Brunner | Kriegers | Prochaska | Tillenkamp

Klimakälte heute

Kluge Lösungen für ein angenehmes Raumklima

faktor
Architektur Technik Energie

DIE PLANER.
NETZWERK FÜR ENERGIE, UMWELT UND GEBÄUDETECHNIK

energieschweiz

Überblick 1

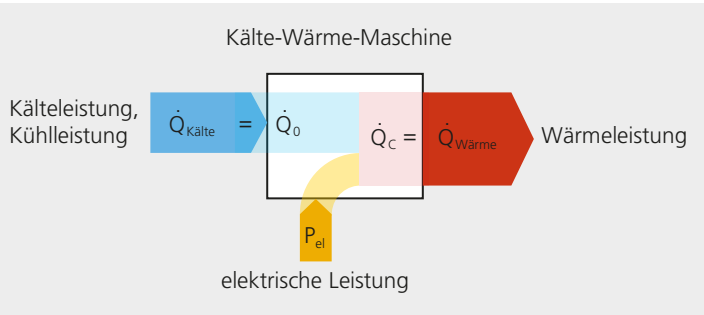
Bezeichnungen und Abkürzungen

Die Fachgebiete Wärme und Kälte haben historisch unterschiedliche Wurzeln. Dies äussert sich auch bei den verwendeten Formelzeichen. In diesem Fachbuch haben wir uns auf folgende Formelzeichen geeinigt.

Ausgewählte Formelzeichen

T	Temperatur in °C oder K (Kelvin)
ΔT	Temperaturdifferenz
T_0	Verdampfungstemperatur
T_C	Verflüssigungs-, Kondensationstemperatur
h	spezifische Enthalpie (Energieinhalt)
w	spezifische Arbeit
q	spezifische Wärmemenge
p	Druck
Q	Wärme
$\dot{Q}$	Wärmeleistung, Wärmestrom ($\dot{Q} = \Phi$)
$\dot{Q}_{Kälte}$	Kühl-, Kälte-, Verdampferleistung ($\dot{Q}_{Kälte} = \dot{Q}_0$)
$\dot{Q}_{Wärme}$	Wärme-, Verflüssigerleistung ($\dot{Q}_{Wärme} = \dot{Q}_C$)
P_{el}	elektrische Leistung
ε	Leistungszahl
$COP_{Kälte}$	Leistungszahl Kältemaschine ($COP_{Kälte}$ = EER)
$COP_{Wärme}$	Leistungszahl Wärmepumpe ($COP_{Wärme} = COP_{WP}$)
R	Regler (in den Schemas)

Die Wärmeströme



Häufig benutzte Abkürzungen

KM	Kältemaschine
WP	Wärmepumpe
KWM	Kälte-Wärme-Maschine
GA	Gebäudeautomation
COP	Coefficient of Performance
ERR	Energy Efficiency Ratio
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio
ETV	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor
FU	Frequenzumformer
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
GWP	Global Warming Potential

Vereinfachung bei der Berechnung des COP und EER

Das Fachbuch «Klimakälte heute» soll praxisnah sein. Darum weicht es bei der Definition des COP von der Normung leicht ab. In der Norm wird für die Berechnung des COP noch ein Leistungsanteil der Pumpen für die Überwindung des Verflüssigers und des Verdampfers eingerechnet. Zudem fliesst die Leistungsaufnahme für die Steuerung ein. Da diese drei Werte in der Praxis oft nicht verfügbar sind, werden diese im Fachbuch nicht berücksichtigt. Der so ermittelte COP ist 5 % bis 10 % höher, als der COP nach Norm (SN-EN 14511). Das Gleiche gilt bei der Ermittlung des EER.

