cdot \Delta T_{Auslegung}$
- bivalent-parallel $\Delta T_K = 0{,}5 \cdot \Delta T_{Bivalenz}$
- bivalent-alternativ $\Delta T_K = 0{,}5 \cdot \Delta T_{Bivalenz}$

Schichtladung



ε = Leistungszahl der Wärmepumpe im jeweiligen Betriebszustand
Hinweis: Der Unterschied der Leistungszahlen von Stufenladung und Schichtladung ist weniger gross als hier dargestellt, wenn auch der zusätzliche Pumpenstromverbrauch der Stufenladung berücksichtigt wird.

Beschreibung
Der Speicher wird in einem Durchgang mit konstanter Verflüssigeraustrittstemperatur schichtend geladen. Es kann exakt auf einen bestimmten Sollwert geladen werden. Dieser kann witterungsgeführt sein.

Vorteile
- Exakte Einhaltung der vorgegebenen Speichertemperatur
- Konstante Vorlauftemperatur garantiert
- Keine Unterdeckung
- Kleinere Verflüssigerpumpenleistung
- Maximale Nutzung der Speicherkapazität
- Bessere Schichtung
- Keine Rückwirkung auf den Verdampfer

Nachteile
- Höhere Verflüssigungstemperatur
- Höhere Kosten (Laderegelung)
- Schlechtere Effizienz

Verflüssigerdurchfluss $\dot{V}_K$ bei Verflüssiger-/Heizleistung Φ_K
$\dot{V}_K$ (m³/h) = 0,86 · Φ_K (kW) / ΔT_K (K)
Im Allgemeinen gilt:
- Bei annähernd konstanter Wärmequellenleistung kann auf minimalen Durchfluss dimensioniert werden (bei Witterungsführung evtl. höherer Durchfluss sinnvoll)
- Bei variabler Wärmequellenleistung muss in der Regel mit höherem Durchfluss gefahren werden

Empfehlung Auslegetemperaturdifferenz Verflüssiger ΔT_K
Wärmequelle annähernd konstant
- monovalent $\Delta T_K = \Delta T_{Auslegung}$
- bivalent-parallel $\Delta T_K = \Delta T_{Bivalenz}$
- bivalent-alternativ $\Delta T_K = \Delta T_{Bivalenz}$

Wärmequelle stark variabel
- monovalent $\Delta T_K = 0{,}5 \cdot \Delta T_{Auslegung}$
- bivalent-parallel $\Delta T_K = 0{,}7 \cdot \Delta T_{Bivalenz}$
- bivalent-alternativ $\Delta T_K = 0{,}7 \cdot \Delta T_{Bivalenz}$

Einschalttemperatur T_{EIN}
Damit auf der Wärmenutzungsseite kein «Leerdurchgang» auf Rücklauftemperaturniveau erfolgt, muss T_{EIN} mindestens so hoch wie die maximale Rücklauftemperatur sein. Durch Speicherverluste kann nach längerem Unterbruch eine zu tiefe Vorlauftemperatur auftreten, was sich aber normalerweise kaum störend auswirkt (Ausnahmen: Lüftung ohne WRG, Wassererwärmung). Bei Stufenladung kann eine zeitweilige Unterdeckung infolge zu tiefer Rücklauftemperatur während des ersten Durchgangs nicht verhindert werden.

Ausschalttemperatur T_{AUS}
$T_{AUS} \leq T_{K,MAX} - \Delta T_K$ mit der Bedingung $T_{AUS} > T_{EIN}$ (sonst kann Wasser zwischen T_{AUS} und T_{EIN} nicht aus dem Speicher!)
Mit Aussenluft als Wärmequelle ist ΔT_K stark variabel. Es muss der grösste vorkommende Wert eingesetzt werden. Wenn dabei die Bedingung $T_{AUS} > T_{EIN}$ nicht eingehalten werden kann, muss der Ausschaltpunkt (und evtl. auch der Einschaltpunkt) witterungsgeführt werden.

Ladetemperatur T_{Ladung}
Damit die Ausschaltung funktioniert, gilt: $T_{Ladung} > T_{AUS}$

Tabelle 6.1 (linke Seite): Stufen- versus Schichtladung. (Quelle: Ravel im Wärmesektor; Wärmepumpen, Heft 3, 1993).

Nachteile
- Kein Warmwasser bei Stromausfall
- Evtl. etwas höhere Kosten

Planungshinweise
- Sorgfältige Auslegung auf tatsächlichen Bedarf notwendig
- Eindeutige Trennung der Zonen für Warmwasser, Heizwasser und solare Vorwärmung mit Umschaltventilen in Vor- und Rücklauf
- Anschlüsse siphonieren
- Maximale Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten bei Speicheranschlüssen einhalten
- Zeitfenster für Warmwasserladung (2-mal 2 Stunden pro Tag) empfohlen
- Positionierung der Fühler beachten
- Warmwasser-Vorrang
- Verkalkung beachten
- Legionellenschutz (thermisch, UV-Bestrahlung) bei warm gehaltenen Leitungen
- Es sind geprüfte Lösungen (geprüfte Speicher, Wärmepumpen-Systemmodul) verfügbar, die eine gute Effizienz von Kombispeicheranlagen auch im Wärmepumpenbetrieb sicherstellen.

Kombispeicher

Kombispeicher sind Speicher, die sowohl Heizungswasser als auch Wärme für die Trinkwassererwärmung vorhalten. Sie sind sowohl bei Einbindung von Solarwärme, aber auch aufgrund des (gegenüber Lösungen mit zwei separaten Speichern) geringen Platzbedarfs interessant. Der Einbindung in das Gesamtsystem muss besondere Beachtung geschenkt werden, damit die Temperaturschichtung im Speicher erhalten bleibt und die Wärmepumpe die Wärme entsprechend den tatsächlichen Temperaturanforderungen des Verbrauchers bereitstellen kann. Zu beachten sind insbesondere die maximalen (schichtungserhaltenden) Volumenströme bei Beladung oder Entladung sowie Zirkulationsleitungen. Wird die Temperaturschichtung durch Durchmischung regelmässig zerstört, so wird der Energiebedarf stark erhöht.

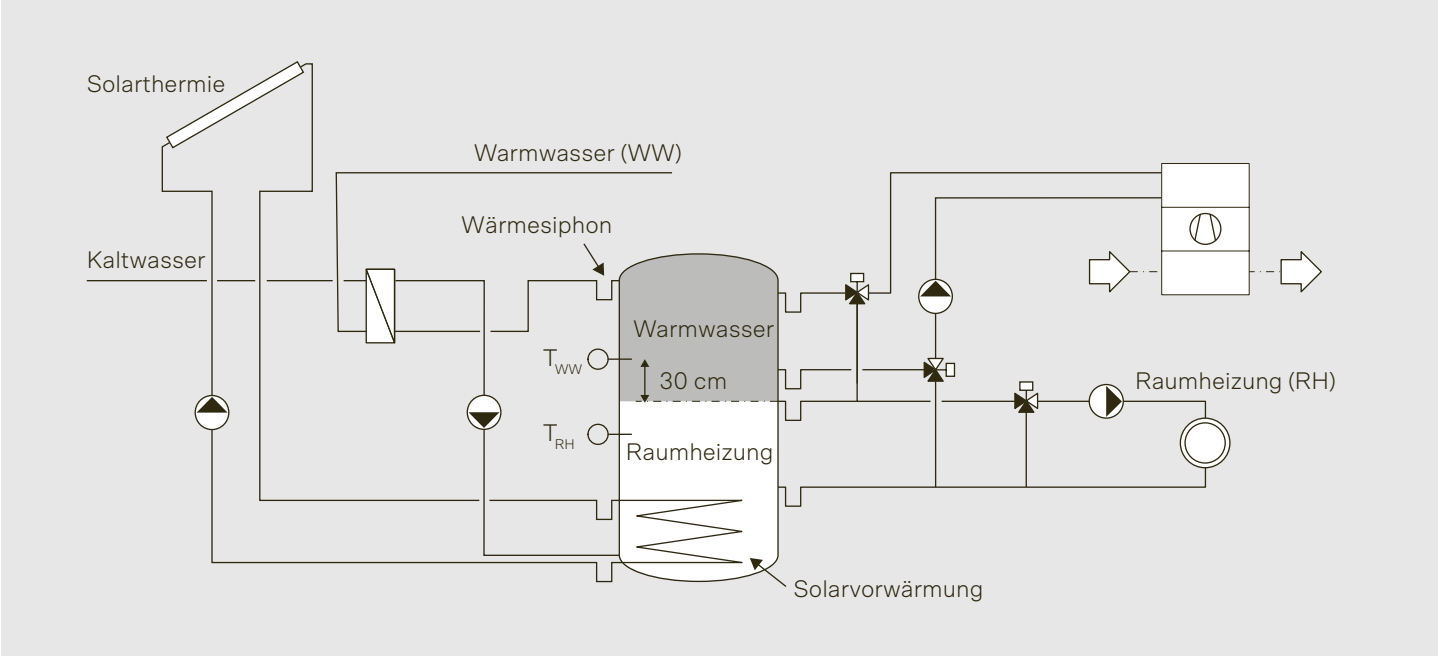


Bild 6.10: Kombispeicher und Wärmepumpen. Exemplarisches Schema mit Frischwasser-Modul. Der Plattenwärmeübertrager ist hier in korrekter Montageorientierung eingezeichnet (senkrecht, Warmseite unten).

Hydraulik bei passivem Kühlbetrieb

Direkte (passive) Kühlung mit Erdwärmesonden: Da das Erdreich im Sommer in der Regel kälter ist als die Umgebung, kann damit über eine Wand- oder Fussbodenheizung (Change-over-Bodenkühlung) respektive über ein TABS-System (thermoaktives Bauteilsystem) eine Raumkühlung erzielt werden. Damit lässt sich gleichzeitig das die Sonde umgebende Erdreich regenerieren.

Funktion: In den Solekreislauf wird ein Plattenwärmeübertrager eingebaut (Bild 6.11, Freecooling). Die Kühltemperatur wird über einen 3-Weg-Mischer geregelt und die Umwälzpumpe über einen Raumtemperaturfühler ein- und ausgeschaltet. Um Schwitzwasserbildung (Taupunktunterschreitung) an den Kühlflächen zu vermeiden, ist eine Vorlauftemperaturüberwachung erforderlich (minimal 18 °C).

Vorteile
- Einfacher Aufbau
- Zusätzliche Regeneration des Erdreiches
- Geringste Betriebskosten
- Effizient (nur Pumpenstrom notwendig)

Nachteile
- Eingeschränkte Kühlleistung

Wird die passive Kühlung nicht nur als kostengünstiger Zusatznutzen der Heizungsanlage angesehen, so muss die Erdwärmesonde auf die erforderliche Kühlleistung dimensioniert werden.

Richtwerte für Kühlleistungen bei der Wärmerückgabe:
- Aus Erdwärmesonde ca. 30 W/m

Richtwerte für Kälteleistungen beim Wärmeaufnahmesystem:
- Bei Wandkühlung ca. 50 W/m²
- Bei Fussbodenkühlung ca. 25 W/m²
- Bei Deckenkühlung (TABS) ca. 30 bis 40 W/m²

Hydraulik bei aktivem Kühlbetrieb

Kühlung durch Prozessumkehr im Kältekreis

Funktion: Durch ein 4-Weg-Umschaltventil im Kältekreis kann die Wärmepumpe im Sommer als Kältemaschine betrieben werden. Dazu wird ein Kältespeicher benötigt.
Die Kühltemperatur (Mindestkühltemperatur: Taupunkttemperatur) wird analog dem Heizfall über einen 3-Weg-Mischer geregelt und die Umwälzpumpe über einen Raumtemperaturfühler ein- und ausgeschaltet.

Vorteile
- Geringer Aufwand, da Wärmepumpe vorhanden
- Grosse Kühlleistung
- Zusätzliche Regeneration des Erdreiches bei Sole-Wasser-Wärmepumpen

Nachteile
- Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe
- Eine Wärmepumpe mit Möglichkeit zur Prozessumkehr ist erforderlich.

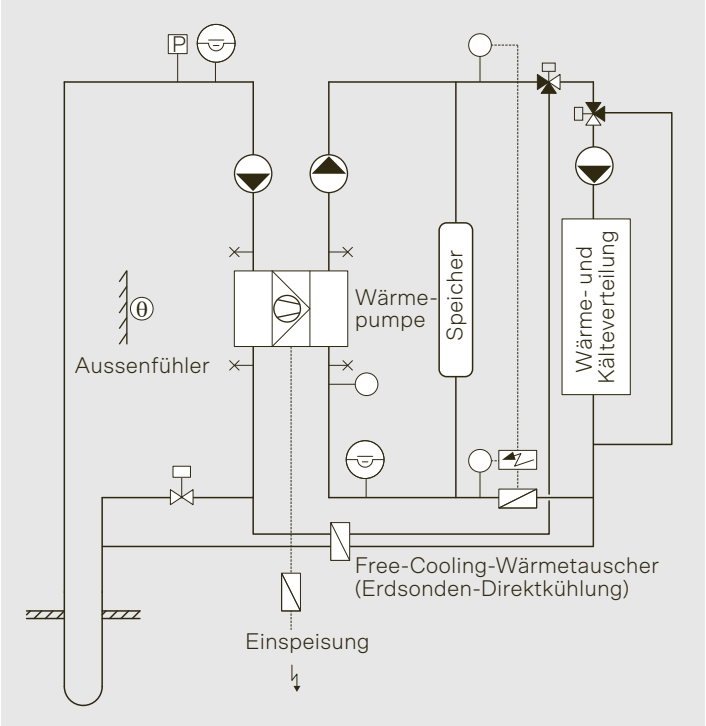


Bild 6.11: Direkte Kühlung mit Erdwärmesonden.

Kühlung durch Prozessumkehr in der Hydraulik

Funktion: Durch Umschalt-Amaturen wird der Heizkreis über den Verdampfer und der Wärmequellenkreis über den Verflüssiger geführt.

Vorteile
- Konventionelle Wärmepumpe verwendbar
- Geringer Aufwand
- Grosse Kühlleistung
- Zusätzliche Regeneration des Erdreiches

Nachteile
- Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe

Hinweise
Analog zur oben aufgeführten passiven und aktiven Kühlung über Erdwärmesonden lassen sich auch Grund- oder Oberflächenwasser zu Kühlzwecken nutzen. Achtung: Temperaturverhältnisse und gesetzliche Auflagen beachten. Vermehrt werden auch Luft-Wasser-Wärmepumpen mit der Möglichkeit zur aktiven Kühlung via Prozessumkehr angeboten. Photovoltaikstrom eignet sich besonders gut zum Antrieb einer Kältemaschine für Raumkühlung, da Last und Ertrag (Sonneneinstrahlung) meist gleichzeitig auftreten.

Planungshinweise
Es werden spezielle Thermostatventile benötigt, die für Heiz- und Kühlbetriebe geeignet sind. Übliche Thermostatventile für Heizungen schliessen bei hohen Raumtemperaturen.

6.4 Umwälzpumpen

Die Auslegung von Umwälzpumpen wird durch folgende Faktoren bestimmt:
- Auslegungsbetriebspunkt
- Volumenstrom
- Druckverlust
- Laufzeit
- Regelbarkeit (der Drehzahl)

Auslegungsbetriebspunkt
Massgebend für die Pumpenauslegung ist der gewählte Betriebspunkt, d. h. der maximal und minimal erforderliche Volumenstrom bei vorgegebenen Temperaturen (und Medium). Bei ändernden Betriebspunkten (z. B. Heizung mit Thermostatventilen) wenn möglich drehzahlgeregelte Umwälzpumpen verwenden.

Volumenstrom
Der Volumenstrom wird durch den Wärmeverbraucher respektive Wärmeerzeuger (Mindestvolumenstrom) bestimmt. Er wird berechnet mit der Formel:

$$\dot{V} = \frac{\Phi}{\rho \cdot c \cdot (\theta_{VL} - \theta_{RL})}$$

darin bedeuten:
$\dot{V}$ = Volumenstrom in m^3/s
Φ = Wärmeleistung in W (J/s)
ρ = Dichte des Medium in kg/m^3
c = Spezifische Wärmekapazität des Mediums in J/(kg K)
θ = Mediumtemperatur in °C

Für Wasser gilt ungefähr c = 4200 J/(kg K) und ρ = 1000 kg/m^3.

Druckverlust
Der Druckverlust in einem Kreislauf wird bestimmt durch die Grösse (Länge) des Netzes, den Umwälzvolumenstrom, die Rohrleitungsdurchmesser und die Einbauten. Es müssen sämtliche Anlagenteile berücksichtigt werden, die im entsprechenden Kreislauf einen Druckverlust verursachen. Die Pumpendiagramme geben vielfach die Förderhöhe der Pumpe an. Mit folgender Formel kann

der Druckverlust (Pa) in eine Förderhöhe (m) umgerechnet werden:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}$$

H = Förderhöhe in m Flüssigkeitssäule
Δp = Druckverlust in Pa
ρ = Dichte des Medium in kg/m^3
g = Erdbeschleunigung in m/s^2

Laufzeit
Umwälzpumpen dürfen nur in der Zeit, in der eine Wärmeleistung erzeugt oder abgegeben werden muss, in Betrieb sein (soweit es die Regelung erlaubt). Jede unnötige Betriebszeit der Umwälzpumpe benötigt elektrische Energie, reduziert die Energieeffizienz und verursacht unnötige Energiekosten. Die Pumpen können über die Regelung elektronisch oder über eine Schaltuhr angesteuert werden. Wenn es die Hydraulik erlaubt, können Umwälzpumpen drehzahlgeregelt werden. Damit wird nur der benötigte Massenstrom umgewälzt und Energie (respektive Energiekosten) eingespart.

Hinweise
- Als Dimensionierungskontrolle für Heizgruppenpumpen kann von einer elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpe im Bereich 1‰ der thermischen Heizleistung ausgegangen werden.
- Durch Reduktion des Massenstromes reduziert sich der Druckverlust gemäss Theorie in der 2. Potenz und der Antriebskraftbedarf in der 3. Potenz. Beispiel: Halber Massenstrom → $(½)^2$ = ¼ Druckverlust → $(½)^3$ = ⅛ Kraftbedarf.

Kapitel 7

Integration in Photovoltaiksysteme

7.1 Einleitung

Als einer der grössten Verbraucher im Gebäude eignet sich die Wärmepumpe mit ihrer hohen Flexibilität sehr gut für die Kombination mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen). Der Hauptfokus liegt in der Optimierung des Eigenverbrauchs, indem der Betrieb der Wärmepumpe möglichst gut auf die Produktion der PV-Anlagen abgestimmt wird. Weiterführende Informationen finden sich in [1].

Kennzahlen

Für die Optimierung des Eigenverbrauchs sind folgende Kennzahlen relevant:

E_{eig}	Eigenverbrauch (kWh)
E_{netz}	Netzbezug (kWh)
$E_{über}$	Überschuss (kWh)
E_{ges}	Gesamter Stromverbrauch (kWh)
E_{prod}	Eigenstromproduktion (kWh)

Der Eigenverbrauch E_{eig} ist der energetische Anteil des Stromverbrauchs, der gleichzeitig lokal produziert wird. E_{netz} ist der Strom, der aus dem Netz bezogen wird, $E_{über}$ wird ins Netz zurückgespeist. Bild 7.1 zeigt einen exemplarischen Tagesverlauf der elektrischen Produktion $P_{prod}(t)$ der PV-Anlage und des Gesamtverbrauchs $P_{ges}(t)$ eines Gebäudes. Die Flächen unter den Kurven entsprechen den energetischen Anteilen. Daraus können folgende Kennzahlen abgeleitet werden.

Der **Eigenverbrauchsgrad** gibt das Verhältnis des Eigenverbrauchs E_{eig} zur gesamten Produktion der PV-Anlage E_{prod} an.

$$r_{eig} = \frac{E_{eig}}{E_{prod}} = \frac{E_{ges} - E_{netz}}{E_{prod}} \qquad (1)$$

Das primäre Ziel der Eigenverbrauchsoptimierung ist die Maximierung des Eigenverbrauchsgrades. Diese Kennzahl sollte jedoch nicht einseitig optimiert werden, sondern immer im Zusammenhang mit den folgenden Kennzahlen:

Der **Autarkiegrad** gibt das Verhältnis des Eigenverbrauchs E_{eig} zum gesamten Stromverbrauch E_{ges} des Gebäudes an.

$$r_{aut} = \frac{E_{eig}}{E_{ges}} = \frac{E_{ges} - E_{netz}}{E_{ges}} \qquad (2)$$

Der Autarkiegrad zeigt, wie unabhängig ein Gebäude vom Stromnetz ist. Ein hoher Eigenverbrauch bedeutet nicht zwingend, dass auch der Autarkiegrad hoch ist. Um letzteren zu erhöhen, muss auch der Stromverbrauch ausserhalb der Produktionszeiten der PV-Anlage reduziert werden.

Der **solare Deckungsgrad der Wärmepumpe** betrachtet im Gegensatz zum Autarkiegrad nicht das gesamte Gebäude, sondern eben nur die Wärmepumpe. Er gibt das Verhältnis vom solar erzeugten Anteil $E_{eig,WP}$ zum gesamten Stromverbrauch E_{WP} der Wärmepumpe an.

$$r_{solar,\,WP} = \frac{E_{eig,\,WP}}{E_{WP}} \qquad (3)$$

Der solare Deckungsgrad der Wärmepumpe zeigt also, wie unabhängig der Betrieb der Wärmepumpe vom Stromnetz ist. Damit kann die Optimierung der Wärmepumpe separat beurteilt werden.

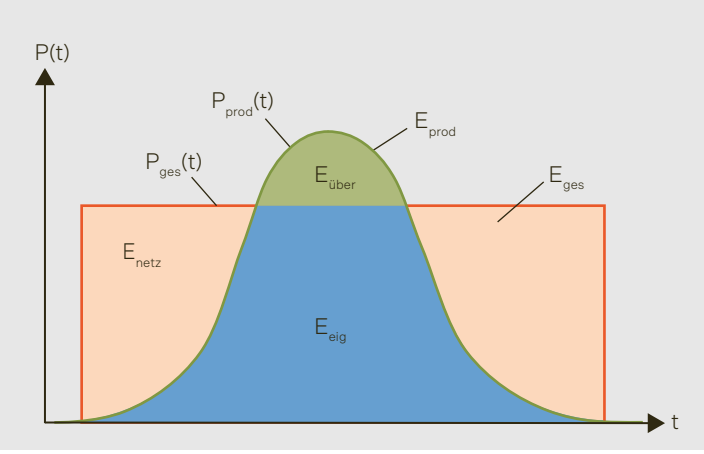


Bild 7.1: Exemplarischer zeitlicher Verlauf von Produktion und Verbrauch zur Illustration der Kennzahlen. (Quelle: [1])

Mit dem **COP** (Coefficient of Performance) und der **Jahresarbeitszahl** (JAZ) kann die Effizienz der Wärmepumpe beurteilt werden (siehe Kapitel 1.2). Es ist wichtig, dass diese Kennzahlen bei der Optimierung immer im Auge behalten werden. Eine einseitige Optimierung des Eigenverbrauchsgrades auf Kosten der Effizienz (etwa über Elektrozusatzheizungen) wird nicht empfohlen!

Potenzial verschiedener thermischer Speicher

Bei der Optimierung der Wärmepumpe werden die thermischen Speicher genutzt, die während der PV-Produktion aufgeladen und anschliessend wieder entladen werden. Tabelle 7.1 liefert einen Überblick über die thermische Speicherfähigkeit der Gebäudemasse sowie der technischen Speicher in Kilowattstunden (kWh).
Bei Gebäuden unterscheidet die Norm SIA 380/1 [2] die Bauweisen «schwer», «mittel» sowie «leicht» und gibt hierfür spezifische Speicherkapazitäten (in kWh/m²K) an. Die Grösse des Gebäudes wird durch die Energiebezugsfläche (EBF) in Quadratmetern beschrieben, wobei zwischen Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) unterschieden wird. Bei der Temperaturanhebung wird angenommen, dass die mitt-

Bauweise «schwer» (Wärmekapazität/EBF = 0,15 kWh/m²K)
Speicherfähigkeit (kWh)

Temperaturanhebung (K)	EFH			MFH		
	Energiebezugsfläche (m²)					
	100	140	200	1000	1500	2000
1	15	21	30	150	225	300
2	30	42	60	300	450	600
3	45	63	90	450	675	900

Bauweise «mittel» (Wärmekapazität/EBF = 0,08 kWh/m²K)
Speicherfähigkeit (kWh)

Temperaturanhebung (K)	EFH			MFH		
	Energiebezugsfläche (m²)					
	100	140	200	1000	1500	2000
1	8	11	16	80	120	160
2	16	22	32	160	240	320
3	24	34	48	240	360	480

Bauweise «leicht» (Wärmekapazität/EBF = 0,03 kWh/m²K)
Speicherfähigkeit (kWh)

Temperaturanhebung (K)	EFH			MFH		
	Energiebezugsfläche (m²)					
	100	140	200	1000	1500	2000
1	3	4	6	30	45	60
2	6	8	12	60	90	120
3	9	13	18	90	135	180

Technischer Speicher (Wärmekapazität Wasser = 4,19 kJ/kgK)
Speicherfähigkeit (kWh)

Temperaturanhebung (K)	EFH		MFH		
	Volumen (Liter)				
	300	500	1000	1500	2000
5	2	3	6	9	12
10	3	6	12	17	23
15	5	9	17	26	35

Tabelle 7.1: Wärmekapazität von Gebäuden und technischen Speichern. (Quelle: [1])

lere Raumtemperatur zur thermischen Speicherung von Energie um 1 bis 3 Kelvin angehoben wird.
Als Vergleich ist die thermische Speicherfähigkeit von technischen Speichern abgeschätzt, in Funktion des Speichervolumens (in Liter) sowie der Temperaturanhebung um 5, 10 und 15 K. Zu den technischen Speichern gehören Brauchwarmwasser- und Pufferspeicher.
Wie sofort ersichtlich wird, hat die Gebäudemasse eine wesentlich grössere Speicherfähigkeit als die technischen Speicher. Deshalb sollte der Fokus auf die Speicherung von Energie in der Gebäudemasse gelegt werden, was bereits bei «mittlerer» Bauweise mit Fussbodenheizungen aufgrund der hohen Trägheit gut funktioniert.

Dimensionierung der Speicher

Bei der Dimensionierung der technischen Speicher (Puffer- und Brauchwarmwasserspeicher) müssen die Normen SIA 384/1 [1], SIA 385/1 [4], SIA 385/2 [5] sowie das Wärmepumpen-Systemmodul [6] mit den Angaben zur Speicherdimensionierung [7] beachtet werden. Für die Eigenverbrauchsoptimierung im Heizbetrieb reicht die übliche Dimensionierung der Pufferspeicher, denn der wesentlich grössere Anteil der Wärme kann im Gebäude selbst gespeichert werden. Die Speicherung der Wärme im Gebäude ist effizienter, da mit kleineren Temperaturanhebungen gearbeitet wird.
Hinsichtlich der Eigenverbrauchsoptimierung bei der Warmwasserbereitung reicht bei EFH ebenfalls die übliche Dimensionierung der Brauchwarmwasserspeicher. In MFH wird allerdings empfohlen, die Speicher um den Faktor 1,5 bis 2 grösser zu dimensionieren, als die Normen vorgeben. Damit sollte gewährleistet sein, dass ein ganzer Tag mit nur einer Ladung abgedeckt werden kann.

Potenzial der Regeltechnik im Vergleich

Wie stark lässt sich der solare Deckungsgrad der Wärmepumpe (gemäss Definition oben) durch den Einsatz von Regeltechnik erhöhen? Bild 7.2 gibt einen Überblick über das Potenzial bei verschiedenen Regelstrategien – dabei handelt es sich um Bestwerte aus der Praxis. Der «natürliche solare Deckungsgrad» ohne Optimierung wird mit Faktor 1 angenommen und die relativen Steigerungen betrachtet.
Bei der manuellen Optimierung werden auf Seite Wärmepumpe die Zeitprogramme für das Heizen und die Brauchwarmwasserproduktion (WW) gezielt auf den Tag gelegt. Damit ist beim Brauchwarmwasser eine hohe Steigerung bis etwa zu einem Faktor 2 möglich. Beim Heizen kann der Deckungsgrad durch eine gezielte Taganhebung um rund 10 % gehoben werden.
Bei der automatischen Optimierung für das Heizen werden zwei Fälle unterschieden. Bei der einfachen Optimierung wird bei solarem Überschuss nur der Pufferspeicher überhöht. Dies führt zu Steigerungen bis 30 %, abhängig von der eingestellten Temperaturüberhöhung. Eine solche Regelung benötigt ein Energiemanagementsystem (EMS) mit Schnittstelle zur Wärmepumpe.
Bei der automatischen Optimierung mit dem Gebäude als Speicher wird die gesamte Gebäudemasse als thermischer Speicher aktiv genutzt. Dies setzt ein Energiemanagementsystem mit Thermomanagement voraus, das die

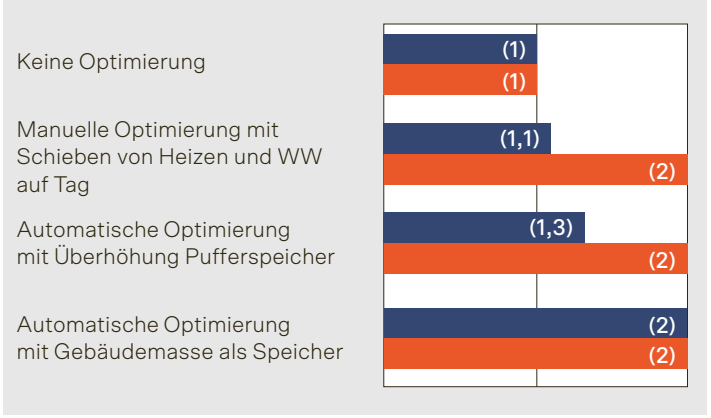


Bild 7.2: Steigerungspotenzial verschiedener Regelstrategien im Vergleich. (Quelle: [1])
■ Solarer Deckungsgrad Heizen
■ Solarer Deckungsgrad Warmwasserproduktion
(n) ungefährer Steigerungsfaktor

Raumtemperaturen beeinflussen und überwachen kann. Hier kann der solare Deckungsgrad auch beim Heizen im besten Fall verdoppelt werden (Faktor 2).

7.2 Einbinden der Wärmepumpe

Das Schema in Bild 7.3 zeigt die elektrische Einbindung der Komponenten in einem Einfamilienhaus. Seitens Gebäude wird ein Energiemanagementsystem installiert, das alle Verbraucher zentral koordiniert. Das EMS sollte über offene Schnittstellen zur Steuerung typischer Verbraucher verfügen. Er sollte zudem einfach konfigurierbar und erweiterbar sein.
Für die Optimierung muss das EMS zwingend die Produktion der PV-Anlage (Zähler PV) sowie den Nettobezug respektive die Einspeisung am Hausanschluss erfassen (Zähler Gesamt). Ist eine Batterie vorhanden, muss auch sie mit einem Zähler erfasst werden. Anstelle von Zählern können auch entsprechende Schnittstellen zu Wechselrichter und Batterie genutzt werden. Schnittstellen zu Zählern der Energieversorgungsunternehmen (EVU) werden künftig bei Smartmetern verfügbar sein. Die Wärmepumpe wird über Relaiskontakte oder eine LAN-Verbindung angesteuert (TCP/IP) und zentral vom EMS geregelt. Der Wassererwärmer (beispielsweise ein WP-Boiler) wird gleich eingebunden wie eine Wärmepumpe. Auch hier kann eine separate Verbrauchsmessung vorteilhaft sein. Die restlichen Haushaltgeräte und allenfalls Ladestationen für Elektrofahrzeuge können ebenfalls vom zentralen EMS angesteuert werden.