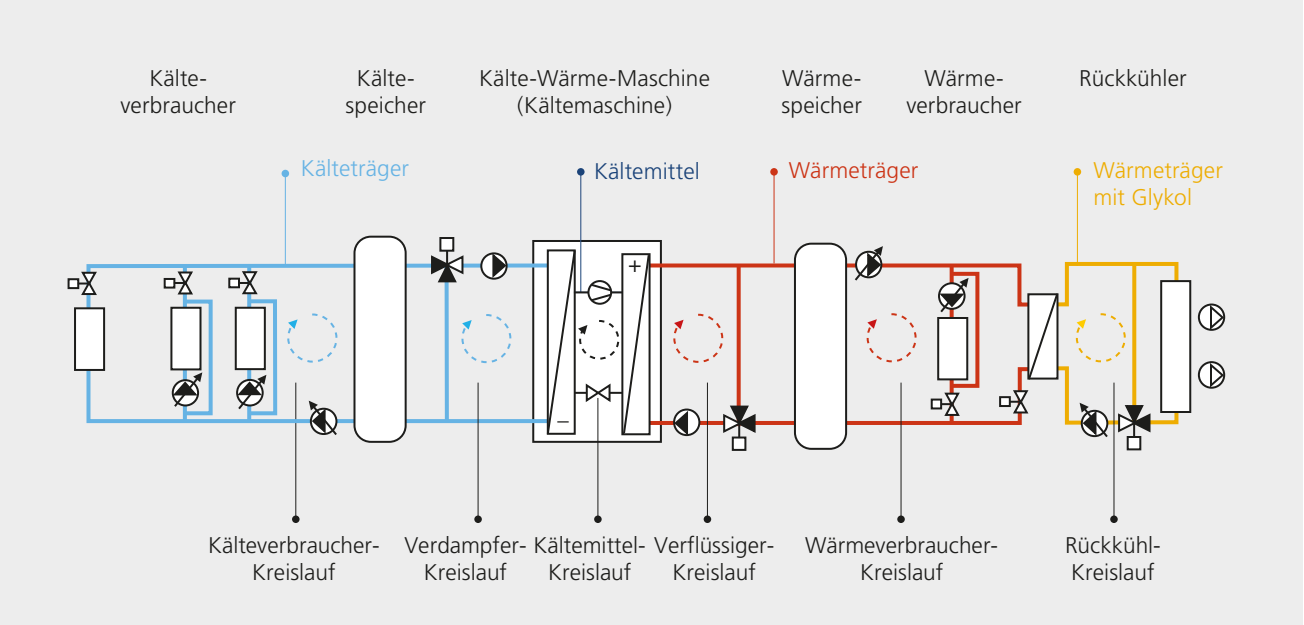
Der $COP_{Kälte}$ und $COP_{Wärme}$

$$COP_{Kälte} = \frac{\dot{Q}_{Kälte}}{P_{el}}$$

$$COP_{Wärme} = \frac{\dot{Q}_{Wärme}}{P_{el}}$$

Überblick 2

Medien und Kreisläufe

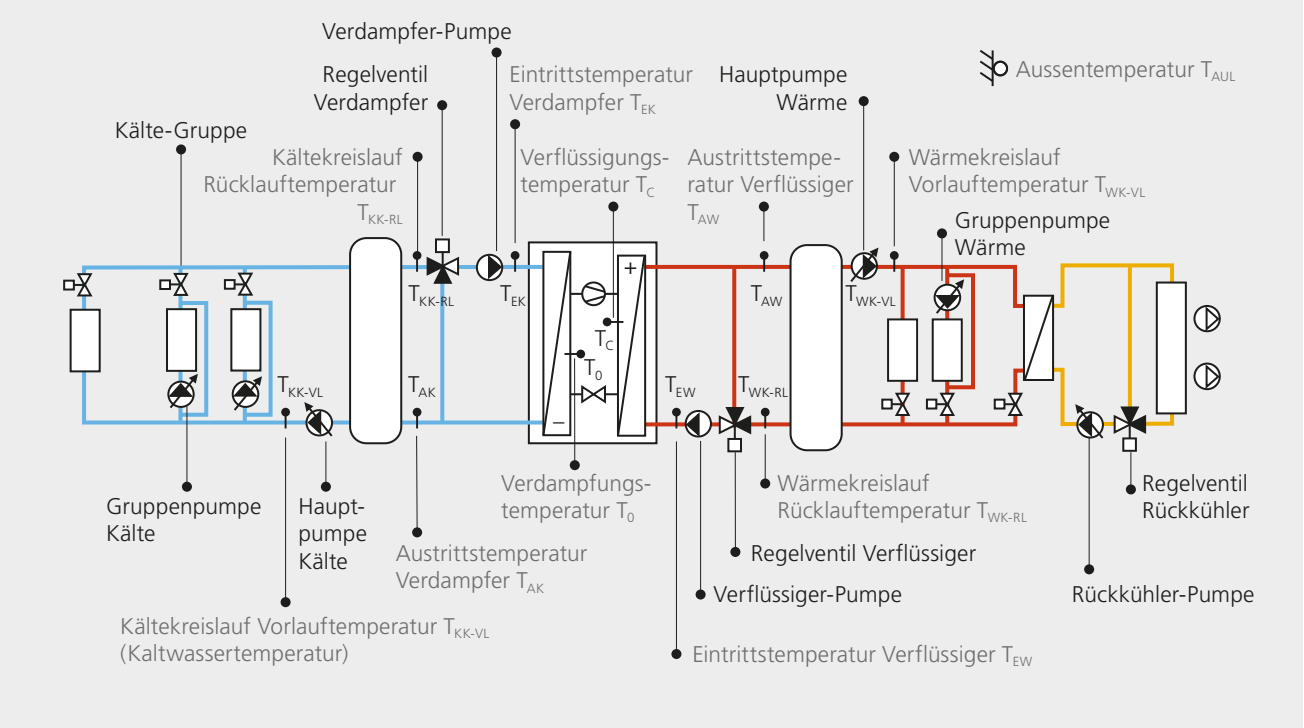


Farben Leitungen

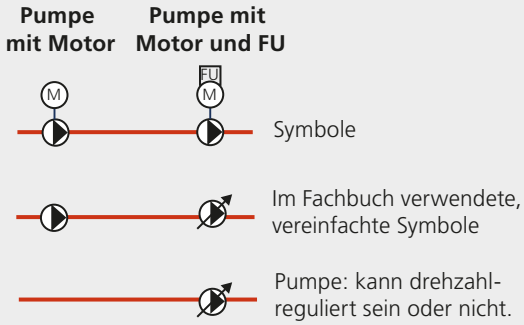
- Kälteträger
- Kältemittel
- Wärmeträger
- Wärmeträger mit Glykol
- Trinkwarmwasser
- Elektro (Signal, Steuerung)

Überblick 3

Komponenten und Temperaturfühler



Symbole für Pumpen, Verdichter und Ventilatoren
Pumpen, Verdichter und Ventilatoren bestehen aus einem mechanischen Teil (Schraube, Kolben, Rotorblätter) und einem elektrischen Teil (Elektromotor). Im Fachbuch Klimakälte werden – aus didaktischen Überlegungen – die beiden Teile in der Regel vereinfacht als ein Element dargestellt.