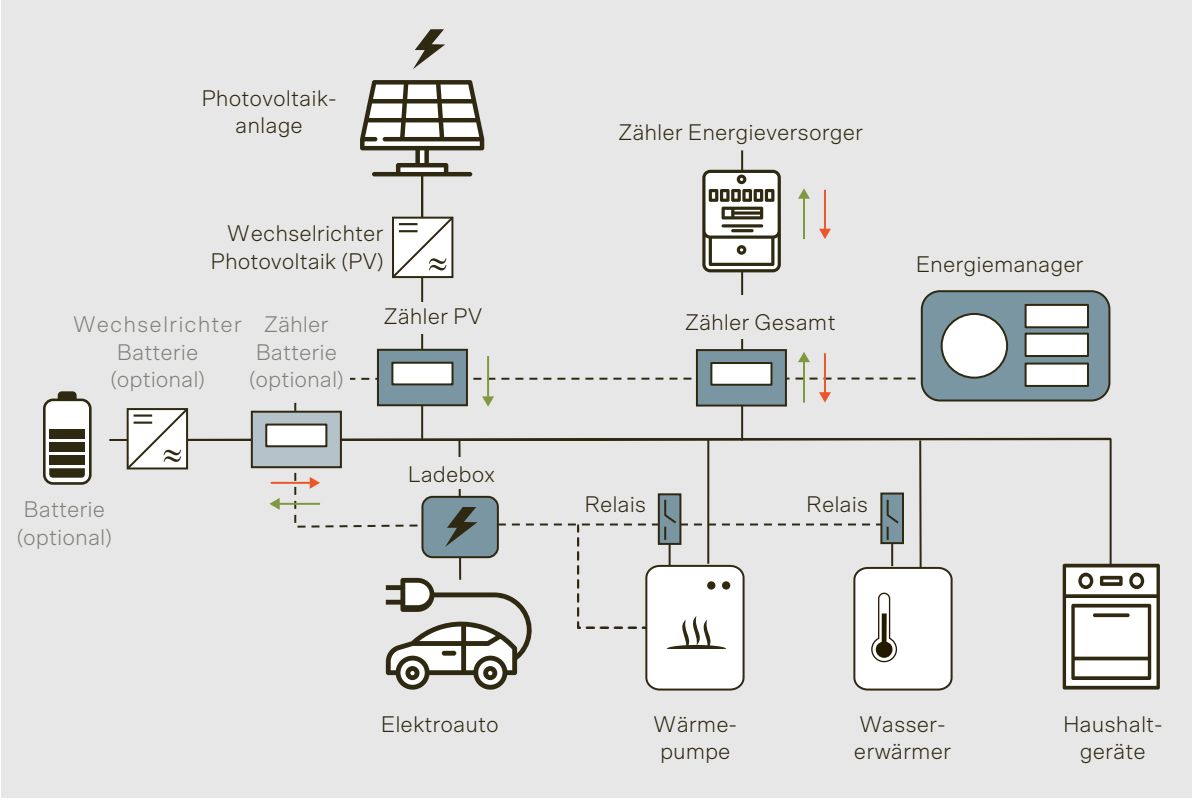


Bild 7.3: Schema elektrische Einbindung einer Wärmepumpe in einem EFH. ---- Datenverbindungen (Quelle: [1])

7.3 Betriebsweise von Wärmepumpen

Bei Wärmepumpen wird unterschieden zwischen solchen mit Ein/Aus-Betrieb und solchen mit leistungsgeregeltem Betrieb. Gegenüber konventionellen Modellen, die nur ein- und ausgeschaltet werden können, bieten moderne Inverter-Systeme durch die bedarfsabhängige Leistungsanpassung verschiedene Vorteile. Beide Systeme können zur Eigenverbrauchsoptimierung genutzt werden, wobei die Inverter-Systeme wiederum flexibler sind, da die Leistung besser an die aktuelle Produktion angepasst werden kann.
Bild 7.4 veranschaulicht den Betrieb einer Ein/Aus-Wärmepumpe im zeitlichen Verlauf über einen Tag zu verschiedenen Jahreszeiten. Dabei werden die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe und die Produktion der PV-Anlage betrachtet. Gut zu sehen ist die Gegenläufigkeit zwischen Produktion und Verbrauch und zwar sowohl jahreszeitlich wie auch im Tagesverlauf. Im Sommer ist nur die Warmwasserproduktion von Bedeutung. Im Winter muss aus Komfortgründen auch ausserhalb der PV-Produktionszeiten geheizt werden. In der Übergangszeit ist das Optimierungspotenzial am grössten, da sich Produktion und Verbrauch etwa in Waage halten. Bei der PV-Optimierung ist das Ziel, die Laufzeiten der WP möglichst auf den Tag zu schieben. Zudem wird die elektrische Leistungsaufnahme tagsüber durch die Anhebung der Speichertemperaturen erhöht.

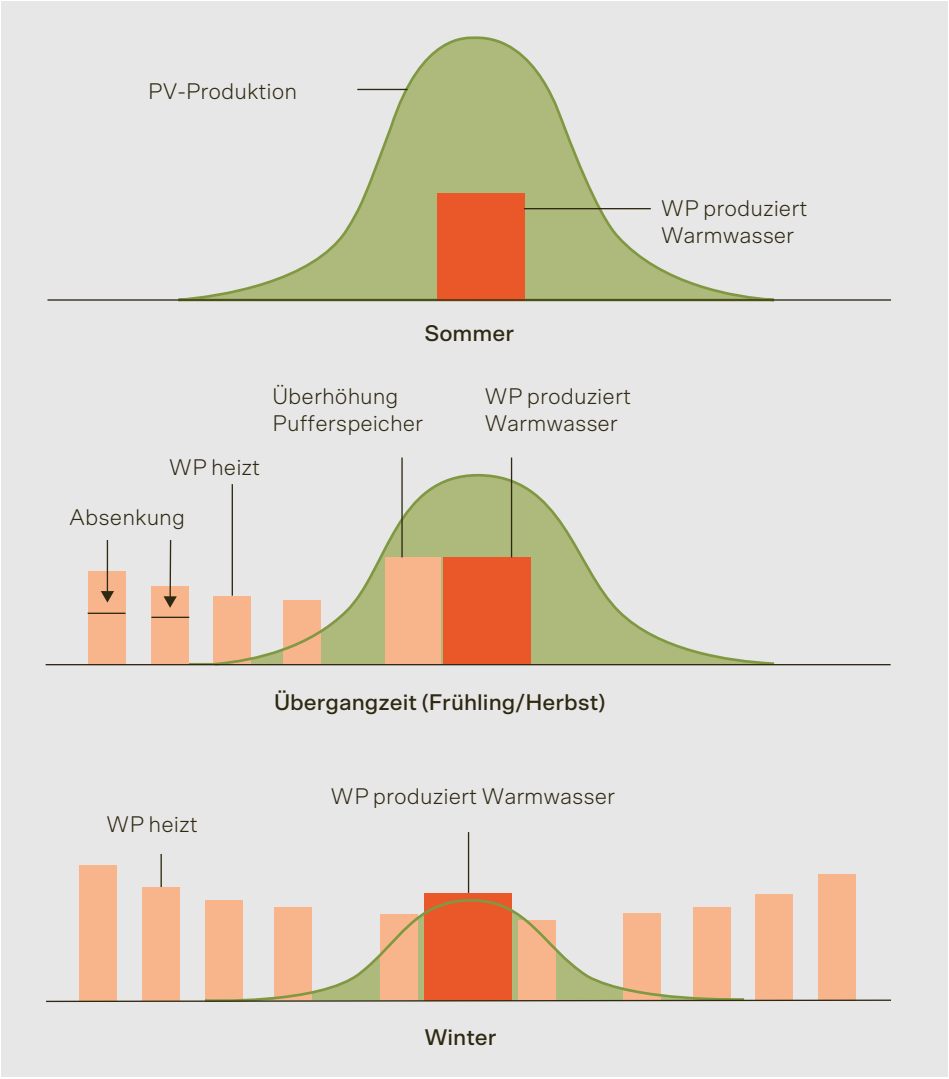


Bild 7.4: Täglicher Betrieb einer Ein/Aus-betriebenen Wärmepumpe zu verschiedenen Jahreszeiten. (Quelle: [1])

Warmwasserladung am Tag

Mit einem Ladefenster am Tag kann der solare Deckungsgrad der Warmwasserproduktion am effektivsten gesteigert werden (Bild 7.5). Aus Gründen der Effizienz und Wirtschaftlichkeit sollte der Warmwasserspeicher primär von der Wärmepumpe geladen werden und nicht über Elektroeinsätze. Heutige Wärmepumpen sind für tägliche Warmwasserladungen auf 55 bis 60 °C ausgelegt. Das Ladefenster wird über den Wärmepumpenregler oder das Energiemanagementsystem programmiert. Elektroeinsätze können ausnahmsweise verwendet werden, falls die Wärmepumpe die notwendige Warmwassertemperatur nicht erreicht. Um unnötigen Stromverbrauch zu vermeiden, sollten diese jedoch zeitlich nach der Wärmepumpe freigeschaltet werden. Das gilt grundsätzlich auch für die sogenannt smarten Elektroeinsätze mit variabler Leistung. Sie können künftig allerdings auch dazu verwendet werden, das Stromnetz von übermässigen Einspeisepeaks im Sommer zu entlasten (Peak Shaving). In solchen Fällen ist es unerheblich, ob sie vor oder nach der Wärmepumpe eingeschaltet werden.

Heizen: Taganhebung statt Nachtabsenkung

Als manuelle Optimierung kann eine Taganhebung in die Heizungsregelung implementiert werden (Bild 7.6). Dabei wird die Vorlauftemperatur während des Tags etwas angehoben. Dies verschiebt den Betrieb der Wärmepumpe in die Tageszeit mit höheren Aussen-

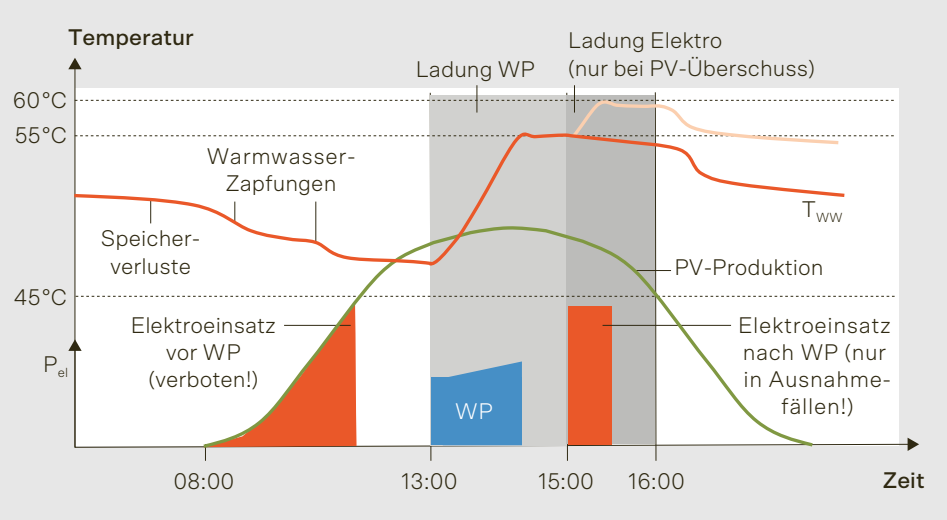


Bild 7.5: Warmwasserladung am Tag primär mit Wärmepumpe, in Ausnahmefällen mit Elektroeinsatz. (Quelle: [1])
T_{WW} = Warmwassertemperatur im Speicher
P_{el} = elektrische Leistung

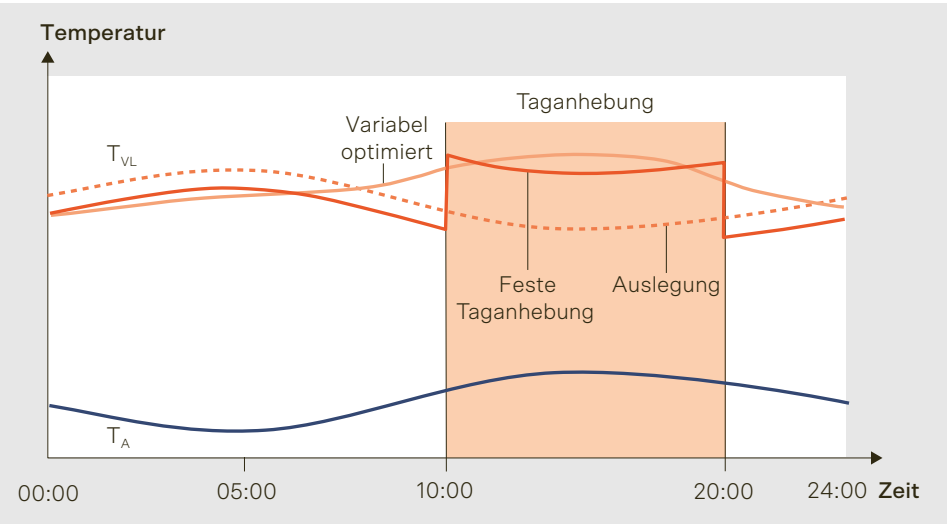


Bild 7.6: Temperaturverläufe mit Taganhebung. (Quelle: [1])
T_{VL} = Vorlauftemperatur
T_A = Aussentemperatur

temperaturen, wo sie effizienter arbeitet. Zudem kann sie dann den Eigenstrom der PV-Anlage nutzen. Speziell bei Luft-Wasser-Wärmepumpen hilft die Taganhebung, den COP zu verbessern.
Physikalisch nutzt die Taganhebung die thermische Speichermasse des Gebäudes. Optimal sind also Gebäude in Massivbauweise mit Fussbodenheizung. Ihre thermische Trägheit sorgt dafür, dass sich die Temperaturanhebung zeitlich verschoben auf die gefühlte Raumtemperatur auswirkt, was den Komfort positiv beeinflusst.
Um eine Überhitzung in der Übergangszeit zu vermeiden, sollte die Taganhebung vorsichtig und schrittweise eingestellt werden. Noch besser ist, sie via die integrierte Raumtemperaturüberwachung eines Energiemanagementsystems zu steuern.
Manuell lässt sich die Taganhebung direkt am Wärmepumpenregler programmieren. Dabei wird ausgehend von einer optimal nach Auslegung eingestellten Heizkurve folgendermassen vorgegangen:

1. Programmzeiten für den Komfortbetrieb auf die typischen PV-Produktionszeiten legen (beispielsweise 10 bis 20 Uhr). Ausserhalb der Programmzeiten läuft die WP im Eco-Betrieb.
2. Komfortbetrieb gegenüber der Auslegung um rund 2 bis 3 K anheben
3. Eco-Betrieb gegenüber der Auslegung um etwa 1 K absenken

Wichtig ist, dass der Sollwert für die Vorlauftemperatur im Mittel gleich bleibt wie in der Auslegung.
Ist ein Energiemanagementsystem vorhanden, kann die Taganhebung automatisch darüber geregelt werden. Dabei sollte der gewünschte Temperaturhub ähnlich wie oben beschrieben vorgegeben werden können. Mit einem Energiemanagementsystem wird die Anhebung allerdings nicht zu festen Programmzeiten aktiviert, sondern abhängig von der PV-Produktion.

7.4 Schnittstellen

Energiemanagementsysteme kommunizieren mit Wärmepumpen über eine Schnittstelle. Über diese werden die Betriebszustände oder Parameter der Wärmepumpenanlage beeinflusst. Dadurch können beispielsweise bei PV-Überschussproduktion die Speichertemperaturen gezielt angehoben werden, was Bild 7.7 anhand einer typischen hydraulischen Einbindung zeigt. Einfache EMS beeinflussen nur die Temperaturen der technischen Speicher (Puffer und Warmwasser). Systeme mit Thermomanagement können auch das gesamte Gebäude beeinflussen inklusive Überwachung der Raumtemperatur. Bei Inverter-Wärmepumpen ermöglichen einzelne Herstel-

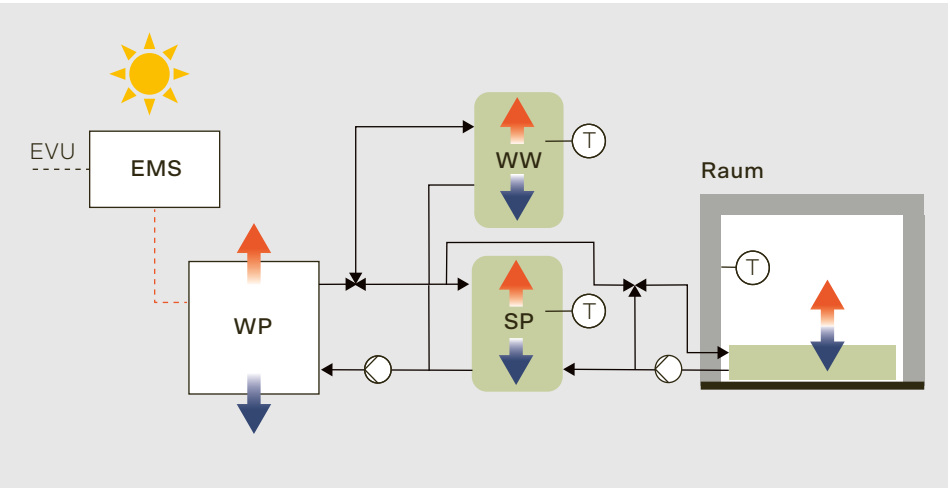


Bild 7.7: Einbindung einer Wärmepumpe (WP) und Beeinflussung der Speichertemperaturen. (Quelle: [1])
SP = Pufferspeicher
WW = Warmwasserspeicher

ler auch eine externe Beeinflussung der Leistung über die Veränderung der Verdichterdrehzahl, allerdings nur in dem vom Hersteller freigegebenen Bereich. Tabelle 7.2 liefert eine kurze Übersicht zu den möglichen Schnittstellen. Das Wärmepumpen-Systemmodul (WPSM) empfiehlt die offenen Schnittstellen SG-Ready BWP oder SmartGridready. Für diese Schnittstellen braucht es keine Einzelfreigaben mehr [8].

Der neue Standard SmartGridready unterstützt alle in Tabelle 7.2 aufgeführten physikalischen Schnittstellen. Er vereinfacht die nahtlose Zusammenarbeit zwischen EMS und Wärmepumpen. Dies wirkt sich auch positiv auf die Planung und die Inbetriebnahme der Anlagen aus. Im Abschnitt SmartGridready in Kapitel 7.5 wird näher auf diesen Standard eingegangen.

Schnittstelle	Einsatzzweck und Möglichkeiten
EVU-Sperreingang	Über diese Schnittstelle kann das Energieversorgungsunternehmen (EVU) die Wärmepumpe über ein Rundsteuersignal sperren oder freigeben. Jede Wärmepumpe verfügt über diese Schnittstelle, auch ältere Modelle. Für EMS eignet sie sich nur beschränkt. Um einen Komfortverlust zu vermeiden, müsste eine Raumtemperaturüberwachung implementiert werden.
SG-Ready BWP	Diese Schnittstelle wurde ursprünglich vom deutschen Bundesverband Wärmepumpe (BWP) für die Energieversorger entwickelt, um Wärmepumpen netzdienlich ansteuern zu können. Die Spezifikation gibt 4 Stufen vor, die über 2 Relaiseingänge angesteuert werden: Sperrung, Freigabe, Wunsch- und Zwangsbetrieb. Heute verwenden die meisten EMS diese Schnittstelle, um den lokalen Eigenverbrauch zu optimieren. Der Nachteil ist allerdings die fehlende Rückmeldung zum Zustand der Wärmepumpe. Zudem müssen die Parameter der Wärmepumpe so eingestellt werden, dass diese die SG-Ready-Signale versteht und richtig umsetzt.
PV-Eingang	Diese Schnittstelle wurde von einzelnen Wärmepumpenherstellern entwickelt, um eine einfache Ansteuerung über Wechselrichter oder EMS zu ermöglichen. Sie hat nur 1 Relaiseingang und kann 2 Stufen annehmen: Normalbetrieb und PV-Betrieb. Der Vorteil ist die einfache Einbindung. Allerdings bieten nicht alle Hersteller eine solche Schnittstelle an und es fehlt die Rückmeldung zum Zustand der Wärmepumpe.
Modbus/TCP	Hier läuft die Kommunikation digital über das Modbus-Protokoll. Bei der Variante Modbus/TCP wird die Wärmepumpe über ein LAN-Kabel eingebunden; der Datenaustausch basiert dann auf dem IP-Protokoll. Über die Register des Modbus-Protokolls können beliebige Parameter und Sollwerte der Wärmepumpe eingestellt werden. So lassen sich etwa variable Temperatursollwerte für die verschiedenen Speicher oder Heizkreise vorgeben werden. Durch die bidirektionale Kommunikation erhält das EMS auch eine detaillierte Rückmeldung zum Zustand der Wärmepumpe. Für die korrekte Ansteuerung wird zwingend ein EMS benötigt. Da die Register des Modbus-Protokolls herstellerspezifisch sind, muss unbedingt vorgängig abgeklärt werden, ob EMS und WP kompatibel sind. Die Kompatibilitätslisten sind bei den Herstellern abrufbar.

Tabelle 7.2: Schnittstellen für die Anbindung von Wärmepumpen an Energiemanagementsysteme.

7.5 Ausblick

SmartGrid und Flexibilitätsmanagement

In Zukunft wird die Einbindung des lokalen Energiemanagementsystems in das übergeordnete Stromnetz von zentraler Bedeutung sein. Mit dem Ansatz des SmartGrid wird das Stromnetz intelligent. Dies ermöglicht es beispielsweise, das Netz zu entlasten, indem Lasten gezielt gesteuert werden. Dadurch lassen sich Anschlussleistungen reduzieren und auch Kosten für den Netzausbau vermindern.
Wärmepumpen spielen hierbei eine wichtige Rolle, weil sie wesentliche Lasten verursachen, die aber flexibel angesteuert werden können. Durch das Pooling vieler Anlagen kann in Tieflastphasen Energie in Gebäuden gespeichert werden und in Hochlastphasen die Bezugsleistung reduziert werden (Peak Shaving). Dynamische Preissignale im Stromtarif werden einen entsprechenden Anreiz schaffen.

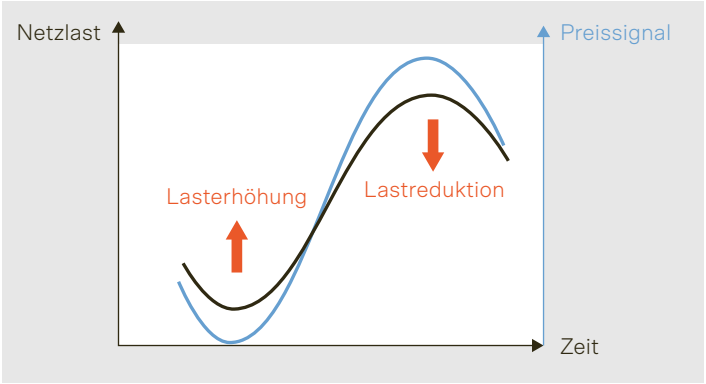


Bild 7.8: Konzept des Peak Shaving im Stromnetz. Relevante Lasten wie Wärmepumpen werden künftig netzdienlich betrieben.

SmartGridready

Neu können Energiemanagementsysteme, Wärmepumpen und andere Produkte nach SmartGridready zertifiziert werden [9]. Dieser Standard garantiert die reibungslose Zusammenarbeit zertifizierter Komponenten, also die Abstimmung der Schnittstellen. Hierfür werden die unterschiedlichen Protokolle der Hersteller durch digitale Schnittstellenbeschreibungen (External Interface Descriptions, EIDs) erfasst, die ins Energiemanagementsystem eingelesen werden können. Eine Liste der zertifizierten Produkte kann über eine Online-Bibliothek abgerufen werden [10]. Bei SmartGridready werden die Schnittstellen über das Stufenmodell gemäss Tabelle 7.3 abgedeckt.

Stufe	Bezeichnung	Beschreibung
1	Aktivieren, deaktivieren	Umschalten zwischen zwei diskreten Betriebszuständen. Dies entspricht der bisherigen EVU-Sperre.
2	Diskret, diverse Betriebsmodi	Umschalten zwischen mehreren diskreten Betriebszuständen. Dies entspricht der bisherigen SG-Ready-Schnittstelle nach BWP [9].
3	Fix konfigurierte Kennlinien	Aktivierung verschiedener, fix konfigurierter Kennlinien. Wird vor allem bei Wechselrichtern und weniger bei Wärmepumpen verwendet.
4	Dynamische Sollwerte	Setzen von kontinuierlichen Sollwerten. Bei Wärmpumpen können mit dieser Stufe Temperatursollwerte dynamisch angesteuert werden. Damit können technische Speicher überhöht und das Gebäude zur thermischen Speicherung genutzt werden. Künftig wird bei Inverter-Wärmepumpen auch die Leistung dynamisch beeinflusst werden können.
5	Variable Kennlinien	Setzen von kontinuierlichen Regelparametern respektive Kennlinienwerten. Wird vor allem bei Wechselrichtern und weniger bei Wärmepumpen verwendet.
6	Prognose	Ermöglicht über Energieproduktions- oder Lastprognosen neue Sollwerte und Regelparameter respektive Kennlinienwerte zu setzen, bis hin zum Einbezug eines digitalen Zwillings. Mit dieser Stufe kann die Flexibilität der Wärmepumpen künftig optimal genutzt werden. Es können sowohl Lastprognosen als auch dynamische Preissignale vorgegeben werden, beispielsweise in Form von Day-Ahead-Prognosen.
m	Monitoring	Monitoring-Anwendung – kann mit den obigen Stufen kombiniert werden. Bei einer Wärmepumpe können mit dieser Stufe wichtige interne Grössen wie Temperaturen, Betriebszustände usw. ausgelesen werden.

Tabelle 7.3: Stufenmodell von SmartGridready.

7.6 Quellen

[1] Wärmepumpen, Photovoltaik und Elektromobilität. Planungsgrundlagen für Wohnbauten (EFH und MFH). Energie Schweiz, 2023
[2] Norm SIA 380/1: Heizwärmebedarf, SIA Zürich, 2016
[3] Norm SIA 384/1: Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, SIA Zürich, 2009 (neue prSIA 384/1 in Vorbereitung)
[4] Norm SIA 385/1: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, SIA Zürich, 2020
[5] Norm SIA 385/2: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung, SIA Zürich, 2015
[6] Wärmepumpen-Systemmodul: www.wp-systemmodul.ch
[7] Wärmepumpen-Systemmodul – Speicher Dimensionierungsvorgaben im WPSM-Pflichtenheft mit und ohne Eigenstromnutzung, August 2018
[8] Wärmepumpen-Systemmodul – Pflichtenheft PV+WP (Befreiung Einzelfreigabe), FWS/GKS, Nov. 2022
[9] SmartGridready – Label für die standardisierte, sichere Kommunikation zwischen Produkten, Systemen, Anlagen sowie Elektrizitätsnetzen, smartgridready.ch
[10] SmartGridready Library (Deklarationsdatenbank mit aktuellen Produkten). library.smartgridready.ch

Kapitel 8

Akustik und Schallschutz

8.1 Gesetzliche Grenzwerte

Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft
In der Schweiz regelt die Lärmschutz-Verordnung (LSV) die Ermittlung und Beurteilung der Aussenlärmimmissionen anhand von Belastungsgrenzwerten (Tabelle 8.1). Lärmimmissionen, verursacht durch Wärmepumpen, werden nach Anhang 6 der LSV beurteilt. Als Bewertungsgrösse dient der sogenannte Beurteilungspegel (L_r; siehe Bild 8.1), angegeben in dB(A) und bestimmt in der Mitte der offenen Fenster lärmempfindlicher Räume. Für ortsfeste Neuanlagen oder Ersatz bestehender Anlagen (LSV Artikel 7) sind die Planungswerte massgebend. Empfindlichkeitsstufe II (ES II) gilt für Zonen, in denen keine störenden Betriebe zugelassen sind, namentlich in Wohnzonen sowie Zonen für öffentliche Bauten und Anlagen. Empfindlichkeitsstufe III gilt für Zonen, in denen mässig störende Betriebe zugelassen sind, namentlich in Wohn- und Gewerbezonen (LSV Artikel 43). Zuständig für die Zuordnung zu den Stufen sind die Gemeinden.

Anforderungen für Räume, in denen sich Menschen aufhalten, wie Wohn- und Schlafzimmer, Büros usw.
Die gesetzlichen Schall-Grenzwerte sind einzuhalten. Betreffend gebäudetechnischer Anlagen verweist die LSV an die Norm SIA 181 (Tabelle 8.2). Speziell bei der Aussenaufstellung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ist auf die umliegenden Gebäude und deren Schlaf- und Wohnraum-Ausrichtung zu achten.
Der Beurteilungspegel L_r wird im betrachteten Fall von Industrie- und Gewerbelärm durch eine Kombination von akustischen Messdaten (Pegel) mit empirischen Regeln (Korrekturen) über die Dauer von Lärmphasen und die Lästig-

Empfindlichkeitsstufe (ES)	Planungswert L_r in dB(A)		Immissionsgrenzwert L_r in dB(A)		Alarmwert L_r in dB(A)	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
I (Erholungszone)	50	40	55	45	65	60
II (Wohnzone)	55	45	60	50	70	65
III (Mischzone)	60	50	65	55	70	65
IV (Industriezone)	65	55	70	60	75	70

Tabelle 8.1: Belastungsgrenzwerte für Industrie- und Gewerbelärm gemäss Lärmschutz-Verordnung (Beurteilungspegel L_r am Immissionsort). Darunter fallen auch Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen.

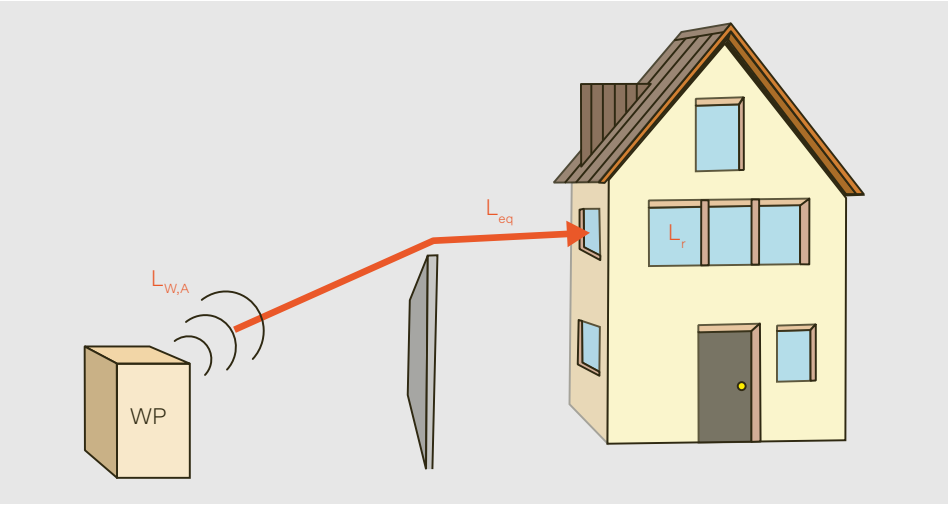


Bild 8.1:
$L_{W,A}$ ist der Schallleistungspegel der Schallquelle.
L_{eq} ist der Mittelungspegel (Schalldruckpegel), im offenen Fenster gemessen.
L_r ist der Beurteilungspegel (L_{eq} mit zusätzlicher Berücksichtigung von Pegelkorrekturen).

keit spezifischer Geräusche ermittelt. Im Rahmen von Bewilligungsverfahren kommt dem Lärmschutz-Nachweis für Luft-Wasser-Wärmepumpen des Cercle Bruit, der Vereinigung kantonaler Lärmschutzfachleute, besondere Bedeutung zu. Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen sind betreffend Aussenlärmemissionen in der Regel unproblematisch. Der Nachweis folgt dem Vorsorgeprinzip, wonach Emissionen soweit möglich zu begrenzen sind. Folgende Massnahmen werden berücksichtigt:

- Wahl einer Anlage mit tiefem Schallleistungspegel $L_{W,A}$
- Aufstellungsort der lärmigen Anlagekomponente(n)
- Schalldämpfung jeglicher Art
- Evt. betriebliche Vorgaben

Ausgehend von Angaben zur Schallemission des Gerätes (dem Schallleistungspegel $L_{W,A}$) wird unter Berücksichtigung der oben genannten Massnahmen der Beurteilungspegel bestimmt und mit den massgebenden Planungswert (Tabelle 8.1) verglichen. Eine wichtige Einflussgrösse stellt dabei auch der Aufstellort der Wärmepumpe (respektive der lärmigen Komponenten davon) dar: Einerseits reduziert ein grösserer Abstand die Schalleinwirkung am lärmempfindlichen Ort, andererseits beeinflusst die Aufstellsituation die Schallausbreitung durch Richtwirkung merklich (Bild 8.2). Dem optimalen Aufstellort ist deshalb bereits frühzeitig Beachtung zu schenken.