Inhalt

1. Zeitreise durch die Klimakälte 7

2. Übersicht Gesamtsystem 11
2.1 Systemdenken bei Klimakälteanlagen 11
2.2 Die vier Systeme 12
2.3 Sicht aufs Ganze 13
2.4 Prinzip der Energie-Umlagerung 14
2.5 Konzeptionelle Überlegungen 14
2.6 Trends in der Klimakälte 17

3. Grundlagen 19
3.1 Kälteprozess 19
3.2 Das log p,h-Diagramm 22
3.3 Carnot-Prozess als idealer Vergleich 24
3.4 Aggregatszustandsänderung nutzen 25
3.5 Energieflüsse in der Kältemaschine 26
3.6 Auswahl von geeigneten Kältemitteln 30
3.7 TEWI-Bewertung 33
3.8 Kältemittel in der Klimakälte 33

4. Der Planungsprozess 37
4.1 Generelle Anforderungen 37
4.2 Einflussfaktoren 37
4.3 Normen und Vorgaben 45
4.4 Vorgehen bei der Planung 47
4.5 Häufige Stolpersteine bei der Planung 52
4.6 Vorgaben an die Lieferanten 53
4.7 Was ist bei Inbetriebsetzung und Abnahme zu beachten? 55
4.8 Wartung und Instandhaltung der Klimakälteanlage 57

5. Bauarten und Komponenten 61
5.1 Der Kältekreis und seine Komponenten 61
5.2 Verdichtertypen und ihre Funktion 61
5.3 Verhalten des Verdichters 64
5.4 Verdichterbauarten 66
5.5 Allgemeines zu Wärmeübertragern 68
5.6 Verdampfer 71
5.7 Verflüssiger 74
5.8 Expansionsventil 77
5.9 Weitere Komponenten 78
5.10 Systemaufbau nach Verdampferart 80

6. Wärmeaufnahme 85
6.1 Konzeptionelle Überlegungen 85
6.2 Wärmeaufnahme-Systeme 87
6.3 Übersicht Kühlsysteme 91
6.4 Hydraulische Einbindung 92
6.5 Alternative Kühlsysteme 94

7. Wärmeabgabe 97
7.1 Konzeptionelle Überlegungen 97
7.2 Wärme direkt nutzen 104
7.3 Kurzzeitige (Tag-Nacht-) Wärmespeicher 107
7.4 Wärme saisonal speichern 108
7.5 Wärme direkt abführen 109
7.6 Rückkühlung: Wärme indirekt abführen 110

8. Hydraulische Systeme 119
8.1 Allgemeines 119
8.2 Elemente der Hydraulik 120
8.3 Einbindung Kältemaschine 122
8.4 Einbindung Kälteverbraucher 125
8.5 Wärmeaufnahme 128
8.6 Kaltwasserspeicher 132
8.7 Einbindung Rückkühlung 136
8.8 Freie Kühlung 138
8.9 Wärmeabgabe 141
8.10 Kälte-Wärme-Nutzung als Gesamtsystem 142
8.11 Verteilsystem 144

9. Steuerung und Regulierung 151
9.1 Allgemeines 151
9.2 Ansätze der Schnittstellen-definition 152
9.3 Regulierung der Kältemaschinenleistung 154
9.4 Regulierung der Verdampferseite 155
9.5 Regulierung der Verflüssigerseite 158
9.6 Zu- und Abschalten der Kältemaschine 160
9.7 Kältemaschinensicherheit 162
9.8 Regel-Ventile und Messfühler 165
9.9 Beispiele zur Kombination von Regulierungen 167
9.10 Monitoring des Betriebs 168

10. Energieeffizienz und Teillastverhalten 171
10.1 Anlageneffizienz verstehen 171
10.2 Energiebilanz einer Klimakälteanlage 172
10.3 Energetische Beurteilung von Klimakälteanlagen 173
10.4 Effizienter Betrieb von Klimakälteanlagen 178

11. Anhang 187
11.1 Autoren 187
11.2 Dokumentation 188
11.3 Vertiefung 1: Strömungs-Verdichter 189
11.4 Vertiefung 2: Pumpenauslegung und Pumpencharakteristik 192
11.5 Vertiefung 3: Gesamtsystem 194
11.6 Vertiefung 4: Schnittstelle zur Gebäudeautomation 202
11.7 Vertiefung 5: Unterkühlung 203
11.8 Vertiefung 6: Entscheidungs-baum zur EN 378 und SUVA-Merkblatt 66139 205
11.9 Vertiefung 7: Kältemittel – Ersatz und Dichtigkeitskontrolle 206
11.10 Schlagwörter 207

Die Publikation wurde durch das Bundesamt für Energie BFE/EnergieSchweiz und mit Beiträgen von folgenden engagierten Unternehmen finanziert.