Tabelle 8.2: Mindestanforderungen an den Schutz gegen Geräusche von gebäudetechnischen Anlagen im Gebäude (Norm SIA 181).

Emissionsseitige Geräuschart (Senderaum)	Einzelgeräusche		Dauergeräusche
	Funktionsgeräusche	Benutzungsgeräusche	Funktions- oder Benutzungsgeräusche
Lärmempfindlichkeit	**Anforderungswerte L_H**		
gering	38 dB(A)	43 dB(A)	33 dB(A)
mittel	33 dB(A)	38 dB(A)	28 dB(A)
hoch	28 dB(A)	33 dB(A)	25 dB(A)

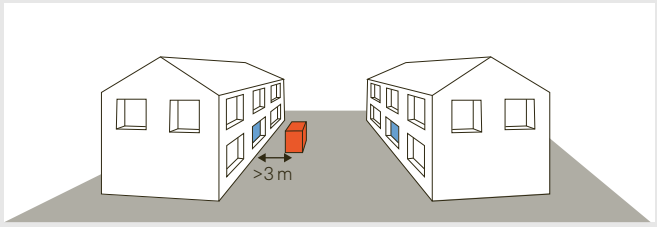
Anmerkung zur Tabelle: Erhöhte Anforderungen an den Schutz gegen Geräusche gebäudetechnischer Einrichtungen im Gebäude. Es gelten die um 4 dB(A) verringerten Werte. Dazu gilt 25 dB(A) als Kleinstwert.

8.2 Schallminderung

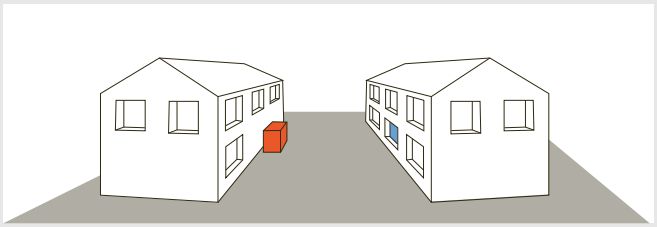
Bei der Planung von Wärmepumpenanlagen ist eine sorgfältige Beurteilung der Schallemissionen erforderlich. Lärmminderungsmassnahmen, die bereits früh im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden, verursachen die geringsten zusätzlichen Kosten. Nachträgliche Massnahmen erfordern oft einen extrem hohen Zusatzaufwand und viele Umtriebe.

Lärmursachen

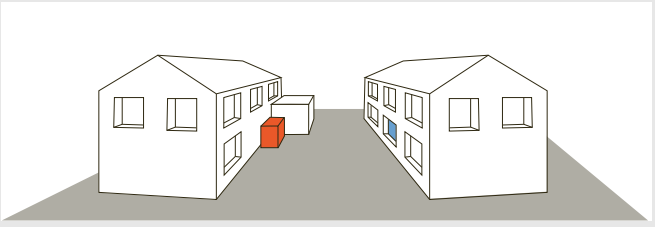
Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen wird das in der Nachbarschaft wahrnehmbare Geräusch in den meisten Fällen durch den Ventilator verursacht. Die Luftöffnung welche unmittelbar beim Ventilator liegt, strahlt dabei meistens deutlich mehr Schall ab als die Luftöffnung auf der Verdampferseite. Trotz der im Allgemeinen wichtigen Bedeutung des Ventilatorlärms dürfen jedoch die anderen Lärmquellen nicht vernachläs-



Freistehend + 3 dB
(keine Wand näher als 3 Meter)



An der Wand + 6 dB



Einspringende Ecke + 9 dB

Bild 8.2: Der Wert von L_{eq} ist unter anderem vom Aufstellort der Wärmepumpe abhängig. Die Richtwirkung führt in der Situation oben zu einer Erhöhung des Pegels um 3 dB(A), an der Wand um 6 dB(A) und in der Ecksituation um 9 dB(A). (Quelle: Cercle Bruit)

sigt werden, wie die Schallemission des Verdichters, Strömungsgeräusche, Unwuchterregung, elektrische Geräusche und Umschaltgeräusche beim Abtauen.

Schallemissionen

– Luftschall: Ein schalldämmendes Gehäuse der WP oder bei Grossanlagen schalldämmende Kapselung respektive schalldämmende Verkleidung des Raumes sind vorzusehen. Eventuell ist der Einbau von Kulissenschalldämpfern für Luftein- und Luftaustrittsöffnungen zu prüfen.

– Körperschall: Durch konsequenten Einsatz von flexiblen Anschlüssen (Schläuche, Kompensatoren, elastische Manschetten, flexible elektrische Anschlüsse) ist Körperschallausbreitung zu verhindern. Es ist eine Schwingungsminderung der Wärmepumpe durch Einsatz von Schwingungsdämpfern zwischen WP und WP-Sockel oder zwischen WP-Sockel und Betonboden vorzusehen.

Schallausbreitung

Auch die sorgfältige Aufstellung der Wärmepumpe ist wichtig. Ein Wäscheabwurfschacht zwischen Schlafräumen und der Waschküche, in der die Wärmepumpe steht, lässt sich kaum ausreichend dämmen. Auch die Anschlussleitungen (Wärmequelle, Wärmeverteilung sowie Elektrokabel) müssen flexibel sein und vom Baukörper getrennt (schalldämmende Befestigungen) montiert werden.

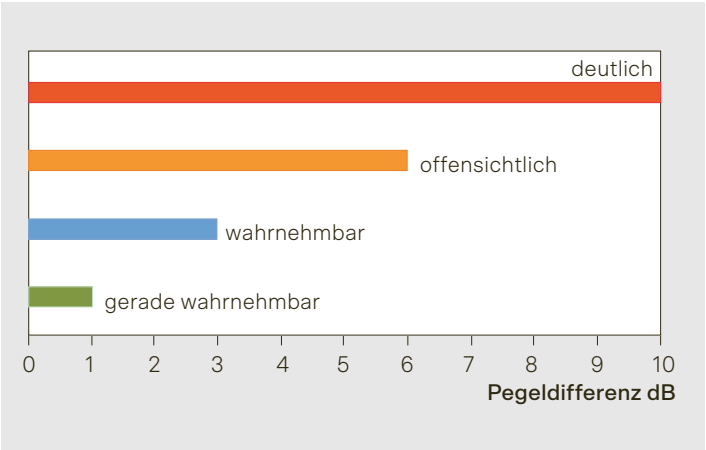


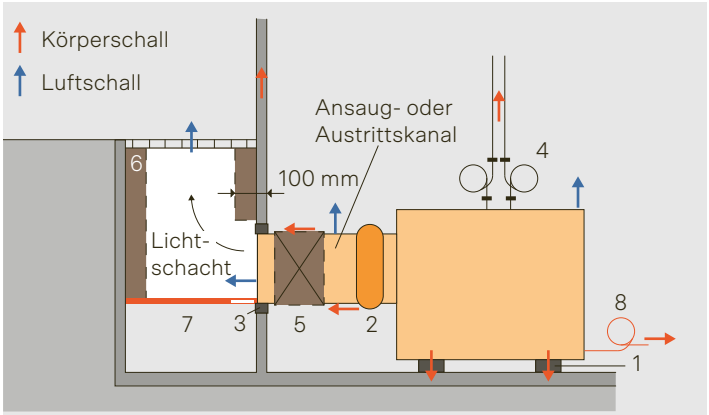
Bild 8.3: Für die Schallwahrnehmung respektive die deutlich hörbare Zunahme einer Pegeldifferenz ist eine Änderung von 8 dB bis 10 dB erforderlich. Die kleinste wahrnehmbare Änderung beträgt ca. 1 dB, ab 3 dB ist sie (deutlich) wahrnehmbar.

Tabelle 8.3: Typische Werte für den Schalldruck, den das Gehör über einen ausserordentlich grossen Bereich wahrnehmen kann.

Schall-pegel	Schalldruck	Beispiel Schall-quelle
170 dB		Sturmgewehr
160 dB	2 000 000 000 µPa (2 kPa)	Pistole 9mm
150 dB		Bolzensetzgerät
140 dB	200 000 000 µPa (200 Pa)	Jetprüfstand
130 dB		
120 dB	20 000 000 µPa (20 Pa)	Schmerzschwelle
110 dB		Presslufthammer
100 dB	2 000 000 µPa (2 Pa)	Diskothek
90 dB		Montageband
80 dB	200 000 µPa (200 mPa)	Strassenverkehr
70 dB		Unterhaltung
60 dB	20 000 µPa (20 mPa)	Büro
50 dB		Wohnzimmer
40 dB	2000 µPa (2 mPa)	Leseraum
30 dB		Schlafzimmer
20 dB	200 µPa	Radiostudio
10 dB		
0 dB	20 µPa	Hörschwelle

Lärmminderungsmassnahmen

Mit der Revision der Lärmschutzverordnung wird auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Artikel 7 Absatz 3 konkretisiert. Damit wird aufgezeigt, unter welchen Voraussetzungen zusätzliche vorsorgliche Massnahmen zu treffen sind. Bei eingehaltenen Planungswerten gelten zusätzliche Massnahmen nur dann als verhältnismässig, wenn mit höchstens 1 % der Investitionskosten der Wärmepumpe eine Reduktion von mindestens 3 dB erreicht werden kann. Alle in Bild 8.4 dargestellten Lärmminderungsmassnahmen sind bei der Planung und Ausführung zu berücksichtigen. Wie in Bild 8.5 dargestellt, wird zwischen Körper- und Luftschall unterschieden. Der Körperschall kann mit einem geeigneten Apparatesockel und korrekt ausgelegten Schwingungsdämpfern meistens problemlos unter die Grenzwerte gebracht werden. Beim Luftschall müssen Anlagekomponenten, wie Ventilatoren und Kompressoren, speziell auf die ge-



1: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und Kellerboden
2: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und Kanal (Faltenbalg darf nicht gestreckt sein)
3: Körperschalltrennung zwischen Luftkanal und Gebäude
4: Körperschalltrennung zwischen WP und Heizleitungen
5: Absorptionsschalldämpfer in den Luftkanälen für erhöhte Anforderungen
6: Absorbierend ausgekleidete Umlenkung
7: Tieftonschalldämpfer für erhöhte Anforderungen (Resonanzschalldämpfer)
8: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und elektrischen Anschlüssen

Bild 8.4: Lärmminderungsmassnahmen. (Quelle: «Schallschutz bei der Aufstellung von Wärmepumpen», Vertrieb FWS)

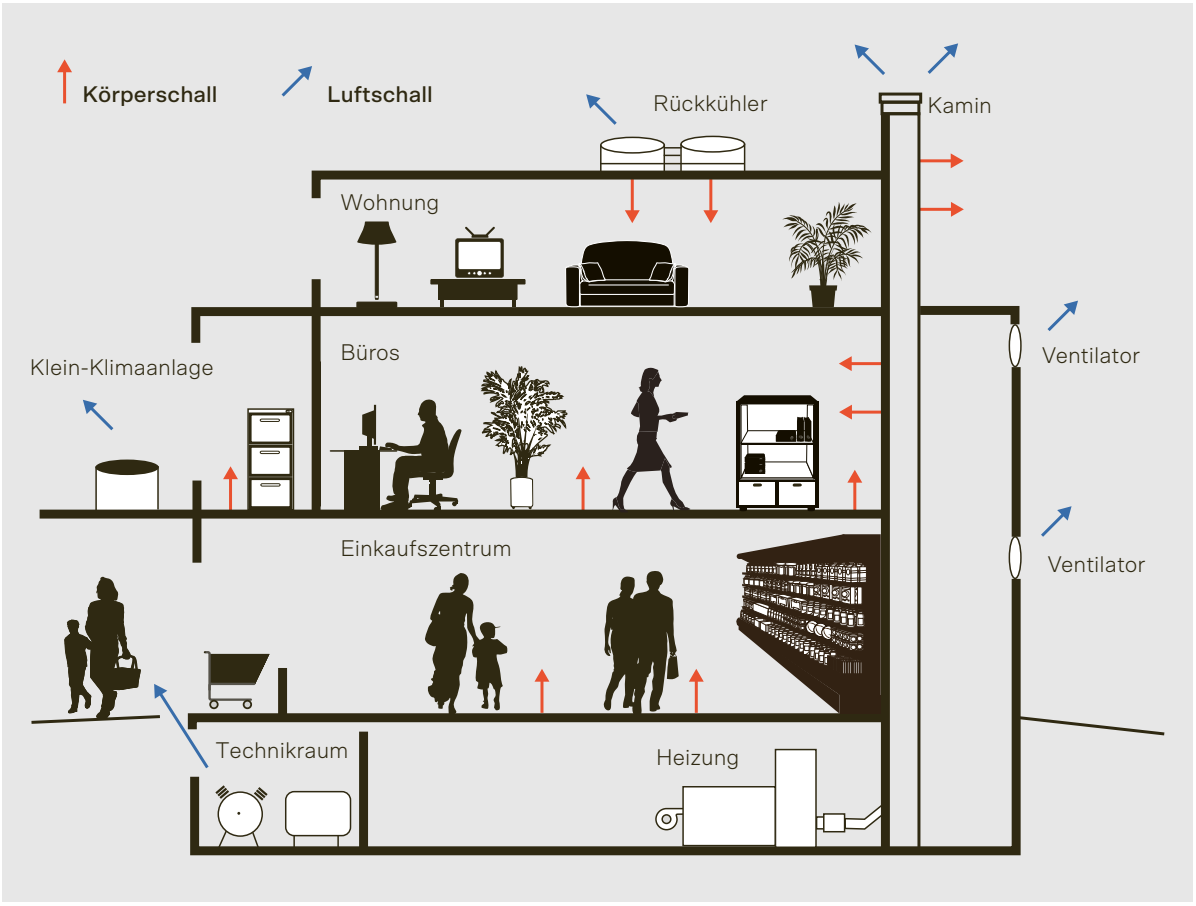


Bild 8.5: Körper- und Luftschall am Beispiel eines Wohn- und Geschäftshauses mit seiner Gebäudetechnik. (Quelle: Merkblatt Lärmbegrenzung bei Haustechnikanlagen, Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt)

Quellen	Übertragungswege	Lösungsansätze
Wärmepumpen Kältemaschinen (innenaufgestellt/ Inneneinheit Splitgeräte)	– Körperschall von Verdichtern: durch Fundamente, Heizungsleitungen und Elektrokabel – Luftschall von Ventilatoren: via Ansaug- und Fortluftöffnungen	– Laufruhigere Geräte auswählen – Standort optimieren – Schalldämpfer – Schalldämmung Luftkanäle – Kanalführung (Umlenkung) – Gehäuse, Verschalung, Raumaufteilung – Sockel, elastische Lagerung
Wärmepumpen Kältemaschinen (aussenaufgestellt)	– Luftschall von Verdichtern und Ventilatoren: via Ansaug- und Fortluftöffnungen respektive Gehäuse. – Körperschall von Verdichtern: via Heizleitungen	– Laufruhigere Geräte auswählen – Standort optimieren – Elastische Schalldämmelemente unter Wärmepumpe – Trennung Sockel und Gebäudefundament – Montage und Führung Heizungs- und Kältemittelleitungen – Partielle oder vollständige Einkapselung – Sperrung höherer Drehzahlen («Silent Modus»)
Luftgekühlte Verflüssiger/Verdampfer (Ausseneinheit, Splitgeräte)	– Luftschall von Ventilatoren – Körperschall von Verdichtern: via Kältemittelleitungen	

Tabelle 8.4: Schall und dessen Minderung bei Wärmepumpenanlagen – Quellen und Lösungen.

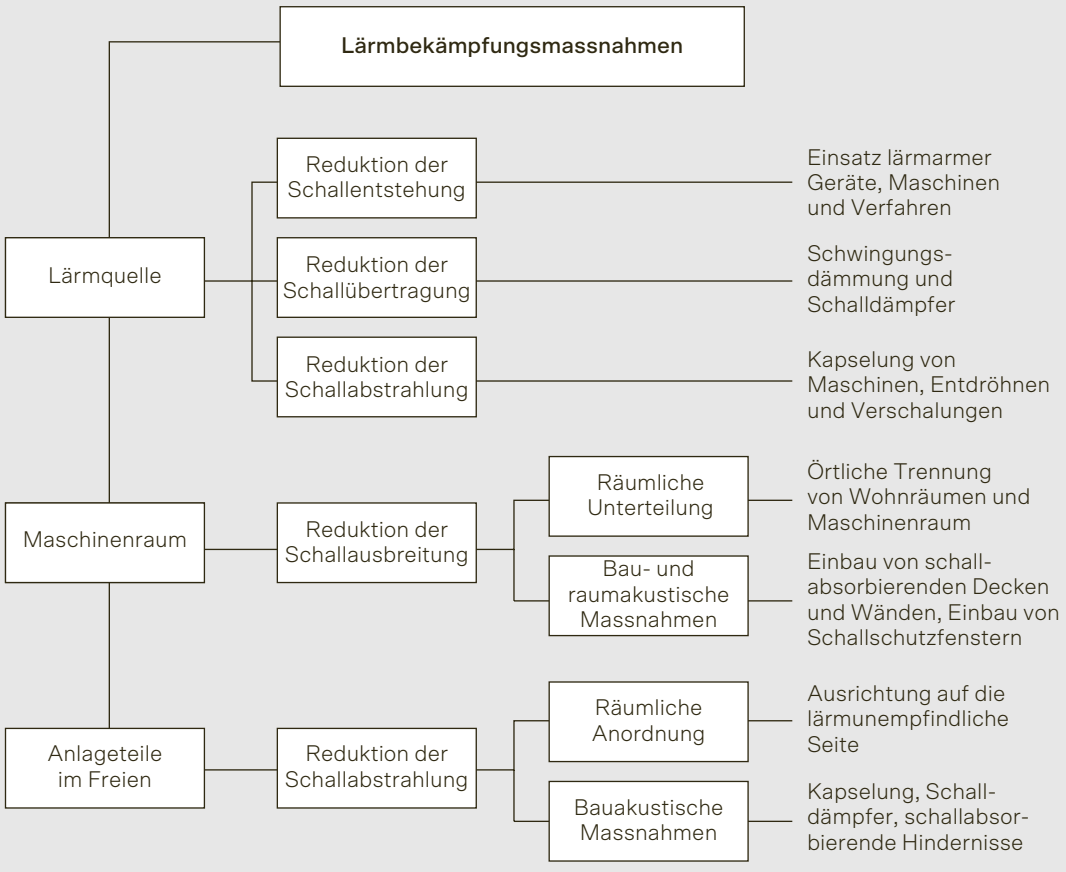


Bild 8.6: Lärmbekämpfungsmassnahmen. (Quelle: Merkblatt Lärmbegrenzung bei Haustechnikanlagen, Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt)

wünschten Werte ausgelegt oder ausgewählt werden. In Gebäuden kann der Luftschall vor allem in den Nachtstunden ein Problem sein (Tabelle 8.4). Als Checkliste für Lärmbekämpfungsmassnahmen dient Bild 8.6.
Bei einer sorgfältigen Planung mit dem Akustiker und dem Gerätelieferanten ist es meistens möglich, die Schallemissionen ohne grössere Mehrkosten unter den gewünschten Sollwert zu bringen.
Als Referenzwert für die Ermittlung der Lärmimmissionen bei Luft-Wasser-Wärmepumpen wird neu der verursachte Lärmpegel bei einer Aussentemperatur von 2 °C massgebend. Die Deklaration des Schallleistungspegels bei A2 wird voraussichtlich auch mit der Ecodesign-Revision in Europa relevant für die Marktzulassung und die technische Dokumentation (siehe Kapitel 1.3, «Ecodesign und Energieetikette»).

Kapitel 9

Projektierung

9.1 Gütesiegel FWS/EHPA

Seit Jahren haben sich die Gütesiegel des Europäischen Wärmepumpenverbandes (EHPA) respektive der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS) als Qualitätsauszeichnung für Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung etabliert. Sie zeichnen energetisch besonders gute Geräte aus, von Herstellern, die qualitative Anforderungen an Planungsunterlagen und Serviceleistungen erfüllen. Energetisch basiert das Gütesiegel auf den SCOP-Werten des Geräts (Tabelle 9.1). Das Gütesiegel gilt für serienmässig hergestellte, elektrisch angetriebene Wärmepumpen bis zu einer Heizleistung von 400 kW.
Seit 2024 umfasst das Gütesiegel für Warmwasser-Wärmepumpen auch Mindestanforderungen an die Effizienz und ersetzt am Schweizer Markt das bis dahin bekannte FWS-Zertifikat. Es gelten Anforderungen an den nach Prüfnorm EN 16147 bestimmten SCOP gemäss Tabelle 9.2.

9.2 Wärmepumpen-System-Modul

Da bei Wärmepumpen besonders die Integration in ein Gesamtsystem, angefangen bei der Wärmeerzeugung, über die Speicherung und die Verteilung bis hin zur Wärmeabgabe an den Raum massgebend für deren optimalen Betrieb ist, haben die Verbände Fachvereinigung Wärmepumpe Schweiz (FWS), GebäudeKlima Schweiz (GKS), Suissetec und der Schweizerische Verein von Gebäudetechnikingenieuren (SWKI) gemeinsam und mit Unterstützung von EnergieSchweiz das sogenannte Wärmepumpen-Systemmodul (WPSM) entwickelt und lanciert. Im Vordergrund stehen Energieeffizienz und Betriebssicherheit der gesamten Anlage, aber auch eine klare Regelung der Verantwortlichkeiten ist ein Ziel. Zur energetischen Beurteilung des Gerätes basiert das WPSM auf den Mindestanforderungen des FWS-/EHPA-Gütesiegels. Die wichtigsten WPSM-Vorgaben sind:

- Bei Neubauten muss die Berechnung der Heizleistung nach Norm SIA 384/1 erfolgen, die Normheizlast nach Norm SIA 384.201. Der Zuschlag für die Wassererwärmung hat sich nach Norm SIA 384/1 zu richten.
- Die Heizleistung muss bei Erneuerungen aufgrund des bisherigen Verbrauchs bestimmt werden. Ein Rechentool steht zur Verfügung.
- Falls Erdwärmesonden die Wärmequelle bilden, sind sie nach Norm SIA 384/6 zu dimensionieren.
- Lärmschutznachweis gemäss Cercle Bruit und der Kantone, Anforderungen gemäss Lärmschutz-Verordnung.
- Zur hydraulischen Einbindung sind erprobte hydraulische Schaltungen vorgegeben.
- Umwälzpumpen: in der Bauart Nassläufer; müssen die Vorgaben der Energieverordnung erfüllen, was einen Energieeffizienzindex EEI von maximal 0,23 bedingt (Stand 2018).
- Wärmepumpen sind gemäss dem Reglement des EHPA-Gütesiegels zertifiziert.
- Hersteller respektive Lieferant mit Serviceorganisation in der Schweiz.
- Bohrfirmen mit FWS-Gütesiegel für Bohrfirmen auswählen.

Wärmepumpentyp	SCOP	
	35 °C	55 °C
Luft-Wasser	3,50	3,00
Sole-Wasser	4,30	3,38
Wasser-Wasser	4,30	3,38

Tabelle 9.1: SCOP verschiedener Wärmepumpentypen.

Wärmepumpentyp	SCOP
Aussenluft (A7)	2,80
Nicht erwärmte Raumluft (A15)	2,90
Abluft (A20)	3,20

Tabelle 9.2: Mindestanforderungen an Warmwasser-Wärmepumpen.

- Minimal erreichbare Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe gemäss Tabelle 9.3
- Inbetriebnahme und Nachkontrolle gemäss Pflichtenheft Wärmepumpen-Systemmodul

Das Wärmepumpen-Systemmodul ist anwendbar für Anlagen bis etwa 15 kW Heizleistung. Zertifizierbar sind Anlagen mit oder ohne Warmwasserbereitung und mit optionaler Solarunterstützung der Wassererwärmung. Die meisten Kantone und andere Förderstellen machen finanzielle Förderbeiträge beim Ersatz von fossilen oder direktelektrischen Heizungen durch Wärmepumpen vom WPSM abhängig. Weitere Informationen unter: www.wp-systemmodul.ch

9.3 WPesti

WPesti ist das am häufigsten verwendete Berechnungstool zur Planung von Wärmepumpenanlagen. Es dient zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen, die berechneten Werte sind direkt für Minergie-Nachweise verwendbar. WPesti basiert auf Excel und ist im Web kostenlos verfügbar. Integriert ist eine Datenbank mit Kennwerten von handelsüblichen Wärmepumpen. Nutzer von WPesti greifen auf den Energienachweis zurück und übernehmen Daten zur Klimastation, Gebäudekategorie, Energiebezugsfläche, zum Heizwärmebedarf und zu den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten. Sofern das Produkt nicht in der WP-Datenbank aufgeführt ist, übernimmt der Planer die Werte vom Wärmepumpen-Testzentrum Buchs (WPZ) oder vom Hersteller oder vom Lieferanten. Sehr wichtig für die Berechnung der JAZ sind die Systemtemperaturen der WP-Anlage, insbesondere die Vor- und Rücklauftemperaturen. Im Hinblick auf exponierte Räume ist die Vorlauftemperatur von grosser Bedeutung. Die relevanten Werte liefert der Heizungsplaner. Das Berechnungstool WPesti erleichtert den Vergleich verschiedener Varianten von Anlagen, beispielsweise von Luft und Erdreich als Wärmequelle. Bezug von WPesti: https://bit.ly/WPesti

9.4 Projektierungshilfen

Normen widerspiegeln den aktuellen Stand der Technik, deren Anwendung bietet Gewähr für eine fachgerechte Umsetzung effizienter Wärmepumpenlagen. Es sind aber meist komplexe Regelwerke, deren Studium im Arbeitsalltag kaum Platz findet. Von den Fachverbänden Fachvereinigung Wärmepumpe Schweiz (FWS), GebäudeKlima Schweiz (GKS) und Schweizerisch-Liechtensteinische Gebäudetechnikverband (Suissetec) wurden daher zu vielen Aspekten von Wärmepumpenanlagen Merkblätter erstellt. Diese geben in kompakter und leicht verständlicher Form Planungs- und Installationshinweise, helfen bei Berechnungen und bieten Checklisten zu ausgewählten Themen. Diese Merkblätter sind über die Websites der jeweiligen Verbände abrufbar, sie bilden wertvolle Arbeitsunterlagen. Weitere Hilfsmittel sind das erwähnte Rechenprogramm WPesti, der «Schallrechner» des FWS sowie die Wegleitungen und Vollzugshilfen von Bund (BFE/Bafu) und Kantonen sowie dem Cercle Bruit.

Tabelle 9.3: Mindestanforderungen an die erreichbaren Austrittstemperaturen beim Wärmepumpen-Systemmodul. Stand November 2024. A: Aussenlufttemperatur; B: Soletemperatur; W: Wassertemperatur

Wärmepumpentyp	Luft-Wasser	Sole-Wasser	Wasser-Wasser
Minimal erreichbare Vorlauftemperaturen	55 °C bei A–7 °C 60 °C bei A0	60 °C bei B0	60 °C bei W10

9.5 Elektrizitätsversorgung

Bei Wärmepumpen werden grössere Elektromotoren im Bereich der Haushaltsstromversorgung eingesetzt. Deren Anlauf kann in schwach ausgelegten Netzen zu unzulässigen Spannungseinbrüchen führen. Wärmepumpen sind deshalb bewilligungspflichtig. Da jedes Elektrizitätswerk für sein Netz verantwortlich ist, müssen die Anschlussbestimmungen des zuständigen Netzbetreibers frühzeitig in Erfahrung gebracht werden.

Anschluss und Bewilligungen

Je nach Energielieferant und verfügbarer Leistung respektive Tarif werden dem Wärmepumpenbetreiber Auflagen gemacht, beispielsweise Sperrzeiten oder Leistungsbegrenzung von bis zu mehreren Stunden in den Spitzenzeiten, Anlaufstrombegrenzung, Anzahl Einschaltungen pro Stunde, Blindstromkompensation usw.
Bei grösseren Anlagen kann es für den Betreiber auch wirtschaftlich sein, die Wärmepumpe mit einer Blindstromkompensation auszurüsten, da etliche Energieversorger bei einem zu tiefen elektrischen Leistungsfaktor (meistens bei einem cos-φ unter 0,92) die entsprechende Blindleistung zusätzlich verrechnen respektive die elektrische Zuleitung kleiner und somit günstiger gewählt werden kann. Tarifinformationen (allenfalls ein spezieller Wärmepumpentarif) mit Sperrzeitentabellen und Gesuchsformulare können beim zuständigen Elektrizitätswerk bezogen werden. Auch empfiehlt sich bei Grossanlagen, Wärmepumpen- und Kältemaschinen direkt an die Hauptverteilung anzuschliessen. Die Verdichter müssen im Notstromfall nicht unbedingt von den Notstromdieselaggregaten versorgt werden, sofern keine sensitiven Geräte angeschlossen sind, die immer beheizt oder gekühlt werden müssen.

Anlaufstrombegrenzung

Die meisten Netzbetreiber verlangen ab einer bestimmten Motorenleistung (meistens ab 3 kW) eine Anlaufstrombegrenzung. Hier einige Beispiele zur Anlaufstromreduktion:

- Widerstandsanlasser (bei kleineren Verdichtern)
- Softstarter, auch Sanftanlasser genannt (bei den meisten Kleinwärmepumpen serienmässig eingebaut)
- Frequenzumrichter: Klasse je nach Einsatzart (Wohnungen, Industrie, Gewerbe) und Vorschriften zur elektromagnetischen Verträglichkeit EMV (Filter, Drossel, Kabelverlegung) beachten
- Teilwicklungsanlauf (Standardwicklung bei halbhermetischen Verdichtern ab rund 3 kW Motorenleistung)
- Stern-Dreieck-Anlauf (bei offenen und sehr grossen halbhermetischen Verdichtern)
- Bei Verbundanlagen (Mehr-Verdichter-Systeme) muss immer ein gestaffelter Anlauf der einzelnen Verdichter gewählt werden.

Mit diesen Anlaufarten oder Kombinationen davon sind die Anforderungen der Elektrizitätswerke in der Regel erfüllt. Die Kosten können sich vor allem bei grösseren Anlagen erheblich unterscheiden.

9.6 Heizzentrale

Die Anforderungen an die Heizzentrale bezüglich Standort, Absicherung, Belüftung usw. können vor allem bei bivalenten und grösseren Anlagen äusserst komplex sein.

Aufstellung und Zugänglichkeit

- Der Aufstellungsraum von Kleinwärmepumpen mit Heizleistungen unter 20 kW kann meistens wie ein üblicher Heizraum geplant werden. Beim Einsatz von brennbaren Kältemitteln muss das Wärmepumpengehäuse oder der Aufstellungsraum ins Freie entlüftet werden (feuerpolizeiliche Vorschriften beachten).
- Im Falle von Installationen einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ist ein Kondensatablauf obligatorisch (Kondensat vom Verdampfer).
- Nur eine gut zugängliche Installation kann instandgehalten und gewartet werden. Die entsprechenden Herstellerangaben sind unbedingt zu beachten.