Impressum

Klimakälte heute – Kluge Lösungen für ein angenehmes Raumklima

Herausgeber: Die Planer – SWKI, Urtenen-Schönbühl

Autoren: Arnold Brunner, Michael Kriegers, Vladimir Prochaska und Frank Tillenkamp (Autorenverzeichnis Anhang 11.1)

Co-Referat: Robert Dumortier, Othmar Humm, Rüdiger Külpmann
Für den Inhalt des Buches sind die Autoren verantwortlich.

Projektleitung: Thomas Lang, zweiweg gmbh, Zürich

Lektorat: Christian Werner, zweiweg gmbh, Zürich

Seitenherstellung: Christine Sidler, Noemi Bösch, Faktor Journalisten AG, Zürich

Titelbild: 123rf.com

Bezug als PDF-Dokument (Ausgabe 2021): EnergieSchweiz
Gratis-Downolad: Fachbuch Klimakälte
Bezug als Buch (Ausgabe 2019): Faktor Verlag, www.faktor.ch

November 2021
ISBN: 978-3-905711-48-6

Moderne Klimakälte – gewappnet für die Energiezukunft

Gute Haustechniklösungen sind vernetzt und behalten stets das Gesamtsystem – Gebäude und Gebäudekomplexe bis hin zu ganzen Arealen – im Auge. Die Klimakälte von heute verstehen wir daher als Kälte-Wärme-Maschine, welche die beim Kühlen entstehende, wertvolle Wärme sinnvoll nutzt. Solche Lösungen funktionieren jedoch nur, wenn sie robust sind und im Alltag einfach und korrekt bedient werden können.

Warum es dieses Buch braucht

Zum Thema Kälte gibt es diverse Fachbücher. Was aber fehlt, ist ein Lehrbuch, das die Klimakälte als ganzes System betrachtet – vom «gekühlten» Raum über die Kältemaschine bis hin zum Wärmeverbraucher. Wir sehen in dieser Gesamtbetrachtung die einmalige Chance, dass Klimakältesysteme künftig Kühlung und Heizung clever miteinander koppeln. Damit reduzieren sie markant den Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes, einer Überbauung oder eines Areals.

Es ist uns ein zentrales Anliegen, dass vermehrt robuste und zugleich einfach bedienbare Klimakälteanlagen gebaut werden. Denn in der Praxis beobachten wir, dass zwar technisch vielversprechende, aber auch entsprechend komplexe Lösungen geplant und realisiert werden. Was auf dem Papier effizient aussieht, bewährt sich im Alltag oft nicht, weil die Anlage nicht korrekt bedient werden kann.

Wer soll dieses Buch lesen?

Unser Fachbuch behandelt schwerpunktmässig Klimakälteanlagen mit 20 kW bis 300 kW Kälteleistung. Es richtet sich zum einen an Planerinnen und Planer aus Ingenieurbüros, die sich mit Heizung, Lüftung, Gebäudetechnik beschäftigen. Zudem sprechen wir Fachpersonen aus den technischen Büros von Heizungs- und Lüftungsinstallationsunternehmen an.

Welches Vorwissen wird erwartet?

Um möglichst viel zu profitieren, sollten Lesende ein Basiswissen aus der Gebäudetechnik mitbringen, das einem guten Lehrabschluss entspricht. So sollten zum Beispiel Grundkenntnisse in den Bereichen Rohrleitungen, Hydraulik und Pumpen vorhanden sein. Zudem wird erwartet, dass die Grundlagen der thermodynamischen Wärmelehre bekannt sind.

Wir setzen zudem voraus, dass die Inhalte der wichtigsten Normen in den Grundzügen bekannt sind. Dazu gehören etwa die SIA 382/1 (2014) «Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (2014)».

Die Vision der Kälte-Wärme-Maschine

Ob Kältemaschine oder Wärmepumpe: Die Systeme werden künftig immer mehr miteinander verschmelzen. Einmal steht die Wärme im Vordergrund, ein anderes Mal die Kälte – und sehr oft sind es beide zusammen. Dieses Fachbuch folgt unserer Vision der – wie wir es nennen – Kälte-Wärme-Maschine. Diese nutzt sinnvoll und effizient die beim Kühlen entstehende Wärme, statt sie ungenutzt verpuffen zu lassen. Dabei vergessen wir nicht, dass es – besonders auch in innerstädtischen Situationen – viele Anwendungen mit einem Wärmeüberschuss gibt, der nicht genutzt werden kann. Für diese Situationen zeigen wir, wie die Wärme effizient abgeführt wird.

Wärme ist wertvoll

Die den Räumen entzogene Wärme bezeichnen Planer und Planerinnen bis heute als «Abwärme». Dieser leicht despektierlichen Haltung gegenüber der Wärmeenergie treten wir mit der Kälte-Wärme-Maschine entschieden entgegen. Denn die Wärme aus dem Kälteprozess hat einen Wert, der genutzt werden soll. Aus diesem Grund sprechen wir in diesem Fachbuch konsequent von «Wärme».