Sicherheit

- Der Personenschutz steht an erster Stelle. Heute marktübliche Kältemittel sind teilweise giftig (toxisch) respektive brennbar. Je nach Anlagenkonstellation sind Löschmittel, Einrichtungen und Ausrüstungen für den Personenschutz, Fluchtwege, Brandabschnitte usw. mit den örtlichen Behörden zu klären sowie in einigen Fällen eine Risikoanalyse zu erstellen.
- Alle Anlagen müssen gegen zu hohe Systemdrücke abgesichert werden. Je nach Art und Grösse der Anlage müssen die Abblasleitungen der Sicherheitsventile direkt ins Freie oder in einen speziellen Auffangbehälter geführt werden. Hierbei gilt es die entsprechenden Vorschriften und Richtlinien zu beachten.
- Ob und wie die Belüftung des Aufstellungsraumes der Wärmepumpenanlage bezüglich Personen- respektive Umweltgefährdung ausgeführt sein müssen, ist in entsprechenden Vorschriften und Richtlinien geregelt. Dazu gehören beispielsweise die SN EN 378 und die einschlägigen Publikationen der Eidgenössischen Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS), der Schweizerischen Unfallversicherungs-Anstalt (SUVA) und der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), siehe Kapitel 1.3). Im Zweifelsfall sind die zuständigen Behörden zu kontaktieren.

Technische Bedingungen

- Dem Schallschutz und im Speziellen dem Körperschall muss bei der Planung und der Installation Rechnung getragen werden. Die Lage in Bezug auf lärmkritische Räume wie Schlafzimmer oder Büros und zu benachbarten Liegenschaften muss bereits bei der Gebäudeplanung durch den Architekten respektive die Bauherrschaft berücksichtigt werden (Kapitel 8).
- Bei bivalenten Anlagen mit Heizkesseln gilt es bei der Raumbelüftung zu beachten, dass die Belüftung der Wärmepumpe keinen Einfluss auf die Verbrennungsluftzufuhr der Öl-, Gas- oder Holzheizung hat.

9.7 Wirtschaftlichkeit

Allgemeine Hinweise

Die Wirtschaftlichkeit von energietechnischen Anlagen hängt von den üblichen Einflussfaktoren ab: Kapital- oder Investitionskosten (Abschreibung und Verzinsungen der Geräte- und der Installationskosten), Energiekosten (z. B. Strom für Wärmepumpe), Bedienungs- und Wartungskosten. Folgende Grössen sind bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung massgebend:

- Investitionskosten: Als Investitionskosten gelten alle Ausgaben, die für die Realisierung einer Anlage erforderlich sind, also beispielsweise auch für die Erschliessung der Wärmequelle.
- Betriebskosten: Die Betriebskosten bei Energiesystemen umfassen Ener-

gie-, Wartungs-, Bedienungs- und Unterhaltskosten.
- Nutzungsdauer respektive Betrachtungsperiode: Mit der Nutzungsdauer wird die effektiv zu erwartende Dauer zwischen Inbetriebnahme und Ersatz des Anlageteils bezeichnet.
- Kalkulationszinssatz: Der Kalkulationszinssatz ist die wichtigste Grösse für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Er soll dem marktüblichen Zinssatz für die Verzinsung des in der Anlage gebundenen Kapitals entsprechen.
- Teuerung: Die Teuerung gibt die Preisentwicklung im Laufe der Zeit an, beispielsweise bei den Energiekosten.
- Externe Kosten: Für die externen Kosten (auch Umweltkosten oder kalkulatorischer Energiepreiszuschlag, KEPZ, genannt) werden Werte gemäss den besten zum Erstellungszeitpunkt der Wirtschaftlichkeitsberechnung verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen oder von den Bundesbehörden anerkannten Zahlen gewählt.
- Vergleich von Wärmepumpenangeboten: Beim Angebotsvergleich gilt es, die Kriterien gemäss Kasten auf dieser Seite zu beachten.

Energiepreise
- Energietechnische Anlagen respektive deren Bestandteile haben lange Lebenszeiten (10 bis 40 Jahre). Die Entwicklung von Zinsen und Teuerung, speziell bei Energiepreisen, ist über so lange Zeiträume nicht vorhersehbar. Eine Sensitivitätsanalyse (Vergleich der Ergebnisse bei unterschiedlichen Annahmen) ist daher stets sinnvoll.
- Nebst mengenabhängigen Angaben sind bei leitungsgebundenen Energieträgern gegebenenfalls auch Netzbeiträge, Grundpreise und Leistungspreise zu berücksichtigen.

Kriterien beim Vergleich von Wärmepumpenangeboten

Kosten
- Investitionskosten
- Wartungskosten
- Betriebskosten

Lieferumfang
- Vollständigkeit
- Schnittstellen (Wahl, Zweckmässigkeit)
- Bauseitige Aufwendungen
- Garantiezeit und Garantiebedingungen, evtl. mit Werksabnahme
- Einbringung
- Funktionsumfang

Leistungen
- Funktionsumfang
- Nutzungsgrad (z. B. Jahresarbeitszahl JAZ) bei definierten Rahmenbedingungen
- COP bei 3 bis 4 verschiedenen Prüfbedingungen, bezogen auf Teil- und Volllastbetrieb respektive SCOP. Dasselbe gilt im Kühlfall mit dem Energy Efficiency Ratio (EER).
- Heiz- und Kühlleistung
- Einsatzgrenzen

Bei grösseren Anlagen allenfalls zusätzlich:
- Druckverluste der Wärmeübertrager
- TEWI-Kennwert (Kapitel 3.6)

Qualität
- Qualitätslabels wie Gütesiegel oder Wärmepumpen-Systemmodul
- Serviceorganisation des Lieferanten (365 Tage, 24 Stunden)
- Ersatzteilverfügbarkeit
- Qualitätssicherungssystem
- Referenzen

9.8 Erfolgskontrolle

Wärmepumpen reagieren besonders empfindlich auf Änderungen der Rahmenbedingungen beim Betrieb. Die Erfolgskontrolle ist ein wichtiges Instrument, das hilft, eine Wärme- respektive Kälteerzeugung störungsfrei, langlebig und energieeffizient zu betreiben. Insbesondere liefert sie die Grundlage für Optimierungen. Werden diese konsequent umgesetzt, lassen sich bei grundsätzlich gut funktionierenden Anlagen 10 bis 15 % Energie einsparen. Tabelle 9.4 gibt einen Überblick über Faktoren, die die Effizienz beeinflussen und über mögliche Optimierungsmassnahmen. Diese Faktoren sollen natürlich auch bereits bei der Auslegung und Planung von Wärmepumpen beachtet werden.

Eine Erfolgskontrolle lohnt sich sowohl bei grösseren als auch bei kleineren Anlagen. Zwar wird bei kleineren Anlagen aus Kostengründen üblicherweise nur wenig Messaufwand betrieben, aber auch daraus lassen sich wichtige Hinweise auf das korrekte Funktionieren gewinnen.

Heute werden Betriebskennwerte auch bei Seriengeräten vermehrt im Regler erfasst und angezeigt. Oft ist das auch bei übergeordneten Reglern der Fall, beispielsweise wenn eine Photovoltaikanlage und ein Batteriespeicher ins Ge-

Faktor	Einfluss auf die Effizienz	Optimierungsmassnahme
Temperatur der Wärmequelle	Höhere Temperaturen verbessern die Effizienz	Wahl einer Wärmequelle mit möglichst hoher Temperatur, z. B. Grundwasser statt Aussenluft
Vorlauftemperatur des Heizsystems	Niedrigere Vorlauftemperaturen erhöhen die Effizienz	Einsatz von Flächenheizungen (z. B. Fussbodenheizung) oder Niedertemperaturheizkörpern
Betriebsweise der Wärmepumpe	Modulierende Systeme sind effizienter als solche mit Ein-Aus-Regelung	Nutzung von drehzahlgeregelten Wärmepumpen mit intelligenter Steuerung
Hydraulik und Regelung	Gute Abstimmung reduziert Verluste und erhöht Effizienz	Optimieren der Pumpendimensionierung, vermeiden von Fehlzirkulationen und hohen Druckverlusten, bedarfsgerechte Steuerung, hydraulischer Abgleich der Wärmeverteilung
Standort und Klima	Kalte Temperaturen reduzieren die Effizienz, besonders bei Luft-Wasser-Wärmepumpen	Auswahl einer geeigneten Wärmepumpe mit hoher Effizienz für kalte Regionen, allenfalls Hybridlösungen (bei grösseren Lasten)
Hilfsbetriebe	Effiziente Hilfsaggregate steigern die Gesamteffizienz	Effiziente Umwälzpumpen und, falls vorhanden, Ventilatoren; tiefer Stand-by-Verbrauch der Regelung; wenn möglich, Heizung im Sommer komplett abschalten
Warmwasserbereitung	Hohe WW-Temperaturen verringern die Effizienz der Wärmepumpe	Einsatz eines separaten Warmwasserspeichers («Beistellboiler»), einer Warmwasser-Wärmepumpe («Wärmepumpenboiler») oder Kombination mit thermischer Solaranlage; für Wärmepumpen geeigneten Wassererwärmer wählen mit mindestens 0,3 m^2 Wärmeübertragerfläche pro kW Heizleistung im Warmwasserbetrieb

Tabelle 9.4: Faktoren, die die Effizienz einer Wärmepumpenanlage beeinflussen.

samtsystem eingebunden sind. Hier muss geprüft werden, wie die ausgegebenen Werte zustande gekommen sind und ob es sich dabei um «echte» Messwerte oder Tabellenwerte aus Kennfeldern handelt. Letztere können auch im Fehlerfall noch «korrekte» Werte anzeigen.
Damit eine aussagekräftige Erfolgskontrolle möglich ist, muss schon bei der Planung der Wärmepumpenanlage ein Messkonzept festgelegt werden. Ein wichtiges Kriterium ist dabei die Wahl der Systemgrenzen (Kapitel 1.2). Nur wer sich zu einem frühen Zeitpunkt über den Ablauf und die notwendige Instrumentierung im Klaren ist, kann später eine einwandfreie Erfolgskontrolle durchführen. Eine vorausschauende Planung berücksichtigt auch die Möglichkeit, dass später noch Instrumente nachgerüstet werden können, beispielsweise durch den Einbau von Passstücken und Absperrhahnen.

Benchmarks
Um die Ergebnisse der Erfolgskontrolle einzuschätzen, können Vergleichs- oder Erfahrungswerte von ähnlichen Anlagen herangezogen werden. Tabelle 9.5 listet einige Richtwerte für Jahresarbeitszahlen (JAZ) bei verschiedenen Wärmpumpentypen und Anwendungen auf.
Bei diesen Angaben gilt es unbedingt zu bedenken, dass sie stark von der tatsächlichen Situation vor Ort (Raumtemperatur, energetische Qualität der Gebäudehülle, zusätzliche Wärmeerzeuger usw.) abhängen und daher lediglich der Orientierung dienen können.
Falls die Werte der Erfolgskontrolle nicht im Rahmen dessen liegen, was Hersteller respektive Planerin angeben, sollte ein fachkundiger Installateur aufgeboten werden, der die Wärmepumpe so einstellt, dass sie effizienter arbeitet. Wichtige Hinweise für Optimierungen liefern auch (unerkannte) Betriebsstörungen. Hierzu gehört beispielsweise der ungewollte Einsatz einer Elektroheizung, der alleine sogar zu einer erhöhten JAZ der Wärmepumpe führen kann. Generell gilt es auch, kurze Kompressorlaufzeiten pro Start zu vermeiden – als Minimum können 20 bis 30 Minuten angenommen werden. In der Regel sind deutlich längere Laufzeiten möglich, speziell bei leistungsgeregelten Geräten. Kurze Laufzeiten pro Einschaltung können ein Hinweis auf eine nicht optimale Hydraulik und/oder Regelstrategie sein.

Pos.	Typ	Region	Meter über Meer	Radiatorenheizung		Bodenheizung	
				Auslegetemperatur 45/40 °C		Auslegetemperatur 35/30 °C	
				nur Heizung	mit WW	nur Heizung	mit WW
1	LW	Mittelland	400–500	2,90	2,80	3,50	3,25
2		Voralpin	bis 800	2,65	2,60	3,25	3,00
3			bis 1000	2,55	2,50	3,15	2,90
4	LW-Split	Mittelland	400–500	2,80	2,70	3,40	3,15
5		Voralpin	bis 800	2,55	2,50	3,15	2,90
6			bis 1000	2,45	2,40	3,05	2,80
7	LW-Inverter	Mittelland	400–500	3,00	2,80	3,55	3,30
8		Voralpin	bis 800	2,75	2,65	3,25	3,10
9			bis 1000	2,65	2,55	3,15	3,00
10	SW	Mittelland	400–500	3,50	3,40	4,40	4,10
11		Voralpin	bis 800	3,40	3,30	4,30	4,00
12		Bergregion	> 800	3,30	3,20	4,20	3,90
13	SW-Inverter	Mittelland	400–500	3,70	3,60	4,50	4,35
14		Voralpin	bis 800	3,60	3,50	4,40	4,25
15		Bergregion	> 800	3,50	3,40	4,30	4,15

Tabelle 9.5: Richtwerte für Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmepumpentypen und Anwendungen. (Quelle: Hubacher Engineering GmbH)

Messkonzept

Grundlage für Energiemanagement und Betriebsoptimierungen ist die Umsetzung eines effektiven, klar definierten Messkonzeptes. Dieses beinhaltet nach SWKI-Richtlinie 98-1 «Messkonzept für Energie und Medien» die Komponenten gemäss Bild 9.1. Es gilt als Voraussetzung zum Erreichen folgender Ziele:

A. *Das Messkonzept liefert eine zweckmässige Struktur der Medienverteilung. Messungen können dauerhaft oder nur für eine bestimmte Zeit (Temporärmessung) eingebaut werden. Sie sollen sich auch nach der Inbetriebnahme einer Anlage kostengünstig einbauen lassen. Hierfür müssen geeignete Vorkehrungen getroffen werden. Beispiel: Einbau eines Passstückes für Energiezähler.*
B. *Das Messkonzept definiert den Einbau von Messeinrichtungen die für die Überprüfung von garantierten Systemwerten erforderlich sind. Beispiele: JAZ bei Wärmepumpen, ESEER, also das Europäisches saisonale Energieeffizienzverhältnis bei Kältemaschinen*
C. *Im Messkonzept ist der Einbau von Messeinrichtungen zur Führung einer Energiebuchhaltung und -statistik definiert.*
D. *Das Messkonzept ermöglicht den Einbau von Messeinrichtungen zur Identifizierung des Energiesparpotenzials. Daraus lassen sich die Betriebsoptimierungsmassnahmen ableiten.*
E. *Das Messkonzept ermöglicht den Einbau von Messeinrichtungen zur verbrauchsabhängigen Nebenkostenabrechnung. Einerseits werden damit die gesetzlichen Bestimmungen erfüllt, andererseits können auch die Wünsche der Bauherrschaft oder der Mieter erfüllt werden.*
F. *Das Messkonzept ermöglicht den Einbau von Messeinrichtungen für die Erfolgskontrolle über die durchgeführten Betriebsoptimierungsmassnahmen.*
G. *Das Messkonzept ermöglicht den Einbau von Messeinrichtungen, deren Messergebnisse als Grundlage für die Planung und Ausführung der Erneuerung oder des Ersatzes der Anlagen dienen.*

Quelle: SWKI-Richtlinie 98-1 «Messkonzept für Energie und Medien»

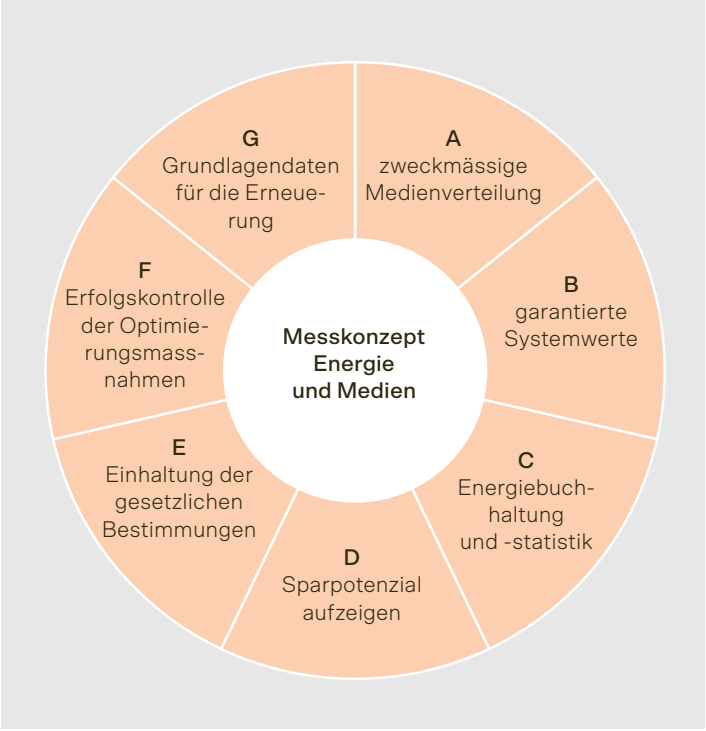


Bild 9.1: Messkonzept für Energie und Medien nach SWKI 98-1.

Funktionen

Ein klar definiertes Messkonzept schafft zusammen mit der Auswertung der Energie- und Medienmessungen die Voraussetzung für:

- Aussagekräftige Energiekennzahlen zur Verifizierung von Planungsdaten und zur Kontrolle von Garantiewerten
- Daten, die der energetischen Betriebsoptimierung (eBO) dienen; dabei werden Energiesparpotenziale lokalisiert und so die Grundlagen für eBO-Massnahmen geschaffen
- Die (Früh-)Erkennung von Fehlfunktionen
- Grundlagen zu Verbrauchsprognosen und Budgetierung
- Die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften, wie der verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung

Messeinrichtungen

Das Messkonzept sollte folgende Messeinrichtungen respektive Messstellen beinhalten:

- Elektrozähler für Verdichter
- Betriebsstunden- und Impulszähler für Verdichter
- Wärmezähler je Wärmeerzeuger
- Messstutzen zum Erfassen der Ein- und Austrittstemperaturen im Verdampfer- und Verflüssigerkreis sowie allenfalls zur Messung von Druckverlusten; wenn möglich sollten Twinlock-Messnippel vorgesehen werden, allenfalls Kugelhahn mit Fühleraufnahme

Bei grösseren und komplexen Anlagen braucht es zusätzlich:

- Temperatursensoren an jedem Wärmeübertrager-Ein- und -Austritt
- Raumlufttemperatursensoren
- Aussentemperatursensoren
- Abfrage der Leistungsstellung der Verdichter
- Betriebsstundenzähler (allenfalls Elektrozähler) für Pumpen, Lüfter, Zusatzheizungen (z. B. elektrische Notheizung) usw.
- Wärmezähler je Wärmequelle
- Abfrage der Ventilstellungen

Messeinrichtungen sind mit Messunsicherheiten behaftet, die wesentlich vom apparativen Aufwand abhängen. Folgende Punkte gilt es bei Wärmezählern speziell zu beachten:

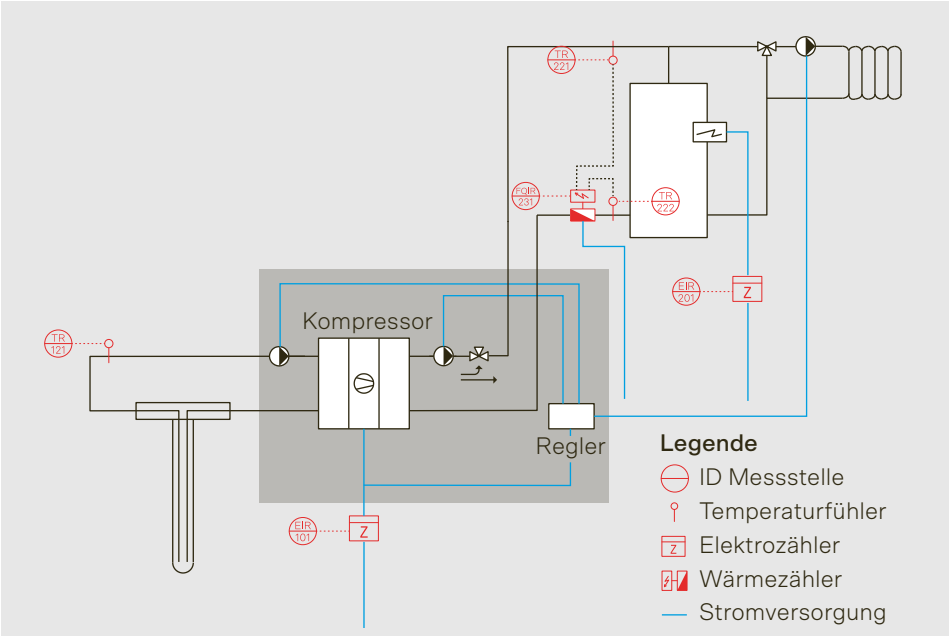
- Die Messunsicherheit des Volumenstroms hängt vom tatsächlichen Durchfluss ab.
- Sie hängt auch von der Temperaturdifferenz in Vor- und Rücklauf ab.
- Es muss sichergestellt werden, dass im Rechenwerk die richtigen Medien (Wasser, Sole usw.) angegeben sind. Falsche Angabe führen zu systematischen Fehlern.
- Es muss dafür gesorgt werden, dass die Messvorrichtungen gemäss Herstellervorschrift eingebaut werden. Wichtig sind vor allem die Einbaulage, die Beruhigungsstrecke und der Einbau von Volumenstrom-Messstellen im Rücklauf.

Die Genauigkeit beim messtechnischen Bestimmen der Jahresarbeitszahl (JAZ) kann typischerweise zwischen 5 und 10 % variieren, bedingt durch die Messunsicherheiten bei der elektrischen Energie und der erzeugten Wärme. Um genauere Ergebnisse zu erzielen und die Fehlerquote zu verringern, sollten folgende Überlegungen vorab angestellt werden:

- Sind die notwendigen Einlauf- und Beruhigungsstrecken vor und hinter der Volumenstrom-Messstelle der Wärmezähler eingehalten? Ultraschallgeräte sind in dieser Hinsicht meist unproblematisch.
- Welche Verbraucher werden über welche Stromanschlüsse betrieben? Kleinverbraucher wie Umwälzpumpen und Reglerelektronik können entweder über eine Phase der Kompressorversorgung oder über eine separate einphasige Zuleitung versorgt werden.
- Werden externe Verbraucher, die nicht direkt vom Wärmepumpengerät gespeist werden (z. B. direktelektrische Heizeinsätze in Speichern), ebenfalls in die Messung einbezogen?
- An welcher Stelle wird die Wärme gemessen? Ist es möglich, zwischen Heizwärme und Warmwasser zu unterscheiden, falls dies gewünscht wird?
- Kurze Temperaturfühler (bis 60 mm) sollten idealerweise direkt eingetaucht werden. Wenn Tauchhülsen verwendet werden, müssen sie exakt zu den verwendeten Fühlern passen, ohne Wärmeleitpaste. Es empfiehlt sich, die Tauchhülsen beim Lieferanten der Wärmezähler zu beziehen.
- Anschlüsse von Temperaturfühlern, die werkseitig montiert sind, dürfen nicht verlängert oder gekürzt werden.
- Sind die Temperaturfühler im Rohr korrekt positioniert, stimmt insbesondere die Lage der Fühlerspitze?
- Sind separate Temperaturfühler, die nicht zu einem bestimmten Wärme-

zähler gehören, ordnungsgemäss kalibriert (z. B. zur Temperaturüberwachung von Erdwärmesonden)?
– Wird dasselbe System sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen verwendet? In diesem Fall müssen die Wärmezähler speziell dafür ausgelegt sein, sowohl Wärme als auch Kälte zu erfassen, und der Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpe muss korrekt aufgeteilt werden.

Bild 9.2 zeigt ein einfaches Beispiel für Messstellen zur Erfassung der JAZ bei Kleinwärmepumpenanlagen im Heizbetrieb (Systemgrenzen Wärmeerzeugernutzungsgrad, WNG), soweit mit geringem Aufwand möglich. Der elektrische Anschluss der Wärmepumpe versorgt hier sowohl den Regler als auch sämtliche Umwälzpumpen. Es lohnt sich, auch die Laufzeit oder den elektrischen Verbrauch (EIR 201) von Nachheizelementen separat zu erfassen. Dies gibt im Betrieb Hinweise auf Fehlfunktionen wie den ungewollten Einsatz der elektrischen Notheizung.
Wird die Laufzeit erfasst, gilt es zu beachten, dass auch wirklich die effektive Betriebszeit der Nachheizung und nicht bloss eine Freigabe durch den Regler ermittelt wird. Zur Bestimmung von Kompressorstarts können sogenannte Doppelzähler verwendet werden, die sowohl Betriebszeit als auch Einschaltvorgänge erfassen und anzeigen.



ID Messstelle	Messgrösse	Einheit
EIR 101	Elektrische Energie Kompressor	kWh
TR 121	Temperatur Austritt Erdwärmesonde	°C
TR 221	Temperatur Vorlauf Heizwasser-Pufferspeicher	°C
EIR 201	Elektrische Energie Notheizung	kWh
TR 222	Temperatur Rücklauf Heizwasser-Pufferspeicher	°C
FQIR 231	Wärme Ladung Heizwasser-Pufferspeicher	kWh

Bild 9.2: Beispielschema für die Messeinrichtung zur Bestimmung der JAZ. Messtellen-ID gemäss DIN 19227 bzw. DIN EN 62424.

Kapitel 10

Inbetriebsetzung

Nach der Ausführungsphase folgt die Vorbereitung und Durchführung der Inbetriebsetzung. Anschliessend folgen die Abnahme und der Betrieb (siehe auch SN EN 378). Bei der Abnahme wird kontrolliert, ob und wie die Anlage mit dem Werkvertrag und mit den Fachregeln übereinstimmt. 2 bis 3 Monate nach der Inbetriebsetzung sollten die Einstellungen unter Last nochmals überprüft und der Betrieb entsprechend optimiert werden.

Kurzbeschrieb nach SIA 113
Die Empfehlung SIA 113 FM-gerechte Bauplanung und Realisierung (Bild 10.1) beschreibt die Aufgaben eines planungs- und baubegleitenden Facility Managements (FM). Die fünf Phasen des Bauprozesses gemäss dem Leistungsmodell SIA 112 gliedern die Grafik vertikal, unterteilt in ihre definierten Teilphasen. Horizontale Hauptgliederungsthemen sind die zu berücksichtigenden Sichtweisen, von der Qualitätssicherung aus Sicht FM bis zum Informations- und Datenmanagement. Die Sichtweisen Eigentümer, Nutzer und Dienstleister sind in die Themen Finanzen und Ressourcen, Prozesse und Aufgaben sowie Organisation gegliedert. Ferner enthält das Informations- und Datenmanagement die Themen Bezeichnung und Strukturierung, Ablage sowie Austausch. An den Schnittstellen sind für die einzelnen Themen pro Teilphase Leistungen definiert. Die Gliederung in die Sichtweisen Eigentümer, Nutzer und Dienstleister dient dem Zweck, die wichtigsten Anforderungen für die Bewirtschaftungsphase systematisch und vollständig in die Planungs- und Erstellungsphase zu integrieren.

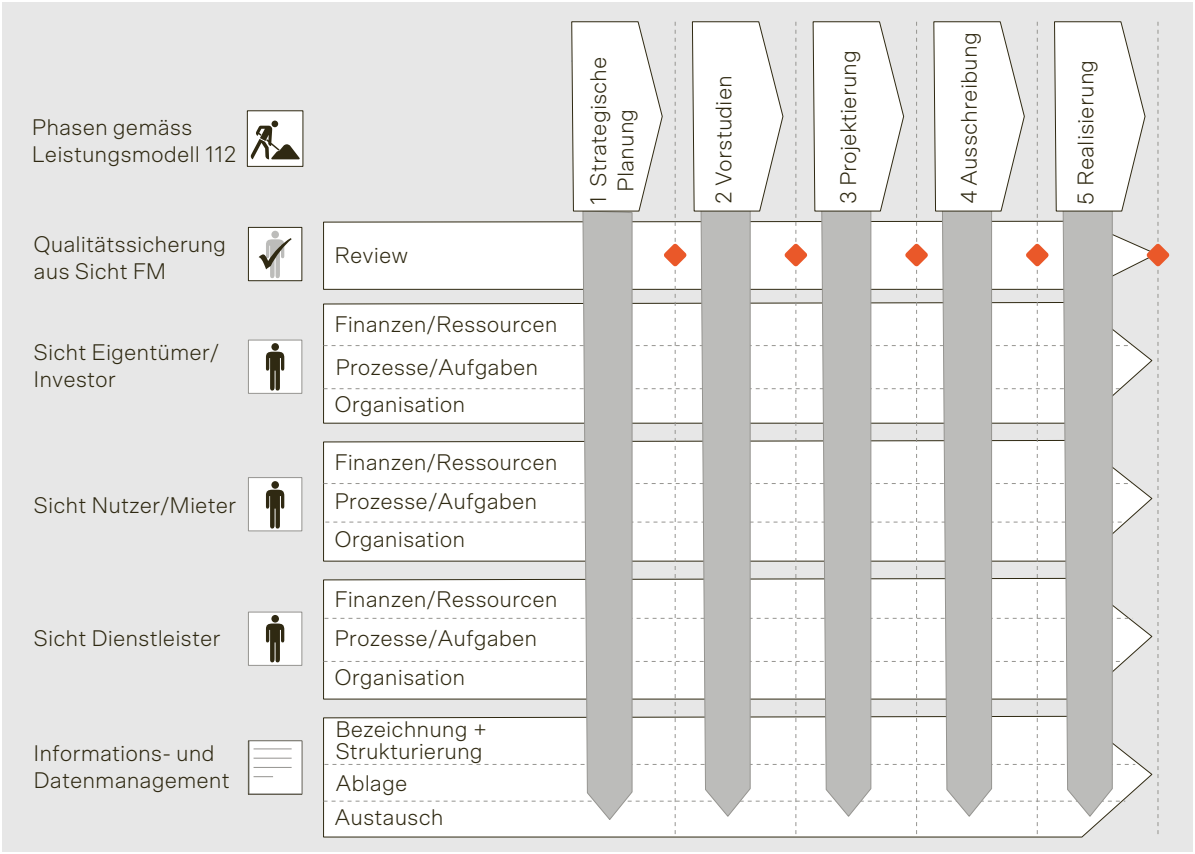


Bild 10.1: Sichtweisen im FM nach Norm SIA 113 (Quelle: Planungs- und baubegleitendes Facility Management pbFM, Praxisleitfaden für die Empfehlung SIA 113, CRB).

10.1 Phase vor der Inbetriebsetzung

Montagekontrolle
Am Ende der Ausführungsphase, vor der Füllung des Hydraulik-Systems mit Medien, ist eine genaue Montagekontrolle der installierten Anlage erforderlich. Dabei ist zu prüfen, ob die Installation mit den spezifizierten Vorgaben übereinstimmt und die Anlagekomponenten richtig montiert wurden. Es ist darauf zu achten, dass alle Apparate und Anlagenteile mit Bezeichnungsschildern mit entsprechenden Positionsnummern in Übereinstimmung mit dem Anlageschema und anderen Dokumenten montiert sind.