Was Sie in den 10 Kapiteln erfahren

Das Fachbuch startet mit einer kurzen Zeitreise durch die Geschichte der Klimakälte. Sie schärft das Verständnis für die heute aktuellen Themen und Herausforderungen. Im Kapitel 2 beginnen wir mit dem Gesamtsystem Klimakälte und der zentralen Bedeutung des Systemdenkens für kluge Klimalösungen. Im Kapitel Grundlagen werden einige wichtige physikalische Phänomene der Klimakälte erklärt. Hier erfahren Sie zum Beispiel, warum das log p,h-Diagramm für jeden Kältefachmann so wichtig ist. Im Kapitel Planung zeigen wir, welche Aspekte bei der Planung einer Klimakälteanlage besonders zu beachten sind. Danach befasst sich das Kapitel Erzeuger damit, wie das Herz der Klimakälteanlage – die Kältemaschine – funktioniert. Die Kapitel 6 und 7 widmen sich der Wärme: Wie wird die Wärme in den Räumen aufgenommen, wie wird sie abgegeben respektive abgeführt? Im Kapitel Hydraulik beschreiben wir, wie die Anlagekomponenten miteinander verbunden werden.

Danach erläutern wir im Kapitel 9 die Zusammenhänge rund um die Steuerung und Regulierung der Klimakälteanlage. Abgerundet wird das Thema Klimakälte mit dem Schlusskapitel über Energieeffizienz und Teillastverhalten.

Teamarbeit

Unsere Vision vernetzter Kälte-Wärme-Maschinen als Gesamtsystem haben wir auf die Arbeit an diesem Fachbuch übertragen. So haben wir die Inhalte als interdisziplinäres Autoren-Team – Maschinenspezialisten, Planer, Hochschuldozenten – erarbeitet. Auch hier gilt, dass das gesamte, gemeinschaftliche Werk mehr ist als die Summe der Einzelteile.

Danke

«Klimakälte heute» ist das Ergebnis einer fruchtbaren Zusammenarbeit verschiedener Personen und Organisationen: Wir danken dem SWKI, dass er die Trägerschaft für das Projekt übernommen hat und EnergieSchweiz für die grosszügige finanzielle Unterstützung. Einen bedeutenden finanziellen Beitrag haben auch die 27 Sponsoren aus der Privatwirtschaft geleistet. Sie haben damit das Projekt erst möglich gemacht.

Wir danken den Co-Referenten Robert Dumortier, Othmar Humm und Rüdiger Külpmann für ihren wertvollen, kritischen Blick auf das Werk. Für die zuverlässige Verlagsarbeit einen herzlichen Dank an den Faktor Verlag und ganz speziell an Christine Sidler. Und last but not least bedanken wir uns bei Thomas Lang von der Agentur zweiweg für die Projektleitung und bei Christian Werner für das gelungene Lektorat.

Arnold Brunner
Michael Kriegers
Vladimir Prochaska
Frank Tillenkamp

Kapitel 1

Zeitreise durch die Klimakälte

Verschiedene Pioniere haben die Anfänge der modernen Klimatechnik geprägt. So suchte der Mediziner John Gorrie in der Mitte des 19. Jahrhunderts nach Methoden, um Krankenzimmer zu kühlen. Er baute dafür den Prototypen einer funktionierenden Kaltluftmaschine – wenn auch ohne kommerziellen Erfolg. Prägend für die Kältebranche war auch der Industrielle Carl von Linde, der ab 1880 Brauereien in ganz Europa mit seinen Kältemaschinen belieferte.

1902 entwickelt der junge Ingenieur Willis H. Carrier für eine Druckerei eine Maschine, um der Luft Feuchtigkeit zu entziehen. Denn die hohe Luftfeuchtigkeit stellte Gewerbe- und Produktionsbetriebe im brütend heissen New York vor grosse Probleme. Carrier entfeuchtete die Luft mit einem Ventilator, einer umgebauten Heizung und kaltem Wasser – und entdeckte dabei, dass die Luft gekühlt wird. Seine Erfindung nannte man «Air Conditioner» (A/C), und die «moderne» Klimaanlage war geboren.

Die Klimatechnik befindet sich seit der Gründerzeit in einem stetigen Wandel. Kontinuierlich werden neue Kältemittel gesucht – für eine bessere Sicherheit, gegen die Schädigung der Ozonschicht und gegen die Klimaerwärmung. Bei der Entwicklung der Verdichter und der Ansteuerungen hat sich ebenfalls viel verändert – sei es bei den Dimensionen der Maschinen oder der bedarfsgerechten Ansteuerung der Kältemaschinen und Pumpen mit Frequenzumformern.

Gleichzeitig wandelt sich das «Berufsbild» des Klimatechnikers. War die Klimatisierung in den Anfängen eindeutig beim Lüftungsfachmann angesiedelt, verschmelzen die Themen Raumklima und Kälte zunehmend, und sie verlagern sich mehr und mehr zu den Heizungs- und Kältefachpersonen.

Und nicht zuletzt auch kämpft die Klimakälte bis heute – zu Unrecht – gegen ein schlechtes Image. Zu den Ursachen gehören die in den 70er- und 80er-Jahren in der Schweiz aus dem Boden gestampften, vollklimatisierten Gebäude. Sie wurden mit kalter Luft gekühlt und wiesen dabei oft gröbere Mängel auf – Zugluft, schlechte Luftqualität, ein übermässiger Energieverbrauch. Inzwischen haben sich die Systeme grundlegend geändert, und die Mängel sind verschwunden. Moderne Klimakälteanlagen sorgen heute mit wenig Energie für ein angenehmes Raumklima und dürften in Zukunft – speziell während den immer wärmeren Sommermonaten – immer wichtiger werden.