Kontrolle der Mess- und Regeleinrichtungen
Bereits bei der Planung der Anlage ist zu überlegen, welche Messgrössen für Inbetriebsetzung, Abnahme, Betriebsoptimierung und Betrieb der Anlage erfasst werden müssen. Die nachträgliche Installation von Temperaturfühlern und anderen Messinstrumenten ist in der Regel aufwendig, sie sollte daher frühzeitig in die Planung mit einfliessen (Kapitel 9.8). Die Montagekontrolle bietet die allerletzte Gelegenheit, um entsprechende Korrekturmassnahmen ohne grossen Mehraufwand einzuleiten. Vor dem Füllen der Anlage mit der Wärmeträgerflüssigkeit sollen deshalb die Messeinrichtungen und die Stellglieder, welche im Hydraulikkreislauf eingebaut sind, besonderer Kontrolle unterzogen werden. Für die zuverlässige Messgrössenerfassung ist die richtige Position (z. B. Beruhigungsstrecken vor oder nach Volumenstromzählern) und korrekte Montage (z. B. Einbaulage) der Einrichtungen ausserordentlich wichtig (Herstellerangaben beachten).

10.2 Vorbereitung der Inbetriebsetzung

Vor der Inbetriebsetzung muss die Installationsphase inklusive Elektro- und MSRL- oder GA-Installationen abgeschlossen sein (inklusive Sicherheitsnachweis gemäss Niederspannungs-Installations-Verordnung NIV). Damit die Inbetriebsetzung effizient durchgeführt werden kann, sind vorgängig die folgenden Vorbereitungen zu treffen:
- Programm der Inbetriebsetzung erstellen, Termine mit den Beteiligten festlegen; die Verfügbarkeit der Medien und Räumlichkeiten sicherstellen.
- Die folgenden Dokumente sind auf der Anlage zur Verfügung zu stellen:
- Prinzipschema der Installation
- Technische Datenblätter mit Angaben der Einstellparameter, der Sollwerte und Regelkurven. Diese müssen, sofern festgelegt, mit den Vertragswerten übereinstimmen.
- Schema der Stromeinspeisung, der elektrischen Steuerung und Regelung (Regelschema)
- Leistungszusammenstellung für Elektromotoren
- Funktionsbeschreibungen
- Datenlisten für Massenströme, Druckdifferenzen, Netztemperaturen, usw.
- Installationspläne
- Allenfalls Messstellenplan
- Für die Inbetriebsetzung muss mindestens ein Entwurfsexemplar der Bedienungsanleitung für alle Anlagen bzw. Anlagenteile zur Verfügung stehen, damit während der Inbetriebsetzung allfällige Korrekturen und Ergänzungen eingebracht werden können.
- Allenfalls Prüf- und Abnahmeprotokolle

Mit Vorteil sind all diese Unterlagen in einem Anlageordner zusammengestellt und allen Beteiligten zugänglich, insbesondere aber bei der Anlage selbst verfügbar (Kapitel 10.8).

10.3 Wärmequelle und Wärmeabgabe

Vor der eigentlichen Inbetriebnahme der Wärmepumpe müssen die Wärmequelle und die Wärmeabgabe kontrolliert und entsprechend vorbereitet werden.
Installation auf Vollständigkeit prüfen:

- Bei Erdwärmesonden und Grundwasserfassungen: Dokumente zur Qualität der Erstellung (Abnahmeprüfung Norm SIA 384/6 respektive Norm SIA 384/7).
- Wassersysteme gespült, gefüllt (Richtlinie SWKI BT102-01 beachten) und gründlich entlüftet (die Druckprobe wird während der Installationsarbeiten, vor der Anbringung der Dämmung, durchgeführt).
- Volumenströme überprüft, hydraulischer Abgleich vorgenommen.
- Konzentration der Frostschutzfüllung prüfen (falls vorhanden).
- Bei Pumpen- und Ventilatormotoren und anderen Antrieben (ausgenommen der Verdichtermotor) die Drehrichtungskontrolle durchführen.
- Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen muss das System auf der Wärmequellenseite überprüft werden.
- Gegebenenfalls Absperreinrichtungen öffnen.
- Tauchhülsen sollten stets exakt (d. h. spielfrei) zu den verwendeten Temperaturfühlern passen (gemeinsam beschaffen). Thermisches Kontaktmaterial («Wärmeleitpaste») sollte nur in Ausnahmefällen verwendet werden.

10.4 Inbetriebsetzung der Wärmepumpe

Es ist sicherzustellen, dass vor der Inbetriebsetzung alle zugehörigen Anlagenteile wie Verbraucherkreis, Rückkühlung etc. betriebsbereit sind, die Versorgung mit Elektrizität funktioniert und genügend Last vorhanden ist.
Die Inbetriebsetzung erfolgt in der Regel unter der Leitung des Gebäudetechnikplaners. Dieser kennt die Funktionsweise der elektrischen, der hydraulischen bzw. der lufttechnischen Anlage. Er wird entsprechend durch den Spezialisten der Regelfirma, durch den Installateur und den Elektriker sowie durch die Inbetriebsetzungsspezialisten der Komponentenlieferanten unterstützt.
Die Vorgehensweise kann wie folgt aussehen:

- Sichtkontrolle, Installationskontrolle
- Elektroanschlüsse bei allen Apparaten kontrollieren, die elektrischen Verbindungen anhand von Elektroschema überprüfen.
- Thermorelais (Wärmepakete) auf korrekte Einstellung gemäss den Typenschildern der Motoren prüfen, Einstellungen der elektrischen Schutzeinrichtungen kontrollieren.
- Verdichter vom Netz elektrisch trennen.
- Hauptschalter einschalten.
- Ölheizungen (Carter- bzw. Ölabscheiderheizung) falls vorhanden einschalten.
- Sicherheitsfunktionen soweit möglich kontrollieren und überprüfen.
- Verdichter-Drehrichtung kontrollieren. Diese darf nur durch den Fachmann der Lieferfirma durchgeführt werden.
- Funktionskontrolle von Steuerung und Regelung durchführen, gespeicherte Werte auf Richtigkeit kontrollieren.
- Alle Regel- und Steuerverbindungen einem Funktionstest unterziehen.
- Regelparameter (P-Bereich, Nachstellzeit, Vorhaltezeit), Heizkurven, Sollwerte usw. auf die (durch den Planer) berechneten bzw. empfohlenen Werte einstellen.

10.5 Inbetriebsetzungsprotokoll

Am Ende der Inbetriebsetzung sind die diversen Parameter wie Sollwerte, Regelkurven und Sicherheiten gemäss den im Vertrag definierten Werten (sofern festgelegt) einzustellen. Allfällige Ab-

weichungen und Mängel sind entsprechend festzuhalten.
Alle wichtigen Einstellparameter sind im Inbetriebsetzungsprotokoll zu dokumentieren. Abweichungen beziehungsweise Änderungen sind in den Dokumenten von Hand einzutragen.

10.6 Bedienungsanleitung

Die Bedienungsanleitung beschreibt die Funktion und Regelung der einzelnen Anlagenteile. Diese soll verständlich und übersichtlich aufgebaut sein. Nachfolgend einige Punkte, die bei der Anfertigung der Bedienungsanleitung zu beachten sind:

- Adressen und Telefonnummern der zuständigen Servicestellen
- Einheitliche Bezeichnungen, Symbole nach den gültigen Normen verwenden
- Übereinstimmung mit der Beschriftung auf der Anlage
- Keine fremdsprachigen Unterlagen verwenden.
- Gültiges Elektroschema mit den eingetragenen Änderungen aus der Inbetriebsetzungsphase
- Beizulegen ist das Inbetriebsetzungsprotokoll mit den wichtigen Angaben wie z. B.:
  - Ablesungen der Anlagedaten während des Anlagebetriebes
  - Sämtliche Einstellwerte, die durch den Betreiber geändert werden können.
  - Allfällige Grenzwerte
- Massnahmen bei Betriebsstörungen
- Verzeichnis der Aufgaben, welche das Betriebspersonal erledigen muss.
- Leeres Protokoll mit der Liste der Ablese-Daten
- Wartungsheft

Während der Inbetriebsetzung werden in der Regel kleine Änderungen und Korrekturen an der Anlage vorgenommen. Vor allem Anpassungen im Elektroschema müssen in der definitiven Version nachgetragen werden. Der Entwurf der Bedienungsanleitung muss entsprechend bereinigt werden.

10.7 Abnahmeprotokoll

Nach dem Abschluss der Inbetriebsetzungsarbeiten erfolgt eine Kontrolle der Anlage unter Einbezug der Beteiligten. Ziel dieser Kontrolle ist ein allseitig unterzeichnetes Protokoll, welches die Abnahme der Anlage bestätigt und allfällige Vorbehalte festhält. Bei der Abnahme ist durch den Planer ein Abnahmeprotokoll auszufüllen und von den Parteien zu unterschreiben. Dieses enthält:

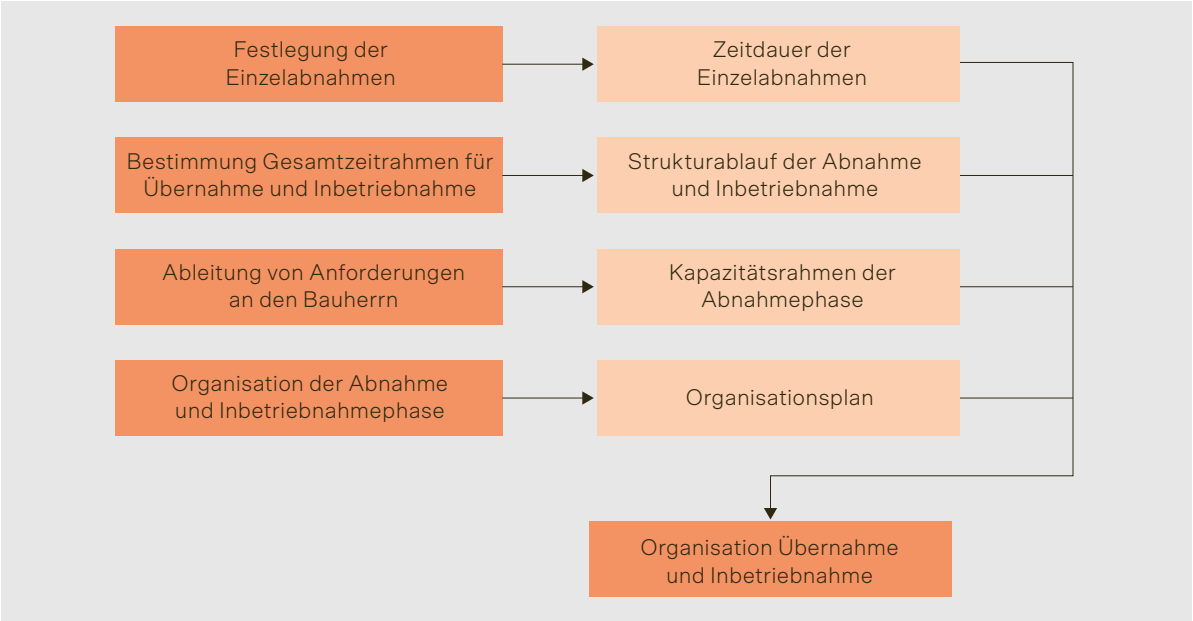


Bild 10.2 Organisation von Abnahme, Übergabe und Inbetriebnahme. (Quelle: Real Estate und Facility Management, Preuss, N. und Schöne L.B., 2010)

- Die vertraglich festgelegten Daten
- Checkliste über Lieferumfang und Qualität der Ausführung
- Die effektiven Anlagedaten
- Allfällige Mängel

Mit der Abnahme übernimmt die Bauherrschaft die Verantwortung über die Anlage und die Garantiefrist beginnt zu laufen. Häufig wird der Zeitraum von der baulichen Fertigstellung bis zum Nutzungsbeginn unterschätzt. Dies betrifft insbesondere eigengenutzte Immobilien, in die nach Fertigstellung durch die ausführenden Firmen nutzerseitig noch Installationen oder Ausstattungen eingebracht werden (Mieterausbau). Die wichtigsten Aktivitäten sind in Bild 10.2 zusammengefasst.

Einzelphasen

Der gesamte Zeitraum von der baulichen Fertigstellung bis zur Nutzung strukturiert sich in mehrere Einzelphasen. Dabei wird der Zeitraum für die Abnahme von der Dauer der längsten Einzelabnahme bestimmt. Die Abnahmen der gebäudetechnischen Anlagen werden meistens parallel durchgeführt. Je nach Grössenordnung des Projektes müssen mehrere Personen mit gebäudetechnischer Kompetenz zur Verfügung stehen.

Beispiele: Elektro; Heizung, Lüftung, Klima, Kälte (HLKK); Sanitär; Mess-, Steuer-, Regel-, Leittechnik (MSRL); Gebäudeautomation (GA); Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und Gefahrenmeldeanlagen wie: Brandmeldeanlage (BMA), Rauch- und Wärme-Abzugsanlagen (RWA), Gas-, Wasser-, Abwasser- und Feuerlöschtechnik (GWA) etc. Bei den Einzelvorgängen muss je nach Gewerk berücksichtigt werden, dass im Zug der Vorbereitung der Abnahmen die firmeninternen Inbetriebnahmen (Funktionstest und Probebetrieb) durchgeführt werden. Ebenfalls betrifft dies die Behördenabnahme wie ESTI (Eidgenössisches Starkstrominspektorat), SVTI (Schweizerischer Verein für technische Inspektionen) etc.
Bild 10.3 zeigt einen möglichen Terminplan.
Die Meilensteine wie Abnahme, Übergabe und Nutzungsbeginn sind mit allen Beteiligten sorgfältig zu planen und einzuhalten.
Es ist wichtig festzuhalten, ab wann die Garantieleistungen bei erbrachten Bauleistungen gesetzlich beginnen. Normalerweise erfolgt dies nach der formalen Abnahme und muss im Abnahmeprotokoll festgehalten werden.

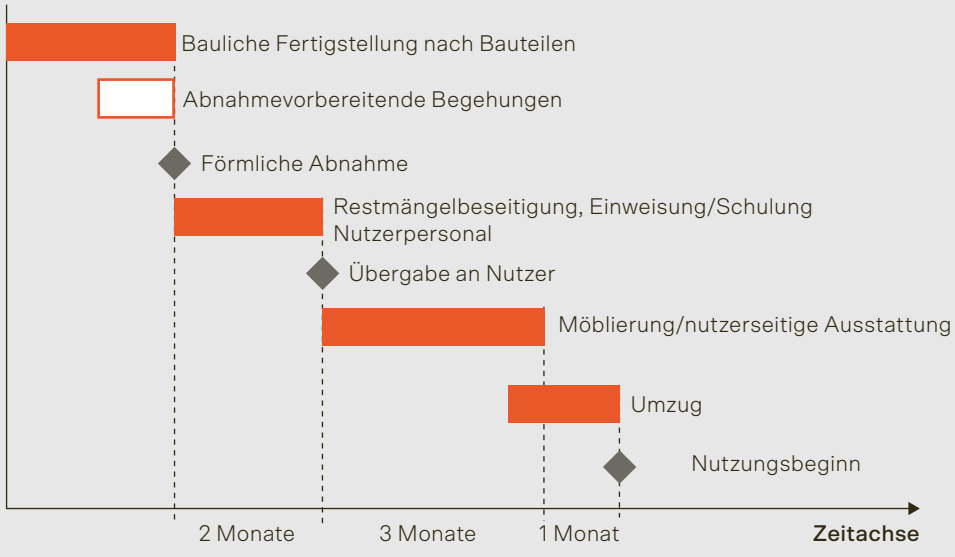


Bild 10.3 Strukturablauf der Abnahme und Inbetriebnahme. (Quelle: Real Estate und Facility Management, Preuss, N. und Schöne L.B., 2010)

Hinweis: Es kann versucht werden, die Garantiefristen vertraglich zu verlängern. Zudem ist es wichtig, die Serviceverträge so früh wie möglich mit den Dienstleistern zu verhandeln.
Korrekte Revisionsunterlagen mit allen relevanten Anlagedaten sind der Beginn eines effektiven und effizienten Facility-Management-Prozesses. Als Grundlage für die Erarbeitung einer Bedienungsanleitung dient die Instandhaltungs-Richtlinie SWKI 95-2.
Die Fachfirmen sollen auf der Basis dieser Richtlinien bei der Kundschaft für die regelmässige Wartung eintreten.
Dabei sind folgende Punkte zu befolgen:

- Das Wartungskonzept müsste bereits im Planungsstadium in Form eines Kostenvoranschlages thematisiert werden.
- Das Konzept sollte spätestens nach Erstellen der gebäudetechnischen Anlagen umgesetzt werden.
- Allfällige bestehende gebäudetechnische Anlagen müssen in dieses neue Wartungskonzept integriert werden.

Die Eigentümer respektive Nutzer dürfen Instandhaltungsarbeiten nur durch geschultes Personal oder durch Fachfirmen ausführen lassen.

10.8 Anlagendokumentation

Damit auf einer Anlage die wichtigen Informationen und Daten vorliegen, sollte generell für jede Anlage ein Anlagenordner mit dem nachstehenden Informationsmaterial erstellt werden.

- Adressen Unternehmer und Servicestelle, respektive auch für Störungsmeldung
- Berechnungsgrundlagen der Wärmepumpenanlage, Grundlagedaten und Berechnung Wärmeerzeugerleistung
- Technische Daten der Wärmepumpe, Umwälzpumpen etc.
- Bei Anlagen mit Erdwärmesonden: Protokoll Erdwärmesonden-Dimensionierung nach Norm SIA 384/6, Bohrprofil der Erdwärmesondenbohrfirma und Plan Sondenposition(en)
- Bei Anlagen mit Luft-Wasser-Wärmepumpen: Disposition (Aufstellung) und Lärmschutznachweis
- Inbetriebnahmeprotokoll Lieferant WP
- Inbetriebnahmeprotokoll Installationsfirma, inkl. Protokoll Einregulierung Massenströme und Berechnungen Druckverluste
- Betriebsanleitungen aller wichtigen Komponenten
- Prinzip- und Elektroschema
- Bau-, EVU- und Erdwärmesonde-Bewilligungen
- Diverses

Prozess Garantiemanagement	
Prozess-Ziel	Mängel, die unter die Garantieleistung fallen, werden vom Ersteller beziehungsweise Lieferanten behoben.
Messgrössen Vorgelagerte Prozesse	Anzahl verpasster Garantiefälle Abnahme
Nachfolgende Prozesse	keine
Leistungen	– Verjährungsfristen verfolgen – Mängelansprüche prüfen und geltend machen – Mängelbeseitigung verfolgen – Garantiemassnahmen durchführen
Kurzbeschrieb	Im Prozess «Garantiemanagement» werden Garantiefristen erfasst und überwacht. Tritt während der Garantiefrist ein Mangel auf, so wird dieser sofort nach der Entdeckung gerügt und eine Frist zur Behebung gesetzt. Die Durchführung der Mängelbehebung wird überwacht und die Behebung des Mangels überprüft. Erfolgt die Mängelbehebung trotz Mahnung nicht, so kann der Betreiber den Mangel selbst beheben lassen und die anfallenden Kosten dem Ersteller in Rechnung stellen oder bei einer allfällig vorhandenen Bankgarantie geltend machen. Vor Ablauf der Garantiefrist von grösseren Gewerken empfiehlt sich die Durchführung einer Garantieabnahme.

Tabelle 10.1: Definition des Prozesses «Garantie-Management» gemäss dem Prozess-Leistungsmodell im Facility Management (ProLeMo) von CRB.

Kapitel 11

Betrieb

11.1 Betrieb und Erfolgskontrolle

Die auf der Anlage installierten Messgeräte sollen eine Kontrolle der Betriebsparameter ermöglichen. Die Inbetriebsetzung wird im Normalfall unter bestimmten Randbedingungen durchgeführt. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Anlage bei veränderten Bedingungen entsprechend auf ihre Funktion und Energieeffizienz zu kontrollieren. Dies gilt nicht nur für die Phase direkt nach der Inbetriebsetzung – allfällige Veränderungen an der Anlage sollen nicht unentdeckt bleiben.

11.2 Betriebsüberwachung

Das Betriebspersonal soll regelmässige Betriebskontrollen durchführen. In regelmässigen Abständen sind Ablesungen der Anlagedaten im Betriebsprotokoll festzuhalten. Dieses dient als nützliches Instrument für die Überprüfung der Anlageneffizienz sowie als Grundlage für die Durchführung von Wartungsarbeiten. Wichtigste Beurteilungskriterien für die Erfolgskontrolle einer Wärmepumpenanlage stellen die Jahresarbeitszahl (JAZ) und die Jahresnutzungsgrade (WNG/SNG) dar. Diese können allerdings nur dann eruiert werden, wenn die entsprechenden Messdaten über den Energieverbrauch der Wärmepumpe inklusive Hilfsaggregate sowie die gelieferte Heizenergie vorliegen. Interessante Hinweise zum Betriebsverhalten von Wärmepumpen liefern ebenfalls die Anzahl der Verdichter-Einschaltungen, die bei den meisten in Serie hergestellten Wärmepumpen erfasst und über den Regler ausgelesen werden können. Bei Klein- und Grossanlagen sollten zudem die Betriebszeiten von allfälligen Elektroeinsätzen überwacht werden. Bei Sole-Wasser-Wärmepumpen wird empfohlen, die minimale Temperatur im Sole-Kreis regelmässig zu kontrollieren.

11.3 Instandhaltung

Allgemein
Für einen sicheren und störungsfreien Betrieb der Wärmepumpenanlage ist eine periodische Instandhaltung zu prüfen. Diese kann umgesetzt werden durch:
- Instandhaltungsvereinbarung oder
- Garantieverlängerung (mit den entsprechenden Serviceleistungen)

Es ist zu beachten, dass für die Wartung der Anlagenteile, bei denen man mit dem Kältemittel in Berührung kommt, das Personal eine «Fachbewilligung für den Umgang mit Kältemitteln» benötigt.

Wartungsheft
Bei allen Geräten und Anlagen mit mehr als 3 kg Kältemittel, unabhängig von dessen Art, muss die Anlage gemeldet und ein Wartungsheft geführt werden. Die Vignette («Etikette») zur Anlageidentifikation ist am Gerät anzubringen.

Dichtigkeitskontrolle
Eine regelmässige Dichtigkeitskontrolle muss bei allen Geräten und Anlagen mit mehr als 3 kg ozonschichtabbauenden oder in der Luft stabilen Kältemitteln durchgeführt werden (siehe auch Wegleitung «Stationäre Geräte und Anlagen mit Kältemitteln, Wartungsheft, Dichtigkeitskontrolle, Meldepflicht»).
Für dauerhaft geschlossene Kompaktanlagen (Definition gemäss SN EN 378, z. B. gelötete oder geschweisste Verbindungen im Kältekreis) gelten längere Fristen.

11.4 Betriebsoptimierung

Eine Anlage, die optimal betrieben wird, hat in der Regel keine Störungen, braucht weniger Energie, reduziert damit die Betriebskosten und führt allenfalls sogar zu behaglicherem Raumklima. Bei der Inbetriebsetzung wird oft ein Betriebszustand einreguliert und einige Einstellungen (z. B. Heizkurve) werden nur nach Erfahrungswerten vorgenommen. Erst während des Betriebes können die Einstellungen der Anlage optimiert, d. h. auf den tatsächlichen Bedarf ausgerichtet werden. Die Betriebsoptimierung bleibt damit eine Daueraufgabe (Prozess), weil sich die Nutzungsbedingungen im Verlaufe der Zeit oft ändern.

Die Zielsetzungen von Betriebsoptimierungen sind grundsätzlich: optimale Einstellung einer technischen Anlage, Angebot der Energie auf dem benötigten Temperaturniveau, Bereitstellung der Energie zum tatsächlich benötigten Zeitpunkt, Erreichung möglichst hoher Wirkungsgrade bei der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung. Dabei müssen stets die sicherheitstechnischen und hygienischen Anforderungen eingehalten werden.

Hinweis: Die Betriebsoptimierung ist gemäss Leistungsmodell SIA 112 eine von der Bauherrschaft zu bestellende Zusatzleistung.

Konzept der Betriebsoptimierung

Bei der Betriebsoptimierung (BO) werden drei Eingriffsebenen unterschieden (Quelle: EnergieSchweiz):

- Normalbetrieb: Betriebsoptimierung durch Kontrollen, Aufzeichnungen und bessere Einstellung der Anlagen (Regelung). Es sind keine Investitionen nötig, ausser für laufenden Unterhalt. Zudem braucht es kein spezielles BO-Knowhow respektive externe Fachspezialisten.
- BO-Unterstützung: Gezielte Betriebsoptimierung aufgrund spezifischer

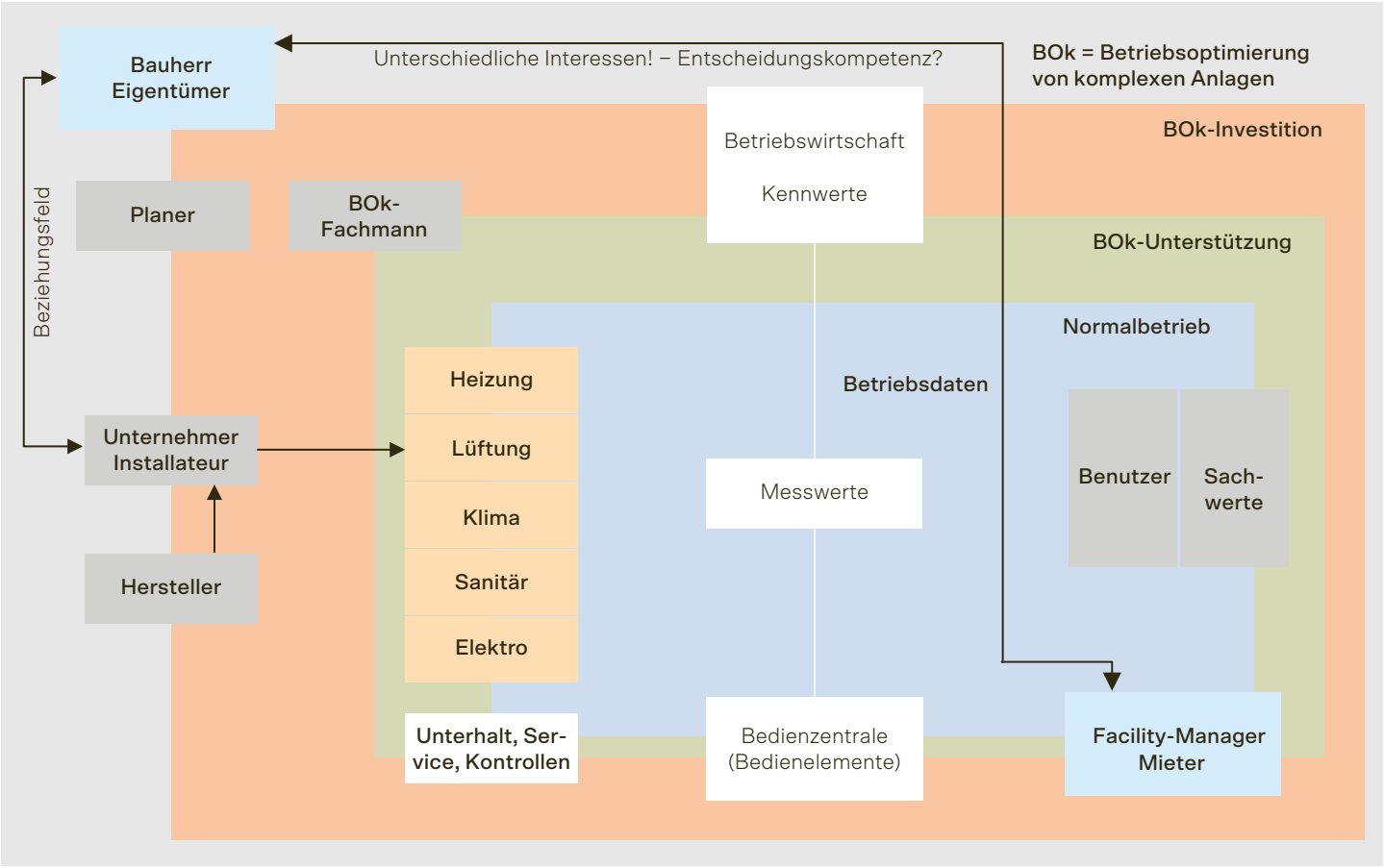


Bild 11.1: Das 3-Ebenen-BOk-Modell zeigt die verknüpften Interessenkreise sowie die für den BO-Prozess relevanten Kreisläufe (Quelle: Grundlagen für die Betriebsoptimierung von komplexen Anlagen (BOk), BFE 2002).

Auswertungen und Messungen; Sofortmassnahmen mit minimalen Investitionen (ca. 3000 Franken); eine BO-Fachperson ist beizuziehen.
- BO-Investitionen: Betriebsoptimierung durch selektive Investitionen. Die sorgfältige Analyse der Anlagen mit der Auswahl jener Massnahmen mit dem grössten Einsparpotenzial respektive dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis bildet die Grundlage für das weitere Vorgehen (inklusive Budgetierung). BO-Investitionen lassen sich am besten realisieren, wenn ohnehin eine Sanierung oder ein Ersatz von einzelnen Komponenten ansteht. Dabei ist es wichtig, pro Eingriffsebene die entsprechenden Stakeholder zu involvieren.

Von einer Betriebsoptimierung sind viele Interessenskreise tangiert, für eine erfolgreiche Umsetzung sollten alle Beteiligten mit einbezogen werden. Planungshilfe bei der energetischen BO ist das Merkblatt SIA 2048:2015. Dabei kann BO als Prozess wie in Bild 11.2 dargestellt werden.
SIA 2048:2015 unterscheidet zwischen energetischer Betriebsoptimierung nach Übergabe und als Daueraufgabe.

Als wesentlicher Unterschied stehen zu Beginn der BO keine gemessenen Betriebsdaten zur Verfügung.
- Das Schwergewicht der energetischen Betriebsoptimierung unmittelbar nach der Übernahme liegt in folgenden Bereichen: Stabilität der verschiedenen Regelkreise im dynamischen Betrieb prüfen; Regelsequenzen (z. B. Heizen, WRG, Kühlen) im dynamischen Betrieb prüfen; Ein-Aus- und Regelverhalten bedarfsmässig gesteuerter Anlagen (z. B. Frequenzumformer, Stufenschaltungen, Kaskadenschaltungen) im realen Betrieb analysieren und prüfen (z. B. mittels Trendanalysen); Funktion und Energieeffizienzkennzahlen von energierelevanten Anlagen (z. B. Kältemaschinen, WRG, Wärmepumpen, Abwärmenutzungen, Solaranlagen) kontrollieren; Heiz- und Kühlkurven optimieren; hydraulischen Abgleich optimieren.