Auf der folgenden Doppelseite sind einige Eckpfeiler der Entwicklung der Klimakälte dargestellt. Sie zeigen: Die nächste Innovation in der Kältetechnik kommt bestimmt.

	1800	1930		1970	1980
Phase	Technische Machbarkeit: Pioniere wie Willis H. Carrier oder Carl von Linde bauen die ersten Kälteanlagen.	Sicherheit bei den Kältemitteln (Brennbarkeit, Toxizität)	Verbreitungsphase	Technologie	
Ereignisse	**Ab 1876** kühlen die ersten Brauereien mit Kältemaschinen und nicht mehr in kalten Höhlen oder in Eiskellern. **USA:** Die hohe Luftfeuchtigkeit in den Südstaaten macht die Gegend nur schwer besiedelbar. Es werden Lösungen gesucht, wie die Luft entfeuchtet werden kann.	**30er-Jahre:** Der Siegeszug des Kühlschranks ebnet auch der Klimakälte den Weg. 	 **60er-Jahre:** Mit der grossen Verbreitung von Klimaanlagen entwickelte sich «cool» als positiver Begriff.	Vollklimatisierte Gebäude kommen auf. **1972:** Der Club of Rome veröffentlicht den Bericht «Die Grenzen des Wachstums» **1973:** Erste Ölpreiskrise **1979:** Zweite Ölpreiskrise	Mit Luft vollklimatisierte Gebäude bekommen – zumindest in der Schweiz – ein negatives Image, da sie oft Mängel aufweisen (Zugluft, schlechte Luftqualität, grosser Energieverbrauch). **1984:** Kühldecken verbreiten sich allmählich (1. SWKI-Seminar zu diesem Thema).
Thema	**Luftfeuchtigkeit reduzieren**	**Klimaanlage (Air Conditioner)**			
Methode		**Kühlung durch Einblasen von kalter Luft in den Raum (Umluftbetrieb)** > Energie wird über die Luft abgeführt. > Luftwechsel: 7-fach; Lufttemperatur 14 °C > Probleme: kalte Luft, Unbehaglichkeit			
Fachrichtung		**Lüftungplaner, Lüftungsinstallateur** > Thema: mit Luft kühlen über Kanalystem			
Kältemittel	natürliche Kältemittel	FCKW			
	Ammoniak, SO_2, CO_2	R11, R12 Ammoniak		Ammoniak	
Kältemaschinen	Art Kälteleistung Gewicht $COP_{Kälte}$	**Kompressionskältemaschine** 100 kW 10 500 kg ca. 1,5		**Turbokältemaschine** 350 kW 1500 kg ca. 3,0	
Gesetze, Protokolle					**1985:** Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht **1987:** Montreal Protokoll (Verbot FCKW) **1986:** Erste kantonale Energiegesetze **1987:** Verbot FCKW

	1990	2000	2010	2020	Notiz
	Umwelt –1. Phase: Ozonloch	Umwelt – 2. Phase: Erderwärmung und Energieeffizienz			
	Ozonloch: Das Chlor in den Kältemitteln schädigt die Ozonschicht. **1994:** Erstes Gebäude wird mit TABS ausgerüstet und gekühlt.	**Erderwärmung:** Die synthetischen Kältemittel weisen zum Teil ein sehr hohes Treibhausgaspotenzial auf (GWP). 	Energieeffizienz, Wärmenutzung und Gesamtwirtschaftlichkeit rücken stärker in den Fokus. 		
		Raumluftkonditionierung und Bauteiltemperierung			Da das Wort «Klimatisierung» heute eher negativ belastet ist, spricht man neu von Raumluft-Konditionierung.
		Kühlung mit Wasser in Decke und sanfte Kühlung der Zuluft > Energie wird mit Wassersystem abgeführt > Luftwechsel: 2-fach, Zulufttemperatur nicht unter 18 °C > Vorteil: Behaglichkeit			Die Energie wird heute in der Regel nicht mehr über die Lüftung, sondern über ein Wassersystem transportiert.
		Gebäudetechnikplaner Heizung > Thema: mit Wasser kühlen über Rohrsystem **Gebäudetechnikplaner Lüftung** > Thema: die Lüftung hat «nur» noch hygienische Zwecke			Die Themen Raumklima und Kälte verlagern sich immer mehr von den Lüftungs- zu den Heizungs- und Kältefachpersonen.
		HFCKW, FKW	HFKW	HFO	Die synthetischen Kältemittel wurden immer in guter Absicht entwickelt. Nachträglich haben sich aber viele «ungewollte» Nebenwirkungen gezeigt. Einzig die natürlichen Kältemittel wie z. B. Ammoniak haben sich – trotz Giftigkeit respektive Explosivität – über all die Jahre bewährt.
		R22, R124, R142b	R134a, R404A, R410A	R1234ze, R1234yf	
		Ammoniak	Ammoniak	Ammoniak, CO_2, Propan	
		Turbo-Verdichter mit Drehzahlregulierung 300 kW 120 kg bis 14			Kältemaschinen werden immer kleiner, leistungsfähiger und effizienter.
	1990: Energiegesetz **1992:** Kyoto-Protokoll (verbindliche CO_2-Reduktionsziele für die Industriestaaten) **1996:** Revision kantonaler Energiegesetze (z. B. Zürich)	**2003:** SWKI-Richtline Rückkühlung **2004:** Bewilligunspflicht für Kälteanlagen **2005:** ChemRRV tritt in Kraft	**2014:** Überarbeitete Norm SIA 382/1 (2014) «Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen» liegt vor. **2016:** SN EN 378 «Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen für Kälteanlagen und Wärmepumpen» wird neu aufgelegt. **2017:** BAFU «Vollzugshilfe Kälteanlage» wird veröffentlicht.		Immer mehr Gesetze und Verordnungen regeln den Klimakältebereich und müssen vom Planer berücksichtigt werden.