Hinweis: Der Inbetriebnahme und Unterhaltung der Messwerterfassung ist ebenfalls Aufmerksamkeit zu schenken. Insbesondere ist die Sinnhaftigkeit der erfassten Messwerte zu überprüfen. Bewährt hat sich dazu das Erstellen und

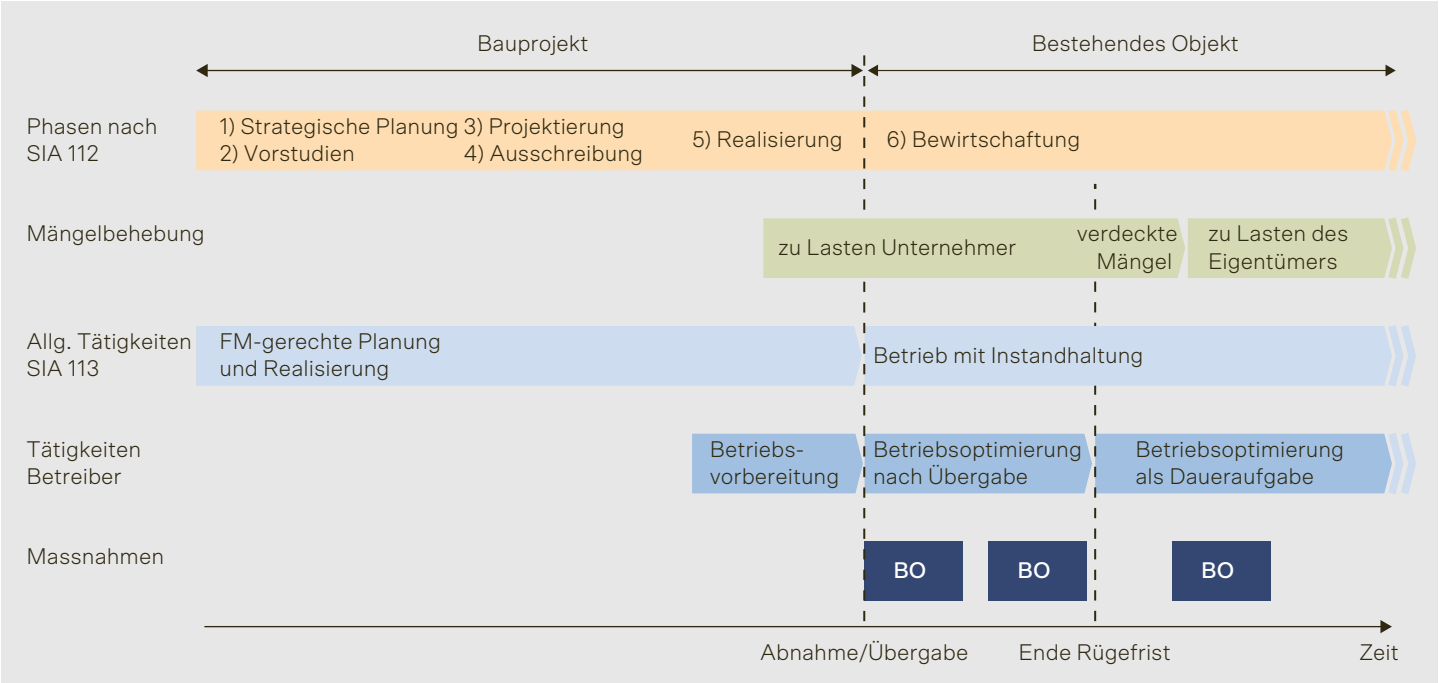


Bild 11.2: Prozess der energetischen Betriebsoptimierung (Quelle: Andreas Genkinger, angelehnt an Merkblatt SIA 2048).

Überprüfen von Energiebilanzen. Als Daueraufgabe sind mindestens folgende Aufgaben vorgesehen:
- Auswertung der relevanten Energiedaten und Vergleich mit Soll- oder Referenzwerten; periodische Kontrollen der Funktion und der Energieeffizienzkennzahlen relevanter Abwärmenutzungs- und WRG-Anlagen (z. B. Nutzung der Kondensationswärme im Abgas von Feuerungen) sowie von Anlagen zur Nutzung von Umweltenergien (z. B. Solaranlagen, Wärmepumpen); Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und deren Wirkung; Identifikation von Massnahmen bei Umnutzungen (samt Erfolgskontrolle); Trendanalysen und temporäre Messungen.

Das SIA-Merkblatt enthält auch eine Checkliste, welche Daten – sofern zutreffend – zu erheben sind. Die wichtigsten Punkte sind hier auszugsweise genannt:
- Baujahr der Anlage (und allfälliger Sanierungen)
- Zählerdaten der Netzbetreiber respektive Versorgungsunternehmen (Elektro – wenn möglich für Wärmepumpen separat –, Gas, Öl, Fernwärme, Wasser): idealerweise die letzten drei Jahre als Wochenwerte (mindestens als Monats- oder Jahreswerte). Bei Grossbezügern liefert der Netzbetreiber (Gas- oder Elektrizitätswerk) ¼-Stunden-Werte elektronisch in Tabellenform.
- Private (Unter-)Zählerdaten
- Aktuelle Zählerstände
- Betriebsdaten (z. B. Betriebsstunden pro Brennerstufe, der Lüftungsanlagen, der Wärmepumpe etc.).
- (zusätzliche) Wärmeerzeuger

Bei der Auswertung und Analyse von Wärmepumpen und Kältemaschinen kommen noch folgende prüfenswerte Punkte hinzu:
- eingesetztes Kältemittel
- geforderte Kühlmedium- bzw. Kaltwasser-Temperaturen, Bedarfsanpassung dieser Temperaturen
- Speichertemperaturen
- Gleichzeitigkeit der Kälteerzeugung, Kälteverteilung, Kältespeicherung (Anlaufzeiten berücksichtigen)
- Konzentration des Frostschutzmittels in Rückkühlleitungen
- Verdichter mit Frequenzumformer
- Softstarter
- Rückkühlsysteme, Abwärmenutzung
- Kondensations- und Verdampfungstemperaturen
- Betriebszeiten (pro Verdichterstufe)
- Betriebsreduktion oder Anlagestillstand (Nacht, Wochenende, Feiertage, Ferien), vorausschauende Regelung
- Betriebspunkt, Wirkungsgrad Teillast und Volllast
- Freecooling (Umgehung Kältemaschine), Mischbetrieb
- Sequenzregelung bei mehreren Kälteerzeugungsanlagen
- Sauberkeit der Komponenten

Massnahmenkatalog: Siehe «Grundlagen für die Betriebsoptimierung von komplexen Haustechnikanlagen». Massnahmen pro Fachgebiet. Dort sind mögliche Optimierungsmassnahmen und deren Sparpotenzial aufgezeigt.

11.5 Störungen und Störungsbehebung

Jede Wärmepumpe muss gegen unerwünschte Zustände abgesichert werden. Die wichtigsten Ursachen von Störungen sind in Bild 11.3 dargestellt.



Bild 11.3: Mögliche Störungen und Störungsursachen bei Wärmepumpenanlagen.

Kapitel 12

Anlagen für höhere Leistungen

12.1 Allgemeines

Wärmepumpenanlagen mit Heizleistungen über 20 kW decken unterschiedliche Aufgaben ab. Sie unterscheiden sich je nach Anwendung, Einsatzzweck, Temperaturniveau, Teillastfähigkeit und gefordertem Funktionsumfang. Sie werden häufig für Gebäudeheizung und -kühlung, Warmwasserbereitung, aber auch vermehrt für Prozesswärme in der Industrie eingesetzt.

Bei grösseren Gebäuden können 20 bis 350 kW Heizleistung benötigt werden, allenfalls auch mehr. Bei Industrie- und Prozessanwendungen, wie die Dampferzeugung werden Spezialanlagen bis in den MW-Bereich eingesetzt. Hier findet oft eine Prozessintegration statt, bei der die Wärmepumpe im gesamten Betriebskonzept eingebunden ist. Ähnlich hohe Leistungen treten bei Fern- und Nahwärmeanlagen auf, einer weiteren wichtigen Anwendung.

Bild 12.1 zeigt die Verteilung der installierten Heizleistungen in den jeweiligen Leistungsbereichen für Öl- und Gas-Kessel sowie Wärmepumpen, die 2024 verkauft wurden. Gut zu erkennen ist, dass die Anwendungen bei Leistungen unter 20 kW grossenteils mit Wärmepumpen realisiert wurden. Bei höheren Leistungen wurde der Bedarf oft mit Öl- und Gaskesseln abgedeckt. Dieser Anteil liesse sich mit der vermehrten Herstellung, dem Angebot und Einsatz grösserer Wärmepumpen künftig reduzieren.

12.2 Einbindung

Bei Anlagen mit höheren Leistungen und hohen Betriebsstundenzahlen ist die korrekte Einbindung in das Heizsystem umso wichtiger, weil hohe elektrische Leistungen lange anstehen. Dies führt zu hohen Energieverbräuchen, die bedeutende Betriebskosten verursachen können. Deshalb ist eine höchstmögliche Betriebseffizienz bei solchen Anlagen besonders wichtig.

Schlecht eingebundene Wärmepumpen können Unzulänglichkeiten einer Wärmeversorgung nicht kompensieren. Die gute Anpassungsfähigkeit der Wärmepumpe an die Betriebsbedingungen (Quellen- und Senkentemperaturen sowie Durchflüsse) ist betrieblich ein Vorteil. Ein Nachteil dieser Eigenschaft ist

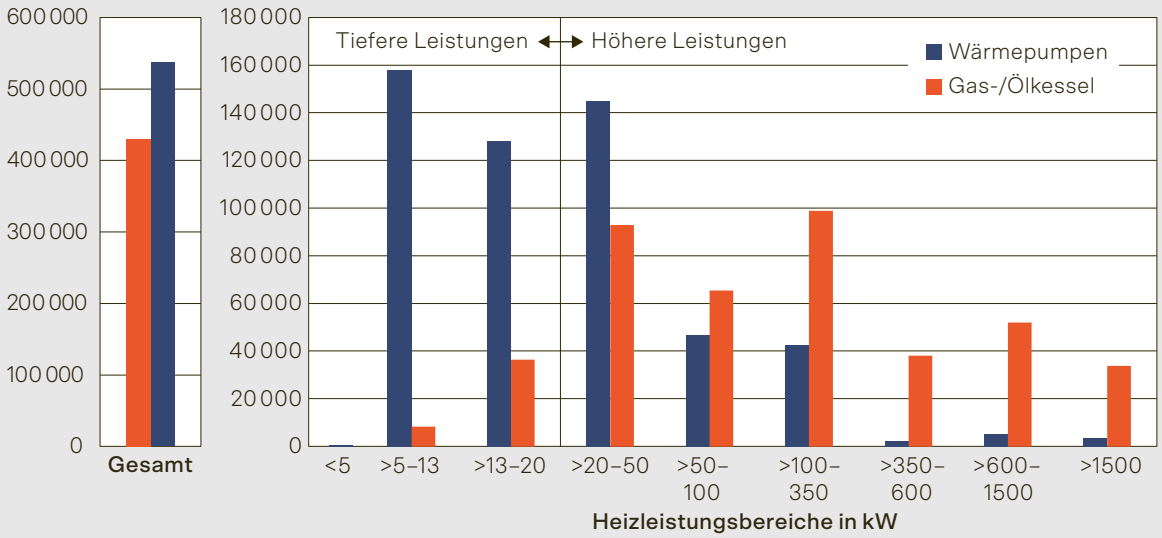


Bild 12.1: Vergleich der installierten Heizleistungen von Öl-/Gas-Kesseln zu Wärmepumpen im Geschäftsjahr 2024, geordnet nach Leistungsgruppen. *Die mittleren Heizleistungen wurden mit 4, 10, 17, 40, 80, 260, 500, 1200 und 1800 kW angenommen und mit der Anzahl der verkauften Geräte multipliziert. (Quelle: FHNW/INEB)

es aber, dass Anlagenfehler durch die Wärmepumpe «abgefedert» werden. Die Maschine heizt und läuft zwar störungsfrei, sie verbraucht aber mehr Strom also nötig und lebt weniger lang. Oft wird dies spät oder gar nicht entdeckt. Regelmässige Vergleiche mit den Planungsdaten und Betriebsoptimierungen sind also wichtig.
Wärmepumpen müssen also unbedingt korrekt in die Gebäudetechnik eingebunden werden. Bei kleineren Anlagen, die den grössten Anteil am Markt haben, gibt es abgestimmte Standardkomponenten, Empfehlungen und Richtlinien. Dies hilft, die Anlagen gut zu gestalten, zu dimensionieren, zu installieren und in Betrieb zu nehmen, sodass sie lange und effizient laufen. Hierzu gehören qualitätssichernde Abläufe, Auslegungstools, vorgegebene hydraulische Standardschaltungen und -schemen, Unterlagen und Checklisten und Weiteres, das im Rahmen des Wärmepumpen-Systemmoduls (WPSM) bei Heizleistungen von bis 15 kW vorgegeben wird. Diese Vorgaben sind bei den Planern anerkannt und werden von den Installateuren gut umgesetzt.
Bei den grösseren Wärmepumpenanlagen gelten sehr ähnliche Empfehlungen und Richtlinien. Die technischen Anforderungen des WPSM sind daher für einfache Anlagen bis 100 kW grundsätzlich anwendbar.
Während mit dem WPSM vor allem Standards für die hydraulischen Schemen, die Vorgaben für die Speicher, die Auslegekriterien und Checklisten usw. eingeführt werden konnten, unterliegen grössere Wärmepumpen meist komplexeren und speziellen Anforderungen. Aus diesem Grund werden sie sehr oft als massgeschneiderte Einzellösungen umgesetzt. Die Integration einer Maschine in einen Industrieprozess ist zudem besonders anspruchsvoll, wenn Teillastzustände und unterschiedliche Temperaturen gefahren werden müssen. Für alle Anwendungen gilt: Ein Sicherheitskonzept muss integraler Bestandteil des Anlagenkonzeptes sein.

Grössere Wärmepumpen werden häufig eingesetzt in:
- Einzelgebäuden
- Wärmeversorgungen für Überbauungen
- Fern- und Nahwärmesystemen
- Industrieanwendungen (Wärme, Kälte)

12.3 Einzelgebäude

Zu den Anwendungen bei Einzelgebäuden gehören die Bereitstellung von Wärme für Heizen und Warmwasser sowie von Kälte für die Gebäudekühlung und -klimatisierung. Bei den Wohngebäuden geht es hauptsächlich um die Deckung des Wärmebedarfs. Bei den kommerziellen Gebäuden, Verwaltungen, Industriegebäuden und Produktionshallen wird auch die Kältebereitstellung gefordert.
Es ist aber absehbar und anzunehmen, dass die Kühlanwendungen infolge der Klimaerwärmung auch bei Wohngebäuden zunehmen werden. Wenn dabei gleichzeitig die Verdampfer- und Kondensatorleistung genutzt wird, ist dies die effizienteste Anwendung der Wärmepumpe.
Das thermische Verhalten eines Gebäudes hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie Gebäudestruktur und -konstruktion, Fassadentechnik, meteorologische Bedingungen und technische Einrichtungen.
Bevor Energieoptimierungen angepackt werden können, sind gute Kenntnisse des thermischen Verhaltens des Gebäudes unerlässlich. Diese helfen einerseits, die Bewohnenden beim Energieverhalten zu beraten und ihren Komfort zu verbessern, und andererseits die Energiekosten zu senken, sowie, optimalerweise als erstes, den Heizbedarf durch verbessern der Gebäudehülle zu reduzieren. In diesem Zusammenhang muss stets ein Kompromiss bei der Auswahl der richtigen Wärmepumpenlösung oder des Heizungserneuerungskonzepts gesucht werden.

Wichtig und teilweise entscheidend sind dabei auch Faktoren wie
- die Platzverhältnisse im Gebäude,
- die Verfügbarkeit und Einbindung von Wärmequellen respektive -senken,
- das Heiz- beziehungsweise Kühllastverhalten des Gebäudes,
- die Möglichkeiten zur Leitungsführung,
- die Anforderungen bezüglich Schall und
- die Anforderungen bezüglich Effizienz.

Die Lösungen sind bei Erneuerung und beim Neubau unterschiedlich einfach umsetzbar. Die örtlichen Gegebenheiten sind vor allem bei Erneuerungen meist ausschlaggebend und die Platzverhältnisse oft schwierig.
Bei Neubauten sind die Heizanwendungen bei Wärmeabgabesystemen mit niedrigen Abgabetemperaturen von maximal 35 °C sehr effizient. Bei Erneuerungen und Heizungsersatz sind oft höhere Abgabetemperaturen nötig, was die Effizienz reduziert.
Die Nennleistungen der Wärmepumpen bei mittelgrossen Mehrfamilienhäusern liegen im Bereich 30 bis 100 kW bei Bestandsgebäuden, bei gut gedämmten Neubauten bei 15 bis 50 kW. Bei kommerziellen und industriellen Gebäuden sind die Werte in der Regel höher.
Bei der Warmwasserbereitung und -verteilung ist eine hohe Effizienz wegen der hohen geforderten Temperaturen an den Zapfstellen nicht einfach zu realisieren. Es entstehen Wärmeverluste bei der Verteilung und Verluste der Schichtungseffizienz im Warmwasserspeicher infolge der Zirkulation. Deshalb muss die Anlage gut konzipiert und der Betrieb bezüglich Effizienz optimiert werden.
Hier stellt sich die Frage nach zentraler oder dezentraler Warmwasserbereitung. Eine funktionale Trennung von Heizen und Warmwasserbereitung zugunsten höherer Effizienz sollte jeweils geprüft werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Warmwasserbereitstellung in der Schweiz einen relevanten Stromverbrauch verursacht, weil viele Gebäude mit Elektroboilern ausgerüstet sind. Werden diese durch Warmwasser-Wärmepumpen ersetzt, könnte sich der Stromverbrauch deutlich reduzieren. Die ist nicht nur für die Anlagenbetreiber vorteilhaft, sondern auch zwingend nötig, um wichtige Winterstromeinsparungen zu realisieren.

Ausführungsvarianten bei Einzelgebäuden

Aussenaufgestellte Luft-Wasser-Wärmepumpen als Einzelgeräte: In höheren Leistungsklassen sind Einzelgeräte als Standardprodukte bis etwa 100 kW erhältlich. Teilweise werden auch Geräte angeboten, die ursprünglich für die Kühlung konzipiert wurden. Geräte, die explizit auf Wärmeanwendung konstruiert wurden, arbeiten meist etwas effizienter. Besondere Aufmerksamkeit gilt den Schallemissionen, da die Geräte infolge des hohen Luftdurchsatzes gut hörbar sind. Hier kann es sein, dass Schallschutzmassnahmen nötig werden, um den Lärmschutznachweis führen zu können. Möglich sind auch Lösungen mit Kaskadenschaltungen leistungsschwächerer Geräte, die auch in Summe leiser als ein Grossgerät sein können. Weitere Informationen siehe Kapitel 8 «Akustik und Schallschutz».

Aussenaufgestellte Luft-Wasser-Wärmepumpen als Kaskaden mehrerer kleineren Geräte: Hier werden kleinere Standardgeräte in Kaskade parallelgeschaltet. Dabei wird die Leistung durch Zu- und Abschalten von Geräten und durch möglicherweise vorhandene Inverter geregelt. Eine übergeordnete Regelung sorgt für die korrekte Ansteuerung der einzelnen Maschinen. Wichtig ist hier, auf den Lastausgleich der Geräte zu achten – alle Geräte sollen ungefähr dieselbe Anzahl Betriebsstunden erreichen.

Laufen mehrere Wärmepumpen zeitgleich, so addieren sich ihre Schallemissionen. Je nach Aufstellung, Ausrichtung und Abstand der einzelnen Geräte ist der Effekt unterschiedlich stark. Der Lärmschutznachweis kann auch hier eventuell nur mit speziellen Schallschutzmassnahmen erfüllt werden. Bei Teillast sind in der Regel nicht alle Geräte gleichzeitig in Betrieb.

Dachaufgestellte Luft-Wasser-Wärmepumpen als Einzelgeräte: Hier werden grössere Geräte in der Regel auf Flachdächern installiert. Nebst den direkten Schallemissionen gilt es, den Körperschall zu beachten. Die Geräte müssen weich auf Gummipuffern oder Federn aufgestellt werden, um sie schalltechnisch zu entkoppeln. Die Anschlussleitungen müssen flexibel ausgeführt sein, damit auch diese den Schall nicht übertragen, was generell für alle Wärmepumpenanlagen gilt.
Anspruchsvoll kann die hydraulische Anbindung an das allenfalls bestehende Heizungssystem sein. Bei einem Heizungsersatz ist häufig eine längere Verbindung zum Heizungskeller nötig. Im Falle eines Neubaus kann die hohe Aufstellposition der Wärmepumpen im Konzept bereits berücksichtigt werden.

Dachaufgestellte Luft-Wasser-Wärmepumpen als Kaskaden mehrerer kleinerer Geräte: Hier gelten dieselben Überlegungen wie bei bodenmontierten Einzelgeräten. Die hydraulische Verbindung ist eine Parallelschaltung, getrennt wird mit Absperr- oder Rückschlagventilen. Eine übergeordnete Regelung muss die Master-Slave-Ansteuerung der einzelnen Maschinen sicherstellen. Bezüglich Körperschall gilt dasselbe wie bei den dachmontierten Einzelgeräten.

Innenaufgestellte Luft-Wasser-Geräte mit Kanalanschluss: Hier muss der Lüftungsanschluss für Ansaug- und Abluft ausreichend gross dimensioniert werden, damit keine zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten und -geräusche auftreten. Die Schallemissionen des Geräts und des Ventilators müssen allenfalls mit Luftkanal-Schalldämpfern auf zulässige Werte reduziert werden. Bei einer Erneuerung muss der Platz und die Öffnungen für die Luftkanäle geschaffen werden. Die Umsetzung ist beim Neubau einfacher, da die Massnahmen im Vorfeld planbar sind.



Bild 12.2:
Auf dem Dach eines historischen Gebäudes im Gewerbeareal «The Valley» in Kemptthal wird die reversible Luft-Wasser-Grosswärmepumpe installiert. (Quelle: CTA AG/EKZ)

Dachaufgestellte Luft-Wärmeübertrager, Sole-Zwischenkreis und Sole-Wasser-Wärmepumpe im Gebäude: Diese Lösung wird oft bei gewerblichen oder industriellen Gebäuden gewählt, da sie sich gut skalieren lässt und flexibel ausgeführt werden kann. Die Wärmepumpe mit den Verdichtern als Schallquelle befindet sich im Gebäude. Die Lösung ist somit schall- und vibrationstechnisch gut beherrschbar. Hier muss vor allem darauf geachtet werden, dass die zusätzliche Wärmeübertragung auf das Zwischenkreis-Medium mit kleiner Temperaturgrädigkeit geschieht. Nur so kann die Effizienzreduktion infolge des leicht höheren Temperaturhubs der Wärmepumpe begrenzt werden. Diese Lösung ist vor allem bei gleichzeitigem Wärme- und Kältebedarf sinnvoll.
Die Zwischenkreis-Lösung bietet sehr viele Möglichkeiten der hydraulischen Einbindung, etwa von photovoltaisch-thermischen Sonnenkollektoren (PVT), Erdwärmesonden (EWS) und Eisspeichern. Eisspeicher sind eine interessante Lösung, wenn eine Kühlanwendung im Sommer aus dem winterlichen Energieentzug des Eisspeichers abgedeckt wird. Dabei wird der Speicher abgetaut, also aufgeladen.

Sole-Wasser-Wärmepumpe mit EWS-Anbindung: Die Sole-Wasser-Wärmepumpe mit EWS-Anbindung ist eine der effizientesten, aber oft bezüglich Investitionskosten auch teuersten Lösungen für eine gegebene Leistung. Bei der Bildung von Lösungsvarianten sollte sie aber mituntersucht werden. Ist der Besitzer der Anlage auch der Nutzer, so zeigt die Vollkostenrechnung die Vorteile dieser Lösung. Je nach Bau- oder Gewässerschutzzone sind EWS aber nicht bewilligungsfähig.
Gängige Konzepte sind Einzelgeräte oder Kaskaden mehrerer kleinerer Geräte, um Leistungsstufen fahren oder um betriebliche Redundanzen gewährleisten zu können. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe ist schalltechnisch bei höheren Leistungen im Gebäude anspruchsvoll. Hier muss die Körperschallübertragung zwingend begrenzt werden. Die Luftschallübertragung lässt sich mit ausreichender Schalldämmung der Heizzentrale begrenzen.
Aufgrund der Entwicklung bei Kältemitteln, wie der zunehmende Einsatz von Propan R290, kommen vermehrt aussenaufgestellte Geräte auf den Markt. Dies hat Vorteile betreffend Brand- und Explosionsschutz. Es zeichnen sich aber auch für innenaufgestellte Geräte Lösungen ab, die betreffend Sicherheitsanforderungen unkompliziert sind. Dazu gehören Gasdetektoren und Sturmlüftungen wie auch andere Verfahren, welche die Konzentration des Propangases in der Luft auf unterhalb der Zündgrenze reduzieren.

Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit See-, Grund-, Abwasser- oder Abwärmenutzung: Die höchste Effizienz erreichen Wasser-Wasser-Wärmepumpen mit Betrieb bei den höheren Quellentemperaturen von See-, Grund-, Abwasser oder Abwärme. Deshalb sollte immer geprüft werden, ob solche Quellen in der Nähe vorhanden sind und angebunden werden können.

12.4 Überbauungen

Es stehen mehrere Realisierungskonzepte zur Verfügung. Dabei wird hauptsächlich unterschieden, wo die Wärmepumpen für die verschiedenen geforderten Leistungen und Temperaturniveaus installiert sind, und ob eine Wärmepumpe für Heizen und Warmwasserbereitung, oder ob die Funktion auf mehrere Systeme aufgeteilt wird.

Zentrale Wärmebereitung: Normalerweise wird hier sichergestellt, dass beispielsweise das am weitesten entfernte Gebäude mit ausreichender Temperatur versorgt wird. Bei öl- und gasbeheizten Anlagen wurde die minimale Vorlauftemperatur auf das Gebäude eingestellt, das die höchsten Temperaturen

benötigt respektive am entferntesten ist. Bei Wärmepumpenanlagen sind die Temperaturniveaus respektive der Temperaturhub entscheidend für die Effizienz. Deshalb muss bei der Systembetrachtung allenfalls eine Sonderlösung für das am weitesten entfernte Gebäude gefunden werden, beispielsweise in Form einer Booster-Wärmepumpe.
Bei einem Heizungsersatz eines bestehenden fossilen Systems durch eine Wärmepumpenlösung muss geprüft werden, wie und wo welche Funktion neu abgedeckt werden soll. Dazu folgendes Beispiel: Eine Überbauung im Bestand wird zentral mit einer Ölfeuerung in einem Heizungskeller beheizt. Das Warmwasser wird mit Elektroboilern in den einzelnen Gebäuden beziehungsweise Wohnungen bereitet. Neu geplant ist eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer EWS als Quelle.
Falls sich die Wärmeabgabesysteme in den Gebäuden für niedrige Abgabetemperaturen eignen, kann der Heizungsvorlauf ab der Zentrale auch tief gehalten werden. Wird das Warmwasser ebenfalls zentral bereitet und gespeichert, beispielsweise mit der gleichen Maschine, muss auf die Hygiene in der Verteilung geachtet werden. Dafür ist dann eventuell eine Zirkulation mit Begleitheizung erforderlich, die für ausreichende Temperatur im zirkulierenden Wasser sorgt. Hierfür wird aber in der Regel ziemlich viel Energie benötigt, die die Effizienz des gesamten Systems markant herabsetzt.

Zentrale Heizwärmebereitung und dezentrale Warmwassererwärmung: Hier wird eine zentrale Wärmepumpe nur für die Heizwärmebereitung eingesetzt. Die Warmwasserbereitung und -speicherung findet dezentral in den einzelnen Gebäuden statt. Hierfür werden dezentrale Wärmepumpen eingesetzt, die ihre Quellenenergie vom Heizungskreis, der Aussenluft oder vom EWS-System beziehen.

Dezentrale Wärmebereitung: Eine Variante ist, dass die eine zentrale Wärmepumpe durch mehrere dezentrale Wärmepumpen in den einzelnen Gebäuden ersetzt wird. Diese sind am gleichen EWS-System angeschlossen. Diese Wärmepumpen können auch das Warmwasser für das jeweilige Gebäude bereiten. Es handelt sich dabei um eine Lösung mit geteilter EWS-Quelle. Für einen Systementscheid müssen die Varianten hinsichtlich Effizienz, Umsetzbarkeit, Komplexität, Investitions-, Wärmegestehungs- und Betriebskosten sowie Unterhalt verglichen werden.

Tabelle 12.1: Kategorien von Fern- und Nahwärmenetzen mit den üblichen Temperaturniveaus für verschiedene Zwecke.

Kategorie	Temperaturniveau Warmleiter
Hochtemperaturnetz	$T_{WL} \geq 60\,°C$
Niedertemperaturnetz	$60\,°C > T_{WL} \geq 0\,°C$
– Heizen	$60\,°C > T_{WL} \geq 30\,°C$
– Vorwärmen	$30\,°C > T_{WL} \geq 20\,°C$
– Kühlen, Anergie	$20\,°C > T_{WL} \geq 0\,°C$

12.5 Fern- und Nahwärmesysteme

Bei Fern- und Nahwärmesystemen ist die Anwendung eine generelle Wärmebereitstellung für verschiedene Zwecke, je nachdem, welche Gebäude mit welchen Nutzungen angeschlossen sind. Man unterscheidet Hoch- und Niedertemperaturnetze, die Niedertemperaturnetze in Netze für Heizen, Vorwärmen und Kühlen/Anergienetze. Die Temperaturen sind in Tabelle 12.1 aufgeführt.
Fern- und Nahwärmesysteme mit Wärmepumpen sind besonders effizient, wenn die Kälte ebenfalls gleichzeitig genutzt werden kann. Die Leistungen sind hoch, und oft werden nebst Kolben- und Schraubenverdichtern auch zunehmend ölfreie, magnetgelagerte Turboverdichter eingesetzt, die sich sehr gut bei niedrigen Temperaturhüben eignen. Die Anergienetze sind effiziente Lösungen, wenn verschiedene Nutzungen wie Heizen und Kühlen mit saisonalen EWS-Speichern kombinierbar sind.

12.6 Industrieanwendungen

Eine spezielle Klasse sind die Industrieanwendungen. Oft sind höhere Abgabetemperaturen von 70 bis über 150 °C erforderlich. Einzelne Anwendung benötigen Temperaturen bis über 200 °C. Diese Anwendungen machen rund 20 % des Gesamtenergiebedarfs aus. Die heutigen Anwendungen werden oft mit fossil befeuerten Heizkesseln realisiert, die es in den kommenden Jahren zu ersetzen gilt.
Hier müssen Hochtemperaturwärmepumpen eingesetzt werden, die speziell und meist auftragsbezogen dimensioniert und hergestellt werden. Die Effizienz solcher Wärmepumpen ist wegen des hohen Temperaturhubs weniger hoch. Wenn die Anlagen geschickt in die Prozesse integriert sind, werden dennoch gute Gesamtsystem-Nutzungsgrade erzielt. Bild 12.3 zeigt die erreichbaren Effizienzen. Die COP-Werte basieren auf angenommenen 40 °C Quellentemperatur und sind in Funktion des Temperaturhubs und der Gütegrade (Carnot 100 %, 60 %, 45 % und 30 %) angegeben.

12.7 Projektierung und Umsetzung

Das Einsatzgebiet einer Wärmepumpe entscheidet über die Anforderungen an Leistung und Funktionsumfang – zu denken wäre hier etwa an Industrie, Gewerbe, Wohnungsbauten oder Fernwärme. Für die Projektierung müssen die Lastgänge von Heiz- und Kühlbedarf ausreichend bekannt sein. Die daraus abgeleiteten Jahresdauerlinien werden dann für den Systementscheid bezüglich Deckung der Band-, Teil- und Spitzenlast mit Berücksichtigung eines allenfalls vorhandenen Bivalenzpunkts hinzugezogen. Dabei wird definiert, wie viele Wärmepumpen mit welchen Leistungen für die Anwendung sinnvoll sind, und welche Quelle genutzt werden soll. Der Einsatzbereich der Wärmepumpen muss abgestimmt und allenfalls müssen die Kältekreise für die Anwendung modifiziert werden. Die Schnittstellenanalyse liefert die Grundlage zur Integration der Anlage in bestehende Heizungssysteme mit der Speicheranbindung und der Verknüpfung der Steuerung und Regelung.
Die Auslegung beginnt mit der Wahl von

- Wärmequelle (Luft, Grundwasser, Seewasser, Erdreich, Abwärme, Prozesswärme usw.),
- Verdichter (Leistung, Temperaturhub, Einsatzgebiet) und
- Kältemittel (Umweltverträglichkeit, GWP-Wert, Brennbarkeit, Einsatzgebiet usw.)

Je nach Konzept können mehrere Quellenarten eingebunden werden. Dies kann beispielsweise saisonal, aufgrund der Effizienz oder nach Verfügbarkeit geschehen.
Es folgt die Leistungsdimensionierung aus der Heizlastberechnung mit den geforderten Vor- und Rücklauftemperaturen. Eventuell gibt es eine gleichzeitige Wärme- und Kälteanforderung, die den Systemnutzungsgrad erhöht. Das nötige Teillastverhalten muss definiert und geprüft werden. Hauptbeurteilungskriterien sind dabei Effizienz und Funktionserfüllung.
Das hydraulische Konzept mit Pufferspeichern, Misch-, Umschalt- und

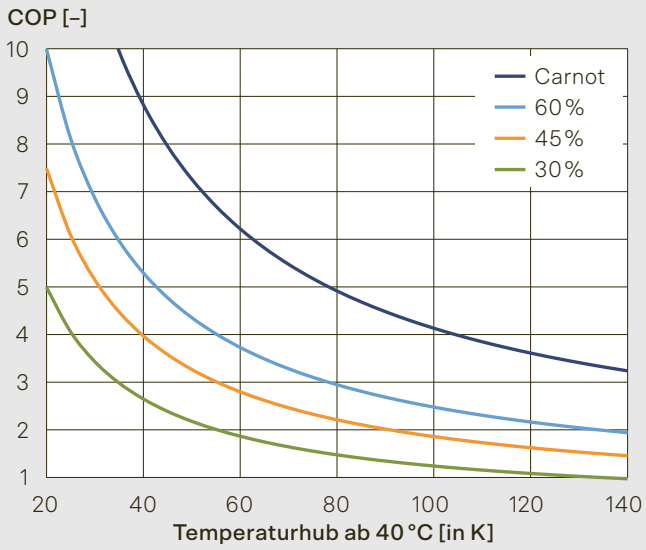


Bild 12.3: Mit Hochtemperaturwärmepumpen erzielbare COP in Abhängigkeit von Carnot-Gütegrad und Temperaturhub. (Quelle: FHNW/INEB)

Rückschlagventilen, Pumpen, Instrumenten wie Wärmezähler und Temperaturmessstellen muss ausgearbeitet werden. Dazu werden die Speichergrössen, Fördermengen und Druckverluste für die Pumpendimensionierung bestimmt und die Komponenten entsprechend ausgewählt.
Die Speichertechnik spielt eine zentrale Rolle für die Effizienz und Regelbarkeit von Wärmepumpensystemen. Pufferspeicher dienen zur Entkopplung von Wärmeerzeugung und -abnahme und reduzieren den Taktbetrieb der Wärmepumpe. Schichtenspeicher ermöglichen eine effiziente Temperaturschichtung, die vorteilhaft für Systeme mit variablen Quelltemperaturen sind – beispielsweise bei der Kombination von Wärmepumpe und Solarthermie.
Hocheffizienzpumpen (EEI < 0,23) mit Differenzdruck- oder Drehzahlregelung senken den Energieverbrauch der Umwälzung. Die Mindestdurchflüsse der Wärmepumpe müssen aber nach Herstellerangaben gewährleistet werden.
Druckhaltungssysteme wie Membranexpansionsgefässe oder Druckhaltepumpen stabilisieren den Betriebsdruck und sichern damit einen effizienten Betrieb.

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die Lebenszykluskosten (Investitions- und Betriebskosten) und die Amortisationszeit, mit Berücksichtigung einer eventuellen Förderung und Weiterem zur Beurteilung der Anlage zusammengetragen und ausgearbeitet. Für die Genehmigungen müssen Umweltauflagen, Bauvorschriften und Netzanschlussbedingungen erfüllt sein. Weitere Informationen siehe Kapitel 6 bis 9.

Planung Aufstellung, Sicherheitskonzept, Bewilligungen
Die Standortwahl ist bezüglich der Aufstellung (im Gebäude oder im Freien), des Platzbedarfs und der Zugänglichkeit für Wartung zu prüfen. Das Einbringen der Komponenten muss sorgfältig geplant werden.
Das vorgesehene Kältemittel spielt bei der Anlagenplanung eine wichtige Rolle. Im Sicherheitskonzept werden die nötigen Massnahmen festgehalten, die bei der Ausführung umgesetzt werden müssen. Allenfalls müssen Bewilligungen zum Einsatz des Kältemittels eingeholt werden.



Bild 12.4: Diese Grundwasser-Wärmepumpe in der Energiezentrale Badus speist ein Fernwärmenetz in Chur. (Quelle: CTA AG/IBC Energie Wasser Chur)

Planung Stromversorgung, Monitoring und Kommunikation
Bezüglich der elektrischen Infrastruktur gilt es, den Netzanschluss und die Transformator- und Sicherungskonzepte zu entwickeln sowie die Steuer- und Regeltechnik zu definieren. Ein Monitoring der wichtigsten Daten wie Heizleistung, elektrische Aufnahmeleistung, COP sowie Quellen- und Senkentemperaturen ist erforderlich. Die Messdatenerfassung, das Datenlogging und die Kommunikation müssen sorgfältig mit dem Betreiber geplant und vor allem abgestimmt werden. Dazu gehören Messkonzept, Datensicherheit, Visualisierung, Automation, Fernbedienung, Fernwartung, Feldbustypen und Weiteres.
Mit der Planung der Stromversorgung werden auch die Installationspunkte der Stromzähler festgelegt. Sollen Kennzahlen wie COP, JAZ oder Systemnutzungsgrade verlässlich bestimmt werden, müssen die Installationspunkte gemäss Bild 1.7 gewählt werden.
Dasselbe gilt hinsichtlich der Zähler für Wärme und allenfalls Kälte, mit denen auch die Heiz- und Kühlleistungen gemessen werden können. Siehe auch Kapitel 9.8, «Messeinrichtungen». Diese werden bei der hydraulischen Planung berücksichtigt.

Installation und Montage
Die Wärmepumpe muss einbringbar sein, das heisst, die nötigen Gebäudeöffnungen und Hebevorrichtungen müssen vorhanden sein. Bei Erneuerungen und beim Heizungsersatz kann dies erhebliche Eingriffe in die Bausubstanz nach sich ziehen. Der Aufstellungsplatz wird nach Vorgabe des Wärmepumpenherstellers vorbereitet. Wesentliche Punkte sind hier beispielsweise das Fundament, Ablauf von Kondensat oder Sickermöglichkeit von Kondenswasser.
Bei der Hydraulik und Verrohrung werden die geplante Schaltung umgesetzt, die Materialwahl berücksichtigt, die Isolierung/Dämmung und der Korrosionsschutz ausgeführt. Der Schallschutz wird entsprechend der Planung umgesetzt.

Inbetriebsetzung
Grosse Wärmepumpen werden stets in mehreren Schritten in Betrieb gesetzt. Bevor der Verdichter in Betrieb genommen wird, werden die Quellen- und Senkenkreise entlüftet, in Betrieb genommen und die Ventil- und Pumpenfunktionen geprüft. Danach erst wird der Verdichter gestartet. Seine Leistungsaufnahme sowie die Quellen- und Senkentemperaturen werden gemäss der Checkliste erfasst.
Ein wichtiger Vorgang ist der hydraulische Abgleich der Anlage. Dabei geht es darum, optimale Durchflüsse und Temperaturspreizungen sicherzustellen. Ohne diese Massnahme wird die Anlage allenfalls mit zu hohen Temperaturen betrieben, damit auch kritische Verbraucher wie Eckräume oder weit entfernt liegende Nutzer mit genügend Wärme (Kälte) versorgt werden.
Danach folgen elektrische Tests: Es wird die Absicherung geprüft, ebenso die Regelung und die Kommunikation mit dem Gebäudeautomationssystem. Gleichzeitig wird die Effizienz überprüft und es werden Parameter im Sinne einer ersten Betriebsoptimierung angepasst. Weitere Informationen siehe Kapitel 10 «Inbetriebsetzung»; die dortigen Ausführungen beziehen sich zwar auf kleine und mittlere Wärmepumpen, einiges davon lässt sich analog aber auch auf grössere Anwenden.

Betriebsoptimierung und Wartung
Eine wirkungsvolle Betriebsoptimierung bedingt ein Monitoring mit Datenerfassung und Langzeit-Datenanalysen. Die Effizienz lässt sich durch Anpassungen bei Vorlauftemperaturen, Volumenströmen, Speicherstrategien und dem Lastmanagement verbessern.
Mithilfe von Fernwartungsmöglichkeiten können Betriebsstörungen erkannt und behoben werden. Die regelmässige Wartung, zu der Arbeiten wie die Reinigung von Filtern und Wärmeübertra-

gern, Kältemittelkontrollen, Pumpen- und Ventilinspektion gehören, sichert einen effizienten Betrieb.
Langfristige Systemanpassungen sollen stets geprüft werden. Dazu gehören Optimierungen von Betriebszeiten und Systemintegrationen, beispielsweise mit einer Photovoltaikanlage. Weitere Informationen siehe Kapitel 11 «Betrieb».

Kapitel 13

Fallbeispiele

13.1 Kleinanlagen

Für kleinere Anlagen (bis circa 15 kW) im Wohnbau haben sich die im Folgenden dargestellten Funktionsschemen als betriebssicher und energieeffizient bewährt. Es sind die Grundschaltungen, so wie sie auch vom Wärmepumpen-Systemmodul verlangt werden. Folgende Hydraulikvarianten werden dargestellt:

Beispiel	Seite
Ohne Speicher, ohne Wassererwärmung	130
Ohne Speicher, mit Wassererwärmung	130
Serie-Speicher, ohne Wassererwärmung	131
Serie-Speicher, mit Wassererwärmung	131
Parallel-Speicher, ohne Wassererwärmung	132
Parallel-Speicher, mit Wassererwärmung	133
Parallel-Speicher, mit solar unterstützter Wassererwärmung	133

Ohne Speicher, ohne Wassererwärmung

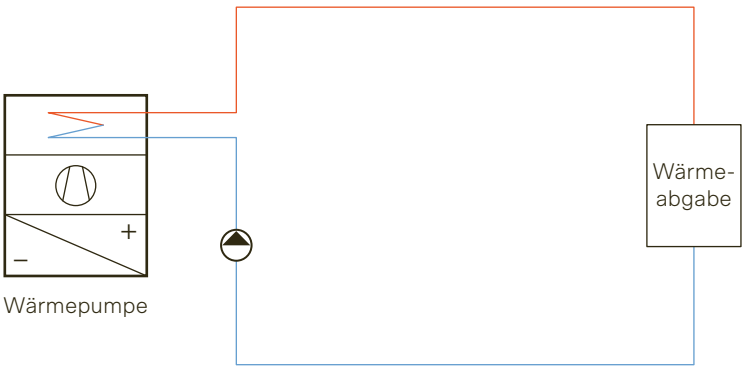


Bild 13.1: Die einfachste Schaltung.

Bei Fussbodenheizungen kann der Unterlagsboden als thermische Speichermasse genutzt werden, ein technischer Speicher zur Überbrückung der (allfälligen) Sperrzeit des Elektrizitätsversorgers ist nicht (zwingend) notwendig. Die Hydraulik eignet sich für Anlagen mit Vorlauftemperaturen am Auslegungspunkt von unter 30 °C, die ohne Einzelraumregelung betrieben werden (Nutzung des Selbstregeleffekts). Bei höheren Vorlauftemperaturen ist eine Einzelraumregelung von Gesetzes wegen vorgeschrieben, in diesem Fall ist der minimal erforderliche Massenstrom der Wärmepumpe einzuhalten, beispielsweise durch ein zur Wärmeabgabe parallel geschaltetes Überströmventil.

Ohne Speicher, mit Wassererwärmung

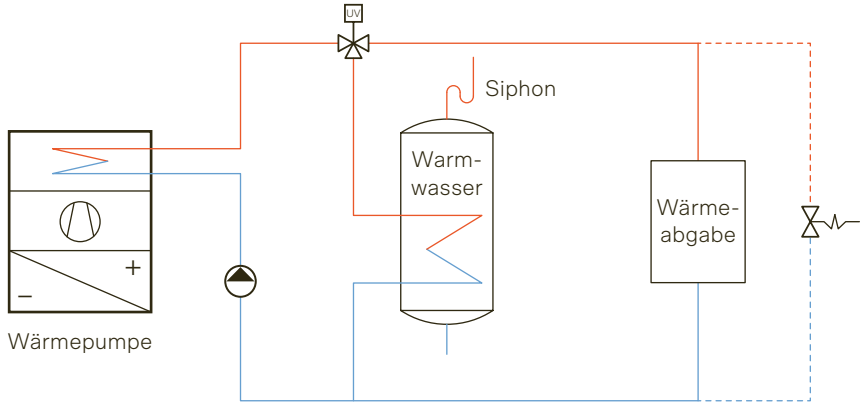


Bild 13.2: Eine häufige Konfiguration (Wassererwärmer parallel zur Raumheizung).

Wenn immer möglich sollte eine Wärmepumpe nebst der Raumheizung auch die Warmwassererwämung versorgen. Die Umschaltung gelingt mit einem Dreiwegeventil problemlos. Zu beachten ist die Heizleistung von Wärmepumpen ohne Leistungsregelung im Sommerbetrieb (Warmwasserbereitstellung), die sich im Vergleich zum Winterfall beinahe verdoppelt. Dies erfordert eine genügend grosse dimensionierte Fläche des Wärmeübertragers im Warmwasserspeicher. Diese sollte im Idealfall 0,4 m^2/kW sein, bezogen auf die maximale Wärmepumpenleistung. Das Überströmventil stellt auch bei Wärmeabgabesystemen mit Thermostatventilen (Einzelraumregelung) die Einhaltung eines minimalen Massenstroms der Wärmepumpe sicher.

Serie-Speicher, ohne Wassererwärmung

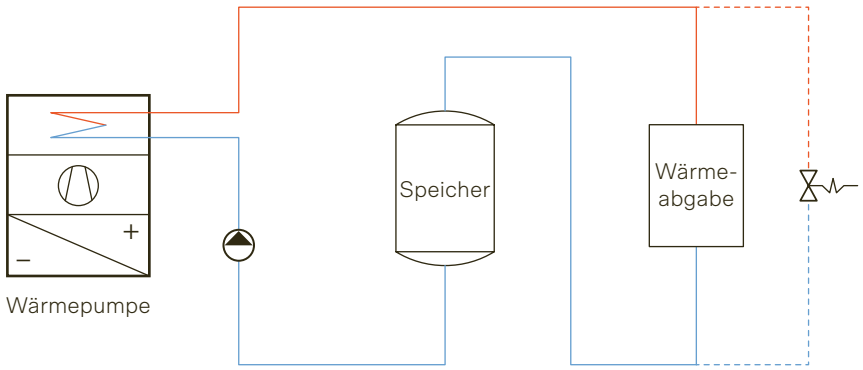


Bild 13.3: Wärmespeicher in Serie für kleine Bauten.

Ein geringer Wasserinhalt der Heizungsanlage (Radiatorheizungen, kleine Objekte mit Fussbodenheizungen) führt zu häufigen Ein-Aus-Schaltzyklen der Wärmepumpe. Dem kann mit einem Serienspeicher entgegengewirkt werden. Der Speicher sollte nach Herstellerangaben und so klein wie möglich gewählt werden. Wird eine Luft-Wasser-Wärmepumpe im Umkehrbetrieb abgetaut, so ist ein grösserer Inhalt notwendig, da im Abtaubetrieb dem Heizsystem Wärme entzogen wird. Bei zu geringem Wasserinhalt der Heizungsseite kann im schlimmsten Fall der Verflüssiger gefrieren und dadurch bersten.

Serie-Speicher, mit Wassererwärmung

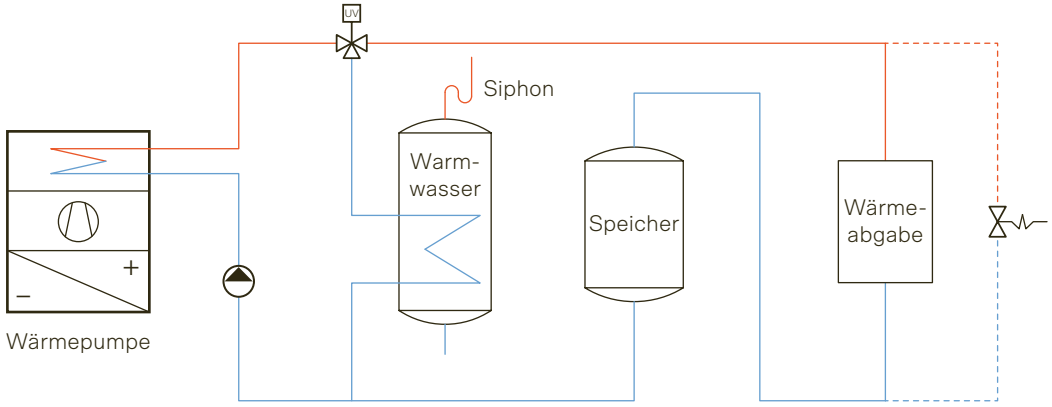


Bild 13.4: Serieller Wärmespeicher mit vorgeschaltetem Wassererwärmer.

Das Schema entspricht der Anlage «Serie-Speicher, ohne Wassererwärmung», jedoch mit zusätzlicher Trinkwassererwärmung. Deren hydraulische Einbindung sollte – aus Sicht Wärmepumpe – vor dem Serie-Speicher erfolgen. Ansonsten würde dieser bei Warmwasserladung ebenfalls (auf ein zu hohes Temperaturniveau) mit aufgeheizt.

Parallel-Speicher, ohne Wassererwärmung

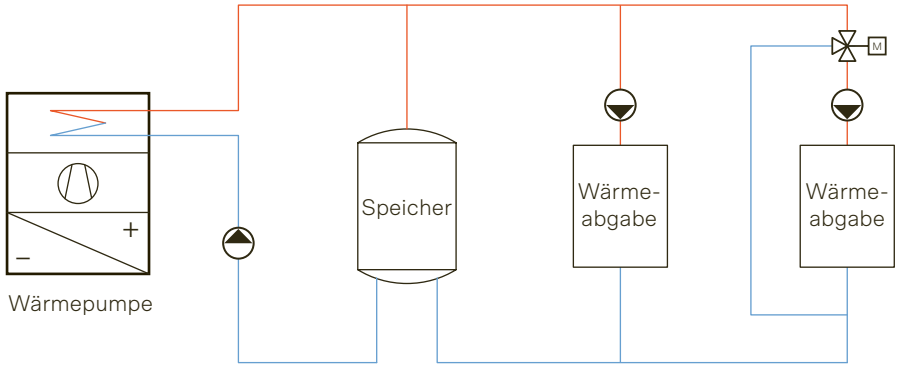


Bild 13.5: Ein Parallel-Speicher ohne Wasser-erwärmung ermöglicht eine hydraulische Entkopplung.

Die Hydraulikschaltung bewirkt durch den parallel eingebundenen Heizwasserspeicher – zusätzlich zur Energiespeicherung – eine hydraulische Entkopplung zwischen dem Lade- und Entladekreis (d. h. Wärmepumpe und Wärmeabgabesystem). Die Wärmepumpe kann dadurch unabhängig von der Wärmeabgabe betrieben werden. Gegenüber der Lösungen mit Serie-Speicher auf Seite 131 werden mehrere Umwälzpumpen benötigt, eine im Ladekreis und (je) eine in den Entladekreisen (Heizgruppen). Der technische Speicher sichert die Einhaltung des Minimal-Massenstroms der Wärmepumpe, er übernimmt damit auch die Rolle der in den erwähnten Lösungen integrierten Überströmventile. Zur Anpassung an den Wärmebedarf (z. B. Einzelraumregelung der Wärmeabgabe) sollten die Entladepumpen in den Heizgruppen aber nach Druck reguliert werden (drehzahlgeregelte Umwälzpumpen).
Sind auf der Verbraucherseite – wie im Schema ersichtlich – mehrere Heizgruppen mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen (z. B. Radiatoren und Fussbodenheizungen) angeschlossen, so benötigt diejenige Gruppe mit den tiefsten Temperaturanforderungen eine separate Regelung (im Schema eingezeichnet: Beimischschaltung). Die Gruppe mit den höchsten Vorlauftemperaturen wird direkt über den Wärmepumpenregler «gefahren». Speziell zu beachten ist auch die hydraulische Einbindung des Speichers: Der Primärvorlauf (Austritt Wärmepumpe) wird direkt auf die Heizgruppen geführt und über eine Stichleitung an den Speicher angebunden, nicht aber durch den Speicher geführt. Bei tieferer Speichertemperatur wird dadurch ein Heruntermischen des Wärmepumpenaustritts verhindert. Der Druckverlust der Stichleitung sollte möglichst gering gehalten werden. Der Massenstrom im Ladekreislauf muss grösser sein als derjenige in den Entladekreisen.

Parallel-Speicher, mit Wassererwärmung

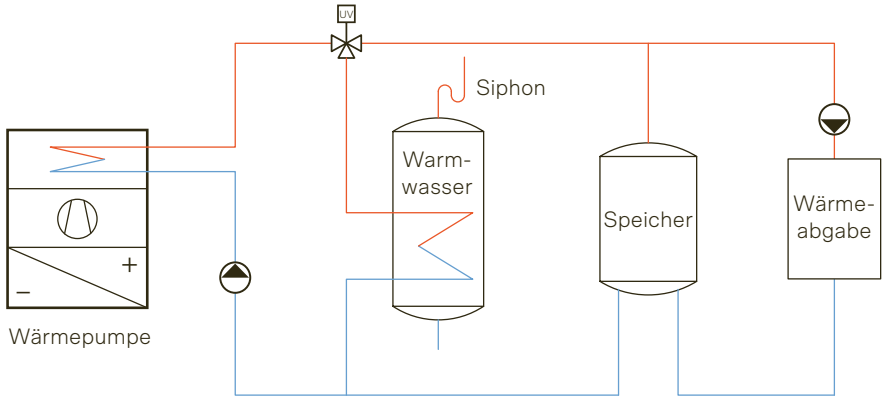


Bild 13.6: Wassererwärmer, warmer Speicher und Wärmeabgabe in sinnvoller Reihenfolge.

Wie bei der Lösung mit Serie-Speicher muss eine zusätzliche Wassererwärmung vor dem Heizwasser-Pufferspeicher eingebunden werden. Ansonsten würde bei jedem Warmwasser-Ladevorgang auch der Heizungspuffer mit den – für Heizzwecke – unnötig hohen Temperaturen aufgeladen. Bei Wärmepumpen mit eingebauten Umwälzpumpen müssen diese zur restlichen Hydraulik passen. Ein falscher Massenstrom kann den Temperaturhub in der Wärmepumpe erhöhen und damit zu geringerer Effizienz führen: Als Beispiel führen 2 K mehr Temperaturhub zu 3 % schlechterer Effizienz.

Parallel-Speicher, mit solar unterstützter Wassererwärmung

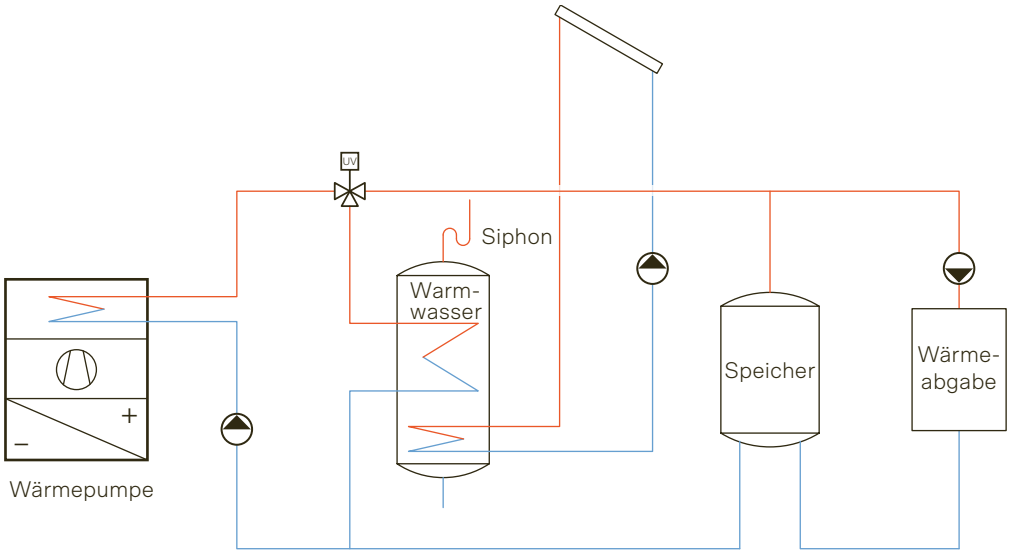


Bild 13.7: Bei der Einbindung von Solarthermie ist Sorgfalt geboten.

Der Betrieb mit einer Wärmepumpe für Heizung und Wassererwärmung, eingeschlossen eine thermische Solarunterstützung, ist bereits eine anspruchsvolle Lösung, die richtig geplant werden muss. Die Wassererwärmung mit Solarenergie muss gewährleistet werden. Somit muss das Heizregister des Solarkreislaufs im Warmwasserspeicher tiefer liegen als das Wärmepumpen-Heizregister. Die Fläche des Letzteren muss zur Wärmepumpe passen, d. h. genügend gross dimensioniert sein. Auch die Regelung beider Wärmequellen muss abgestimmt werden (Vorrang für die Solaranlage).

13.2 Komplexere Anlagen

In diesem Abschnitt werden einige Beispiele meist grösserer, komplexerer Anlagen vorgestellt. Es gilt zu beachten, dass komplexe Anlagen ganz besonders sorgfältig geplant werden müssen. Solche Anlagen sind regelungstechnisch nicht trivial und eignen sich – nebst den Kostengründen – auch deshalb nur für Objekte mit grösserem Wärme- respektive Kältebedarf.

Beispiel	Seite
Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage	135
Grundwasser-Wärmepumpenanlage mit Ölheizkessel	136
Abwasser-Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung	137
Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit Stückholzkessel	138
Kombination von Erdsonden-Wärmepumpe, Kältemaschine und Heizkessel	139
BWW- respektive TWW-Erzeugung mittels Frischwasserstationen	141

Symbole



Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage

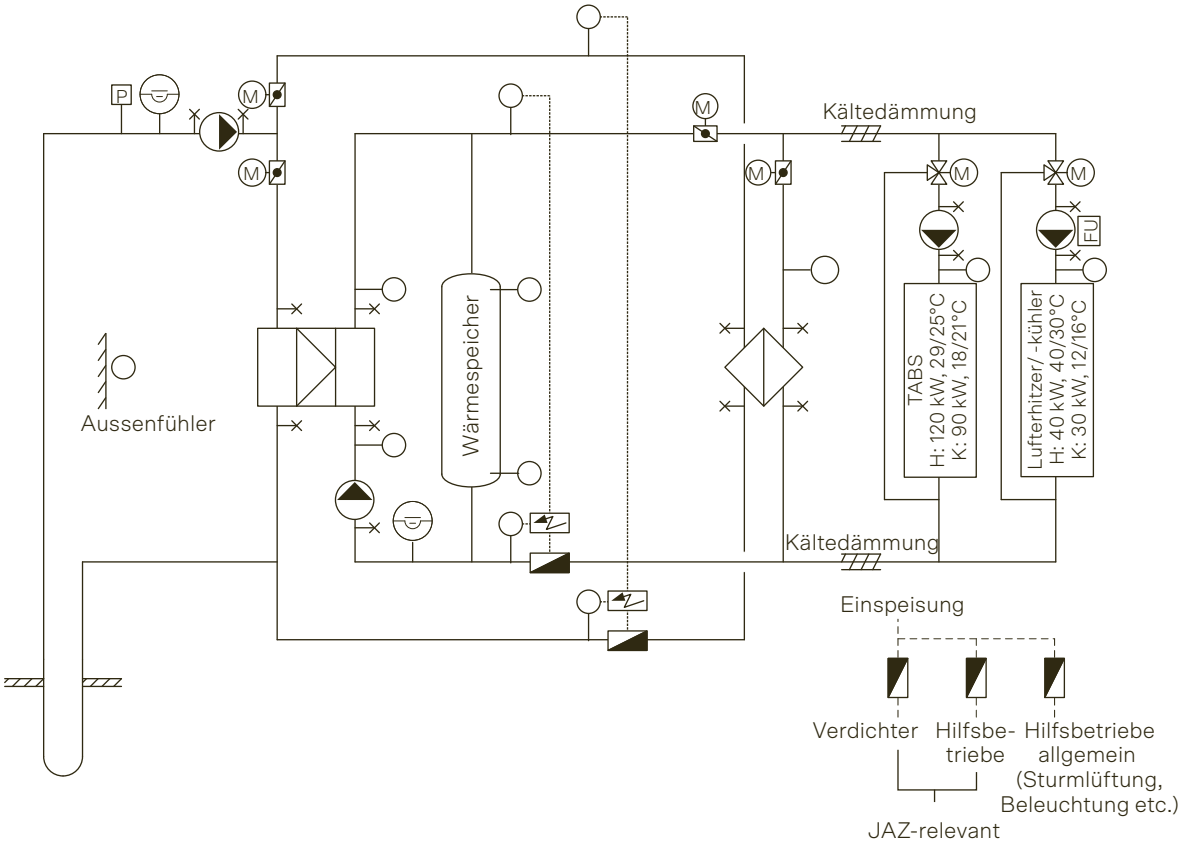


Bild 13.8: Erdwärmesonde, Wärmepumpe und TABS für Raumwärme, ohne Wärmepumpe für Kühlung.

Objekt: Bürogebäude

Systemwahl: Der Heizwärmebedarf wird über eine Erdsonden-Wärmepumpenanlage gedeckt. Die Wärmeabgabe erfolgt über ein thermoaktives Bauteilsystem (TABS). Über das gleiche System wird das Bürogebäude gekühlt. Die Gebäudekühlung erfolgt im Freecooling-Betrieb über die Erdwärmesonden.

Besonders zu beachten

- Der Energieverbrauch Heizung/Kühlung ist separat zu erfassen.
- Die Dimensionierung des Luftkühlers und des Lufterhitzers
- Das Kältenetz ist dampfdicht zu dämmen, um Schwitzwasser zu vermeiden.
- Die Zufahrt zur Bohrstelle und der Standort der Bohrstelle
- Die Erdwärmesonden sind bezüglich Kühl- und Heizfall zu dimensionieren.
- Für Heiz- und Kühlbetrieb umschaltbare Thermostatventile verwenden.

Grundwasser-Wärmepumpenanlage mit Ölheizkessel

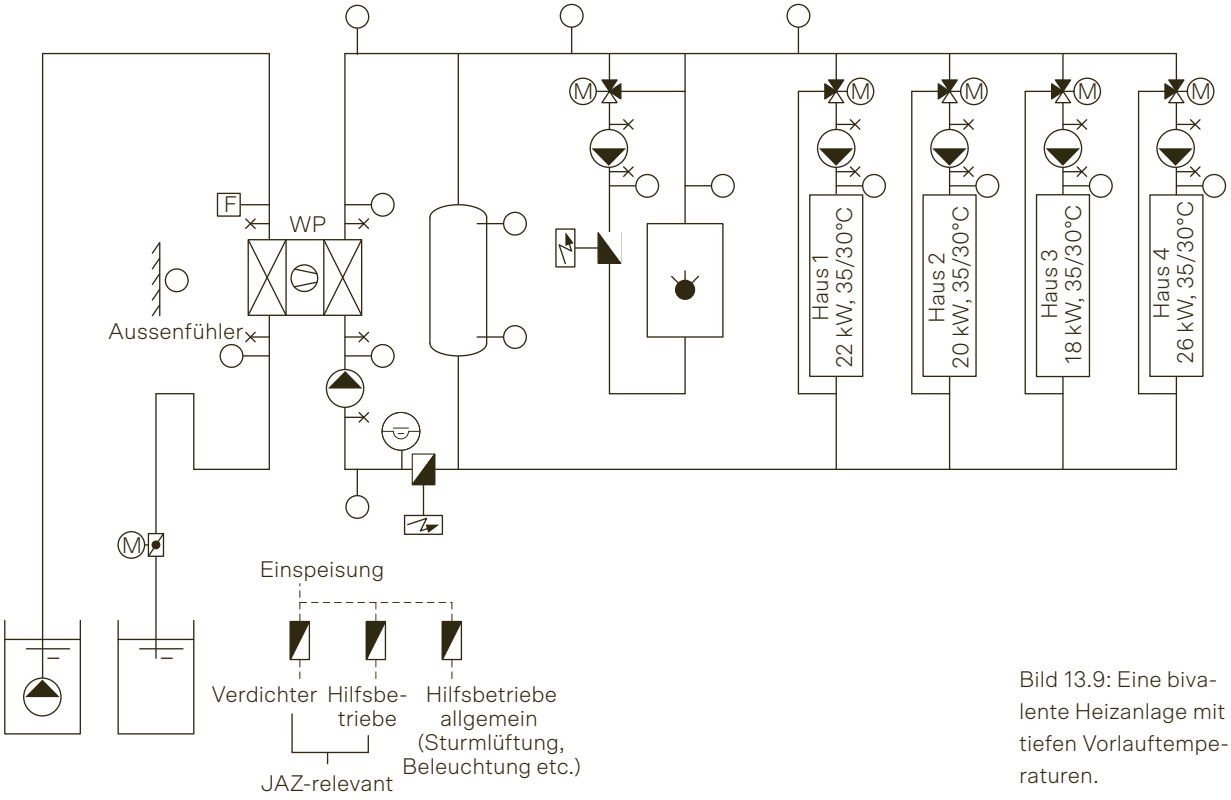


Bild 13.9: Eine bivalente Heizanlage mit tiefen Vorlauftemperaturen.