Kapitel 2

Übersicht Gesamtsystem

Die Klimakälte leistet heute weit mehr, als «nur» Räume zu kühlen. In einem Gesamtsystem koppelt sie die Funktionen Kühlen und Heizen. Damit lässt sich in Gebäuden mit einem Wärmebedarf die anfallende Wärme der Kälteerzeugung nutzen. Mit Erdsonden kann die Wärme zudem saisonal im Erdreich gespeichert werden. Das Resultat sind überaus energieeffiziente Lösungen. Wenn die anfallende Wärme nicht genutzt werden kann, muss sie möglichst effizient abgeführt werden.

2.1 Systemdenken bei Klimakälteanlagen

Bei der Konzeption der Kühlung und der Heizung eines Gebäudes liegt der Fokus heute noch ausgeprägt auf den einzelnen Funktionen. Der Planer erhält entweder den Auftrag, ein Gebäude zu kühlen oder es zu heizen. Oft wird sowohl eine Heizung als auch eine Kälteanlage installiert. Und im besten Fall achtet man darauf, dass beide Systeme möglichst effizient ausgelegt sind.

Dieses isolierte Denken gehört der Vergangenheit an. Sowohl für einzelne Gebäude wie auch für ganze Areale gilt: Heizen und Kühlen müssen bei der Konzeption als Gesamtsystem betrachtet werden. Denn mit einer sogenannten Kälte-Wärme-Maschine (KWM) (siehe Bild 2.6) können die beiden Systeme direkt miteinander verknüpft werden. Dazu wird der Gesamtbedarf eines Gebäudes oder eines Areals betrachtet. Wo und wann fällt Wärme aus der Klimakälte an? Wo und wann gibt es einen Abnehmer, der Bedarf dafür hat?
So entstehen interessante Kälte-Wärme-Systeme, die mit einer Einheit Input-Energie bedeutend mehr Nutzenergie erzeugen als Einzelsysteme (Bild 2.1).
Für HLK-Fachleute heisst das, dass sie sich bei der Planung der Kälteanlage stets Gedanken zur sinnvollen Wärmeabgabe machen. Und gleichzeitig sollten keine Heizungen geplant werden, ohne die Energie intelligent zu nutzen, die durch die Kälteanlage gewonnen werden kann.

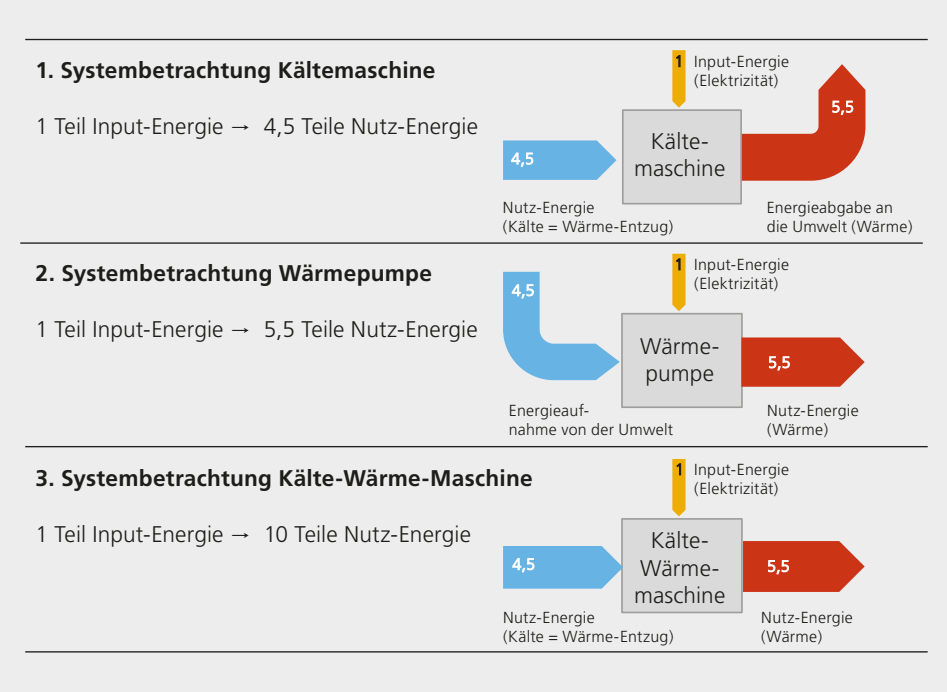


Bild 2.1: Die Systembetrachtungen einer Kältemaschine, Wärmepumpe und einer Kälte-Wärme-Maschine zeigen, dass die KWM die Input-Energie viel besser nutzt.