Objekt: Wohnüberbauung

Systemwahl: Die Wohnüberbauung besteht aus 4 Mehrfamilienhäusern mit je 6 Wohnungen. Da sich das Grundstück in der Grundwasserzone befindet, soll für die Wärmeerzeugung eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt werden. Zur Spitzenlastdeckung, (Bivalent-parallel-Betrieb), wird ein Ölheizkessel eingesetzt. Die Wärmeabgabe erfolgt über Bodenheizungen.

Besonders zu beachten

- Die notwendige Zeit für das Bewilligungsverfahren
- Die Qualität des Grundwassers bezüglich der physikalischen und chemischen Parameter sowie der Feststoffe etc.
- Die Auslegung der Grundwasserumwälzpumpe

Abwasser-Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung

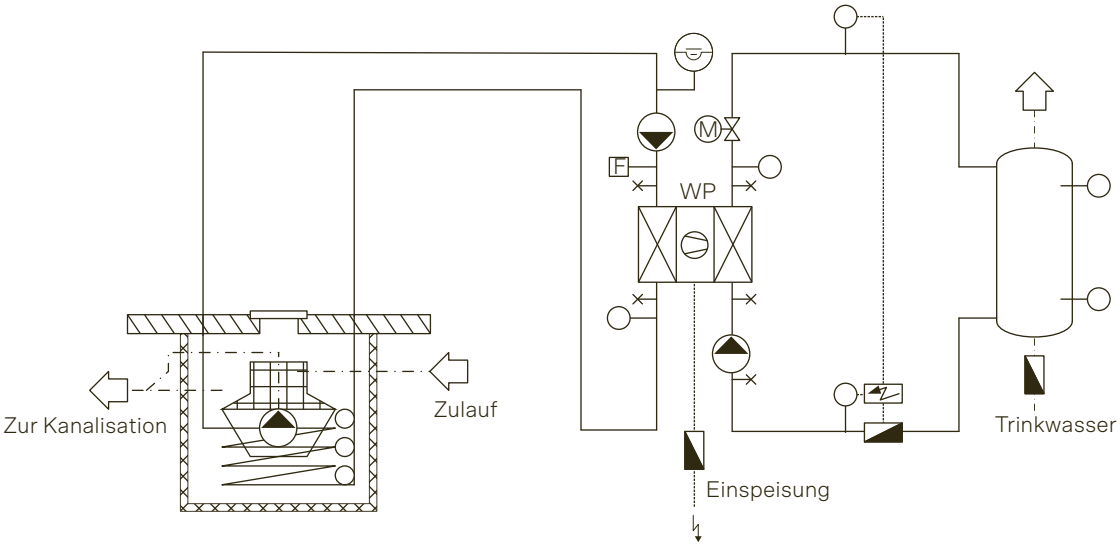


Bild 13.10: Wärmeaus Abwasser als Quelle für Wärmepumpe.

Objekt: Altersheim

Systemwahl: Die Trinkwassererwärmung erfolgt primär mit einer Wärmepumpenanlage und einer Abwasser-Wärmerückgewinnung. Der Abwasserschacht mit dem Wärmeübertrager und den Pumpen befindet sich unterflur ausserhalb des Gebäudes.

Besonders zu beachten

- Die Abwassermengen und die Abwasserqualität
- Die zeitliche Verteilung des Abwasseranfalls und des Trinkwarmwasserbedarfs
- Die Frostsicherheit aller Anlageteile, die ausserhalb der Gebäudehülle liegen
- Die Zugänglichkeit für Reinigungs- und Servicearbeiten

Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit Stückholzkessel

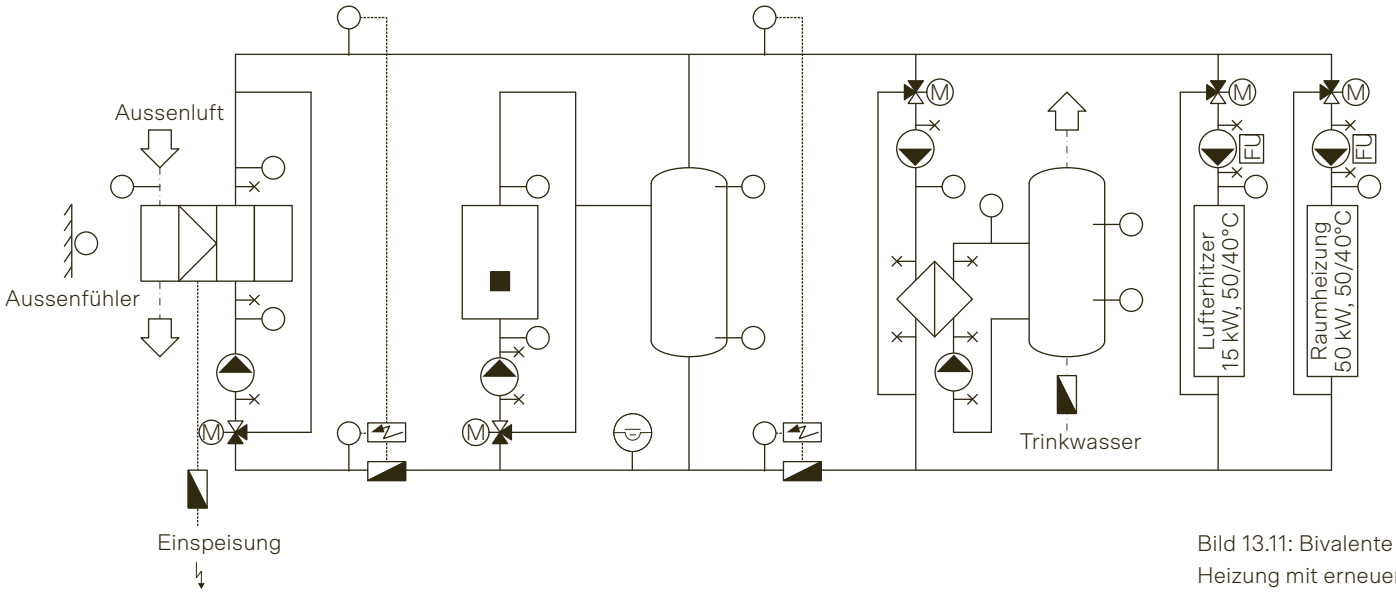


Bild 13.11: Bivalente Heizung mit erneuerbaren Energien.

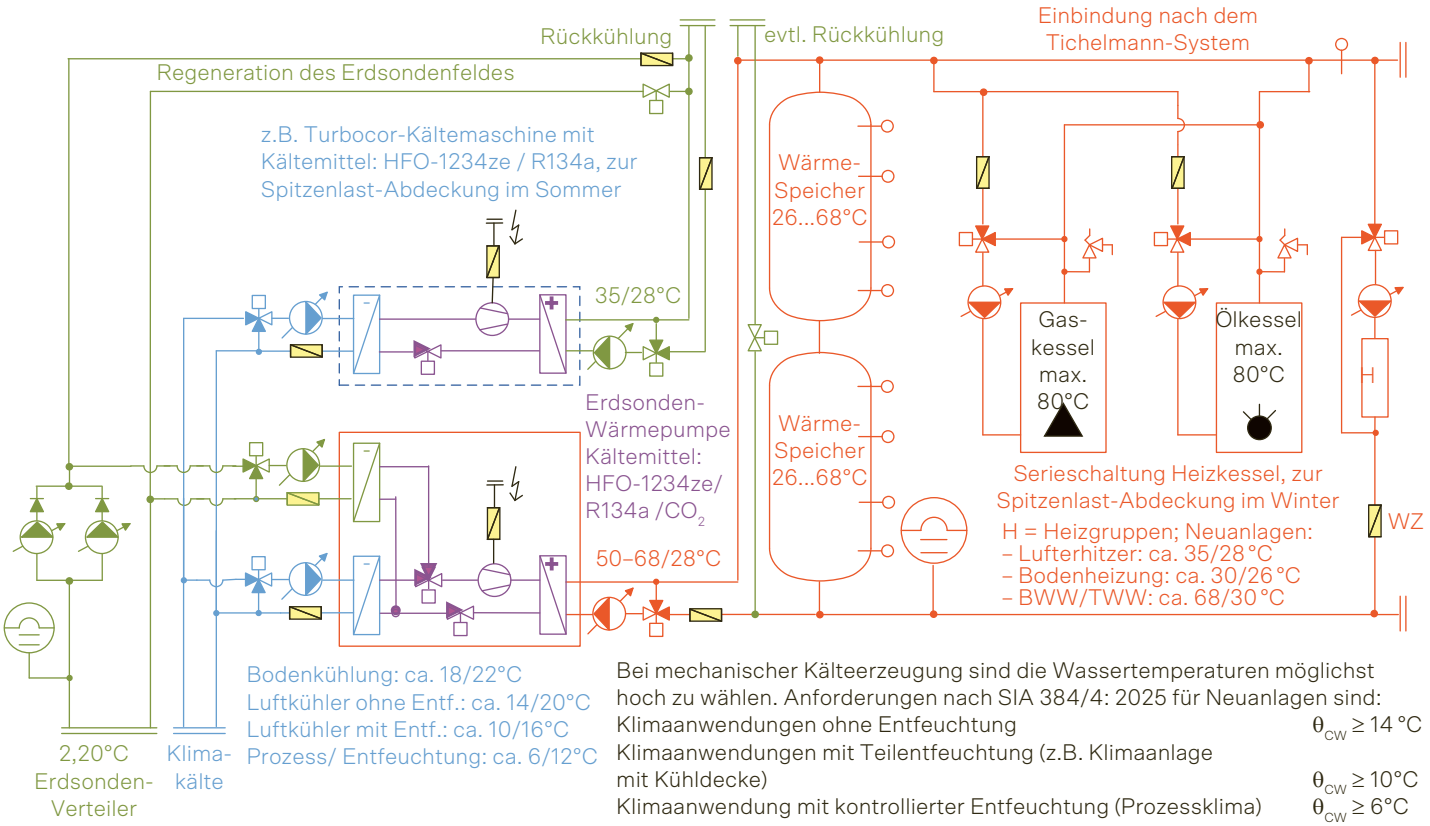
Objekt: Landwirtschaftliche Schule

Systemwahl: Die landwirtschaftliche Schule soll mit erneuerbarer Energie beheizt werden. Da die Schule über einen eigenen Wald verfügt, soll der Heizwärmebedarf über eine Stückholzfeuerung gedeckt werden. Für die Übergangszeit ist zusätzlich eine Luft-Wasser-Wärmepumpe für bivalent-alternativen Betrieb vorgesehen.

Besonders zu beachten

- Die hydraulische Trennung der Wärmeerzeuger und der Speicheranlage
- Die Schall- und übrigen Emissionen

Kombination von Erdsonden-Wärmepumpe, Kältemaschine und Heizkessel



Bei mechanischer Kälteerzeugung sind die Wassertemperaturen möglichst hoch zu wählen. Anforderungen nach SIA 384/4: 2025 für Neuanlagen sind:

Klimaanwendungen ohne Entfeuchtung	$\theta_{cw} \geq 14$ °C
Klimaanwendungen mit Teilentfeuchtung (z.B. Klimaanlage mit Kühldecke)	$\theta_{cw} \geq 10$°C
Klimaanwendung mit kontrollierter Entfeuchtung (Prozessklima)	$\theta_{cw} \geq 6$°C

Bild 13.12: Kombinierte Anlage mit Erdsonden-Wärmepumpe, Kältemaschine und Heizkessel. Die Wärmepumpe liefert 40 % der maximalen Heizleistung (kW) und deckt etwa. 80 % des Wärmebedarfs (kWh) eines grossen Gebäudes ab.

Typische Objekte: Alters- und Pflegezentren, Hotels, Kliniken oder Spitäler

Heizbetrieb im Winterhalbjahr: Die Erdsonden-Wärmepumpe (WP) wird auf ca. 40 % des maximalen Wärmeleistungsbedarfs ausgelegt und erzeugt die Grundlastwärme für das Gebäude. Dabei werden rund 60 bis 80 % des Jahresenergiebedarfs durch diese WP gedeckt, inklusive des Brauchwarmwassers (BWW) respektive des Trinkwarmwassers (TWW). Nur bei tieferen Aussenlufttemperaturen (unter 0 °C) schalten sich die beiden Heizkessel hinzu.

Kühlbetrieb im Sommerhalbjahr: Mittels der Erdsonden-WP wird auch die Klimakälte, gleichzeitig mit der Wärme, produziert. Zudem kann in der Übergangszeit der Kühlbedarf vom Erdwärmesondenfeld direkt gedeckt werden, also ohne die Kompressoren. Nur bei höheren Aussenlufttemperaturen (über 28 °C) und vollen Wärmespeichern schaltet sich die Spitzenlast-Kältemaschine hinzu. Sie erzeugt Kälte energieeffizient, indem ihre Abwärme zur Regeneration des Erdwärmesondenfelds verwendet und nicht über die Rückkühlung vernichtet wird.

Kernpunkte

Erdsonden-Wärmepumpe für die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Kälte. Als erste Wärmequelle dient das Kältenetz, als zweite die Erdwärmesonden (oder Grundwasser).
Kältemittel:
- R744 (CO_2) empfohlen bei hoher Temperaturspreizung wie Wassererwärmung von 10 auf 65 °C
- R717 (NH_3) generell empfohlen, jedoch hohe Investitionen, Sicherheitsanforderungen und Servicekosten

– HFO-1234ze empfohlen als Ersatz von R134a, auch als Kältemittel für Turbocor-Verdichter mit hohem COP, insbesondere im Teillastbereich

Grundkühlung (respektive Direktkühlung) mittels Erdwärmesonden über Bodenheizung (Changeover-Bodenkühlung), über Umluftkühler von Server- und ICT-Räumen und Rückkühlung der gewerblichen Kälte.

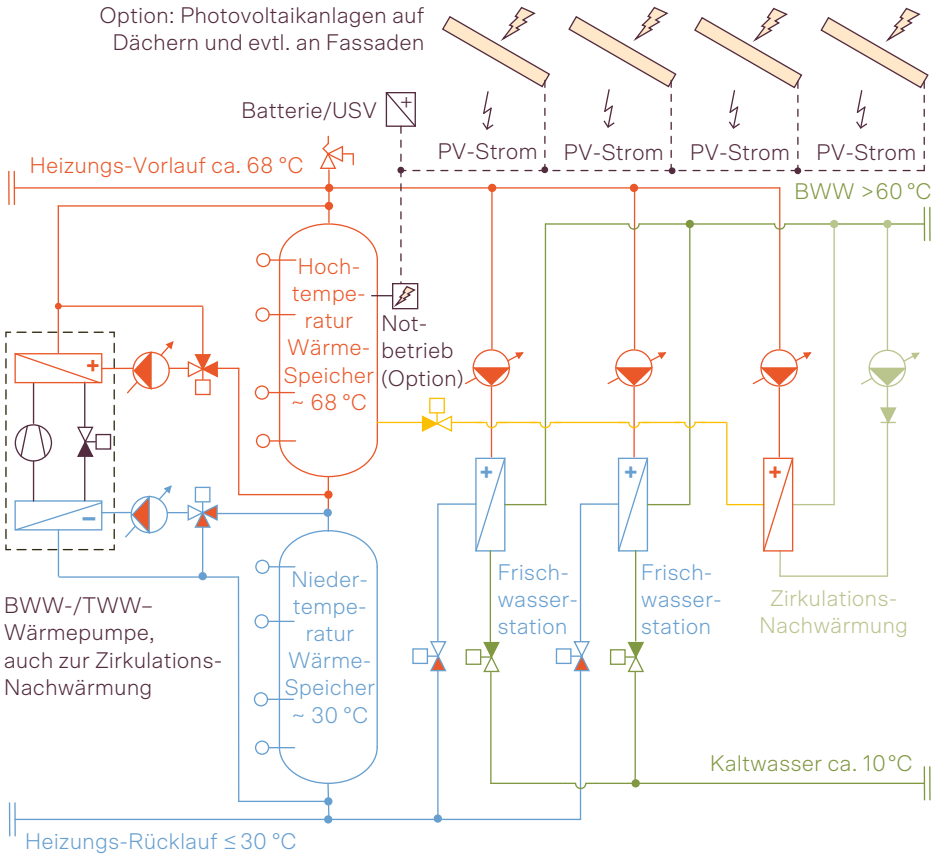
Turbocor-Kältemaschine für die Abdeckung des Spitzenbedarfs an Kälte in den Sommermonaten, mit hohen Teilwirkungsgraden (COP > 10). Dabei kann bei Kälteleistungen bis etwa 400 kW das Kältemittel R134a verwendet werden. Bei höheren Leistungen müssen natürliche Kältemittel oder das HFO-1234ze eingesetzt werden. Die «Sturmlüftung» muss sorgfältig ausgelegt werden, mit direkter Absaugung in Bodennähe.

Vorgehen bei Wärmepumpenanlagen grösser als 400 kW: Bestimmung von
1. Sicherheitsgruppe des Kältemittels
2. Aufstellungsbereich im Gebäude
3. Kategorie der Anlage
4. Aufstellung der Anlage: Soll sie offen oder «gekapselt» mit mechanisch belüftetem Gehäuse aufgestellt werden? Wenn ja, könnten die Sicherheitsmassnahmen im Technikraum reduziert werden. Wichtige Informationen liefert die Kältemittel-Fibel von EnergieSchweiz.

Bestehende oder neue Kesselanlagen (Erdöl, Gas, Holz) in Serie zur Wärmepumpe, idealerweise im Tichemann-System, eingebunden. Der Hauptrücklauf aller Heizgruppen wird immer zuerst von der Wärmepumpe vorgewärmt und bei tieferen Aussentemperaturen von den Heizkesseln nachgewärmt.

Besonders zu beachten
– Einbindung der gewerblichen Kälte mit Erdwärmesonden-Direktkühlung (respektive Rückkühlung) der Verflüssiger
– Maximierung der Energieeffizienz durch maximale Abwärmenutzung
– Sorgfältige Wahl der Kältemittel und Verdichter
– Analyse und Optimierung der Teillastbetriebe sowohl im Winter als auch im Sommer
– Berücksichtigung der Maximal- und Minimaltemperaturen für Heizung und Kälte gemäss Norm SIA 382/1:2025 «Mechanische Lüftung in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen»

BWW- respektive TWW-Erzeugung mittels Frischwasserstationen



Typische Objekte: Alle Nutzungen, in denen Brauchwarmwasser (BWW), respektive Trinkwarmwasser (TWW) benötigt wird.

BWW-Erzeugung im Winterhalbjahr: Das BWW wird primär vom zentralen Wärmeerzeuger, beispielsweise von einer Erdsonden-Wärmepumpe, produziert. Zur Zirkulationsnachwärmung und Sicherstellung einer tiefen Rücklauftemperatur (≤ 30 °C) werden dezentrale Wärmepumpen installiert. Diese kühlen den ersten Heizungsspeicher auf ca. 30 °C herunter, währenddessen der zweite Speicher auf rund 62 bis 70 °C erwärmt wird. Dies ergibt eine hohe Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf, mit entsprechend hoher Energieeffizienz.

BWW-Erzeugung im Sommerhalbjahr: Mittels der Wärmepumpe respektive einem Wärmepumpen-Boiler oder einer Exergie-Wärmepumpe kann das BWW dezentral produziert werden, inklusive Deckung der Zirkulationsverluste. Als Wärmequelle dienen beispielsweise: Aussenluft oder Abwärme aus Kälteanlagen im Niedertemperatur-Heizungsspeicher. Damit bleiben die Zirkulationsverluste tief, weil die Verbindungsleitungen zwischen der Heizzentrale und der dezentralen BWW-Erzeugung nicht erwärmt werden müssen.

Kernpunkte

Sicherheit: Die zusätzliche dezentrale Wärmepumpe erhöht die Betriebssicherheit der BWW-Erzeugung.

Hygiene: Installation von Heizungsspeichern zur Energievorhaltung. Damit entfallen die Speicher auf der Sanitärseite. Es wird nur dann BWW erzeugt, wenn es benötigt wird (Durchlauferhitzer). Bezüglich Entkalkung und Legionellenbil-

dung müssen lediglich die Frischwasserstationen geprüft und gereinigt werden. Dies lässt sich ohne Unterbruch der BWW-Erzeugung bewerkstelligen. Eine solche Lösung benötigt mindestens zwei Wärmeübertrager, mit zusätzlichem Wärmeübertrager für die Zirkulationsnachwärmung.

Photovoltaik: Bei einem Totalausfall der Wärmeerzeugung kann das BWW direkt im Hochtemperaturspeicher erzeugt werden. Dort kann hierfür ein Elektroheizeinsatz vorgesehen werden.

Energieeffizienz: Mit diesem System wird die Energieeffizienz maximiert. Es zeichnet sich aus durch
- grosse Temperaturspreizung zwischen Heizungs- Vorlauf und Rücklauf mit minimalen Pumpverlusten,
- tiefste Rücklauftemperatur mit hohem Wirkungsgrad des Wärmeerzeugers,
- minimale Zirkulationsverluste im Sommerhalbjahr durch dezentrale BWW-Produktion.

Anhang

14.1 Autoren

Autoren der Gesamtüberarbeitung 2026

- Andreas Genkinger, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz (Gesamtkoordination)
- Prof. Dr. Zoran Alimpic, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw
- Christoph Messmer, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz
- Lorenzo Zgraggen, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz
- David Zogg, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz

Autoren der Ausgabe 2018

- Ralf Dott, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz (Gesamtkoordination)
- Prof. Dr. Thomas Afjei, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz
- Prof. Dr. Zoran Alimpic, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw
- Andreas Genkinger, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz
- Peter Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg
- Rita Kobler, Bundesamt für Energie, Sektion erneuerbare Energien

14.2 Abkürzungen

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AWN	Abwärmenutzung
Bafu	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BMA	Brandmeldeanlage
BO	Betriebsoptimierung
BOk	Betriebsoptimierung von komplexen Anlagen
BWP	Deutscher Bundesverband Wärmepumpe e. V.
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
COP	Coefficient of Performance, Leistungszahl
EBF	Energiebezugsfläche
eBO	Energetische Betriebsoptimierung
EEI	Energieffizienzindex
EER	Energy Efficiency Ratio, Kennzahl für die Effizienz einer Wärmepumpe im Kühlfall
EFH	Einfamilienhaus
EHPA	European Heat Pump Association, Europäischer Wärmepumpenverband
EID	External Interface Descriptions
EKAS	Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit
EMS	Energiemanagementsystem
EnEV	Energieeffizienzverordnung
Epa	Environmental Protection Agency, US-amerikanische Umweltbehörde
EPDP	Energy Performance of Buildings Directive der EU, EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
ES	Empfindlichkeitsstufe im Schallschutz
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio, Europäische Leistungszahl für Kältemaschinen bei Teillastbetrieb
ESTI	Eidgenössisches Starkstrominspektorat
ETS2	Emissions Trading System, Emissionshandelssystem der EU
EU-ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation, Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EWS	Erdwärmesonde
FCKW	Kältemittelkategorie: vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
FKW	→ HFKW
FM	Facility Management
FU	Frequenzumformer
FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz
GA	Gebäudeautomation
GKS	GebäudeKlima Schweiz – Schweizerischer Verband für Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
GWA	Gas-, Wasser-, Abwasser- und Feuerlöschtechnik
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotenzial
HCFO	Kältemittelkategorie: Hydro-Chlor-Fluor-Olefine, teilhalogenierte ungesättigte Kohlenwasserstoffe)

HFCKW	Kältemittelkategorie: teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
HFKW	Kältemittelkategorie: teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe
HFO	Kältemittelkategorie: Hydro-Fluor-Olefine
HLKK	Heizung, Lüftung, Klima, Kälte
JAZ	Jahresarbeitszahl, bei Wärmepumpen
KEPZ	Kalkulatorischer Energiepreiszuschlag
LAN	Local Area Network, lokales Datennetz
LCCP	Life Cycle Climate Performance, Klimawirkung über den Lebenszyklus
LSV	Lärmschutz-Verordnung
MFH	Mehrfamilienhaus
MSRL	Mess-, Steuer-, Regel- und Leittechnik
MuKEn	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
NIV	Niederspannungs-Installations-Verordnung
ODP	Ozone Depletion Potential, Ozonabbaupotenzial
pbFM	Planungs- und baubegleitendes Facility Management
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PV	Photovoltaik
PVT-Kollektor	Photovoltaisch-thermischer Sonnenkollektor
RWA	Rauch- und Wärme-Abzugsanlage
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance, → COP, nach Saison gewichtet
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio, → EER, nach Saison gewichtet
SNG	Systemnutzungsgrad
Suva	Schweizerische Unfallversicherung
SVK	Schweizerischer Verband für Kältetechnik
SVTI	Schweizerischer Verein für technische Inspektionen
SWKI	Schweizer Verein von Gebäudetechnikingenieuren, früher: Schweizerischer Verein von Wärme- und Klimaingenieuren
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol, Protokoll für die Datenübertragung im Internet
TEWI	Total Equivalent Warming Impact, totaler äquivalenter Erwärmungsbeitrag
TFA	Trifluoressigsäure
T_{WL}	Temperaturniveau Warmleiter, bei Wärmenetzen
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad
WPSM	Wärmepumpen-Systemmodul, Standard
WPZ	Wärmepumpen-Testzentrum
WP-Boiler	Wassererwärmer auf Basis einer Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WW	Warmwasser

14.3 Stichwortverzeichnis

A
Abtaueinrichtungen 23
Abwasser-Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung 137
Akustik 91
Anergie 5
Anlagendokumentation 112
Anlaufstrombegrenzung 99
Aufstellung und Zugänglichkeit 100
Aussenluft 39

B
Bauarten 24
Bedienungsanleitung 110
Benchmarks 103
Betrieb 113
Betriebsoptimierung 114
Betriebsüberwachung 113
Bivalent-alternativer Betrieb 72
Bivalenter Betrieb 72
Bivalent-paralleler Betrieb 73

C
Carnot-Kreisprozess 5
COP 8

D
Definitionen
  Energien 8
  Leistungen 8
Dichtigkeitskontrolle 113
Drosselorgan 21

E
Ecodesign 12
EER (Energy Efficency Ratio) 10, 58
Elektrizitätsversorgung 99
Energieetikette 12
Energiepfähle 45
Enthalpie 5
Entropie 5
Erdwärme 40
  -Graben 45
  -Körbe 45
  -Register 43
  -Schlitzwände 45
Erdwärmesonden 41
  Mit CO_2-Technik 43
  Regeneration 57
  Rohrdurchmesser 42
  -Wärmepumpe 135, 139
Erfolgskontrolle 102, 113
ESEER (European Seasonal Energy Efficency Ratio) 10
Exergie 5

F
Fallbeispiele 129
  Kleinanlagen 129
  Komplexere Anlagen 134
Fern- und Nahwärmesysteme 124
Filterbrunnen 50
Freecooling 57
Frischwasser-Module 75
Fussbodenheizung 61, 62

G
Gebäudekühlung 52
Gesetzliche Grundlagen 11
Grundwasserfassung und -rückgabe 48
Grundwasser-Wärmepumpenanlage 136
Gütesiegel FWS/EHPA 97

H
Heissgas-Bypass 23
Heizkörperheizung 64
Hochtemperaturwärmepumpen 125
Hydraulik 74
  Bei aktivem Kühlbetrieb 78
  Bei passivem Kühlbetrieb 78

I
Inbetriebsetzung 107
  Kontrolle Mess- und Regeleinrichtungen 108
  Montagekontrolle 108
  Protokoll 109
  Vorbereitung 108
  Wärmepumpe 109
  Wärmequelle und Wärmeabgabe 109
Industrieanwendungen 125
Instandhaltung 113
Integration in Photovoltaiksysteme 81
Inverkehrbringung 36

J
Jahresarbeitszahlen, Richtwerte 103
Jahreszeitbedingte Leistungszahl
→ SCOP

K
Kältemittel 25
  Benennung nach ASHRAE 27
  Gesetzliche Rahmenbedingungen 35
  Kategorien 28
  Maximale Füllmenge 32
  Natürliche 27
  Ozonabbaupotenzial 25
  Sicherheitskonzepte 29
  TEWI 33
  Treibhauseffekt 33
  Volumetrische Kälteleistung 25
  Wahl 27
Kennzahlen Wärmepumpe 8
Klimawandel 55
Kombispeicher 77
Komponenten 17
Kühlen mit Wärmepumpen 54
Kühlgradtage 56
Kühlsysteme 56

L
Ladestrategien für Speicher 75
LCCP (Life Cycle Climate
Performance) 34
Legionellen 68
Leistung 5
Log-p-h-Diagramm 6
Luftheizung 65
Lüftungs- und Klimaanlagen 60
Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage 138

M
Material- und Ressourceneffizienz 15
Messeinrichtungen 105
Messkonzept 104
Monovalenter Betrieb 71

N
Naturabtauung 24
Normen 10

P
PFAS 35
Photovoltaik
  Betriebsweise Wärmepumpe 85
  Einbinden Wärmepumpe 84
  Schnittstellen 87
  Solarer Deckungsgrad 81
Primärenergieeffizienz 10
Projektierung 97
Projektierungshilfen 98

S
Schallminderung 92
Schallschutz 91
Schichtladung 76
Schwimmbadwasser-Wärmepumpe 70
SCOP 10, 97
SEER (Seasonal Energy Efficency
Ratio) 10, 58
Sicherheit 100
Sicherheitseinrichtungen 21
SmartGridready 89
Störungen und Störungsbehebung 117
Stufenladung 76
Symbole 134

T
TABS 63
Temperaturgerechte Wärmeaus-
kopplung 67
TEWI 33
TFA 35
Thermoaktive Bauteilsysteme → TABS
Total Equivalent Warming Impact
→ TEWI
Transkritischer Betrieb 32
Trinkwarmwasser 66
Tropennächte 56

U
Umwälzpumpen 79

V
Verdichter 17
Vergleich von Angeboten 101

W

Wärmeabgabe 61
Wärmekapazität Gebäude, Speicher 82
Wärmepumpen
  Betriebsarten 71
  Für höhere Leistungen 119
  Für Überbauungen 123
Wärmepumpen-Systemmodul 97
Wärmepumpen-Wassererwärmer 69
Wärmequellen 39
  Abwärme 51
  Grundwasser 47
  Oberflächenwasser 50
Wärmeübertrager 19
Warmwassererzeugung 141
Warmwasserheizung 62
Wartungsheft 113
Wirtschaftlichkeit 100
WPesti 98