2.2 Die vier Systeme

In der Klimakälte unterscheidet man vier grundsätzliche Systeme.

1. Luft-Luft-Systeme

Luft-Luft-Systeme (z. B. Splitgeräte) werden eingesetzt, wenn die Wärme nicht gebraucht werden kann; es gibt keinen Bedarf oder die Wärmenutzung ist nicht wirtschaftlich. Splitgeräte eignen sich, wenn einzelne Räume gekühlt oder kleine Kühllasten abgeführt werden müssen. Diese Kühlgeräte haben einen engen Bezug zum Raum, in dem sie stehen, und zur Nutzung. Idealerweise werden sie nur dann eingeschaltet, wenn sie auch tatsächlich gebraucht werden. Zudem sind sie – bezüglich der Investitionen – eine kostengünstige Lösung, einfach in der Handhabung und unkompliziert im Betrieb. Allerdings wird die anfallende Wärme ungenutzt an die Aussenluft abgegeben, es findet eine «Energie-Vernichtung» statt. Zudem prägen die Aussengeräte an der Fassade die architektonische Gestaltung des Gebäudes, und die Ventilatorengeräusche können stören. Die beschriebenen Luft-Luft-Systeme werden in der Regel bei Kleinst-Klimakälteanlagen eingesetzt und in diesem Fachbuch nicht weiter beschrieben.

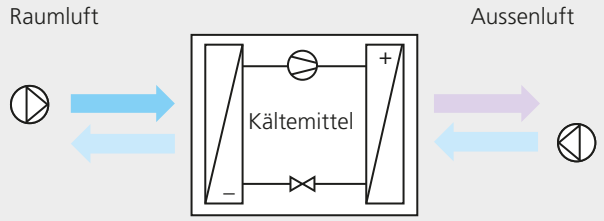


Bild 2.2: Schematische Darstellung eines Luft-Luft-Systems (z. B. Split-Kühlgerät).

2. Luft-Wasser-Systeme (Wärmepumpe)

Hat das Gebäude einen Wärme-, aber keinen Kühlbedarf, wird nur die warme Seite der Maschine genutzt. Man spricht von einer Wärmepumpe. Luft-Wasser-Systeme sind einfach zu installieren und kostengünstig.
Ein Nachteil sind die Lärmemissionen des Ventilators. Zudem muss das Aussengerät regelmässig gereinigt und gewartet werden, sonst nimmt die Leistung ab und die Störanfälligkeit steigt. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass Luft-Wasser-Systeme gerade dann die schlechteste Effizienz haben, wenn der Heizbedarf am grössten ist, weil sehr kalte Aussentemperaturen einen grossen Temperatur-Hub verursachen. Darum werden diese Maschinen nur in gemässigten Klimaregionen eingesetzt. In kalten Regionen mit Auslegungstemperaturen von –10 °C und tiefer eignen sich Luft-Wasser-System zum Heizen nur bedingt.

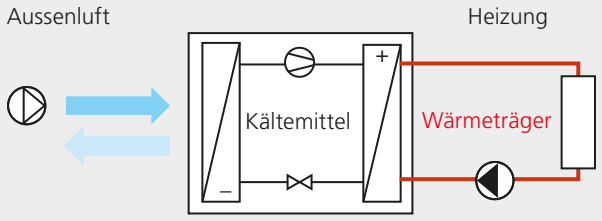


Bild 2.3: Schematische Darstellung eines Luft-Wasser-Systems (z. B. Luft-Wasser-Wärmepumpe).

3. Wasser-Luft-Systeme

Wasser-Luft-Systeme (z. B. klassische Kältemaschinen) werden in Gebäuden eingesetzt, die nur gekühlt und das ganze Jahr über nicht geheizt werden müssen. Die anfallende Wärme kann nicht genutzt werden und wird – wie bei den Splitgeräten – «vernichtet». Wird die Wärme über einen Rückkühler entsorgt, beeinflusst die Installation das Gebäudebild. Zudem verursacht der Rückkühler Lärm.

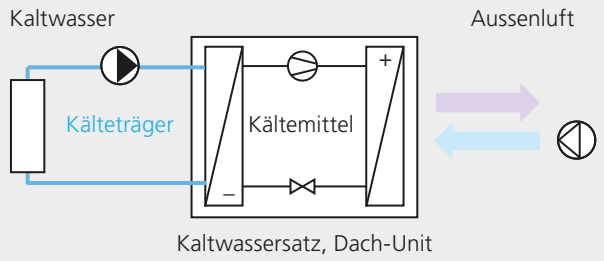


Bild 2.4: Bei einem Wasser-Luft-System wie der klassischen Kältemaschine wird nur die kalte Seite genutzt und die Wärme an die Aussenluft abgegeben.

4. Wasser-Wasser-Systeme

Bei Wasser-Wasser-Systemen (Kälte-Wärme-Maschine) wird die Energie der warmen wie auch jene der kalten Seite genutzt. Diese Variante ist sehr effizient bezüglich Stromverbrauch und reduziert die Betriebskosten wesentlich. Die Investitionskosten können aber höher ausfallen. Je nach Konzept ist mit Wasser-Wasser-Systemen eine zeitgleiche Umlagerung der Energie, eine Tagesspeicherung oder mit der Erdsonde sogar eine saisonale Speicherung der Energie möglich beziehungsweise notwendig.

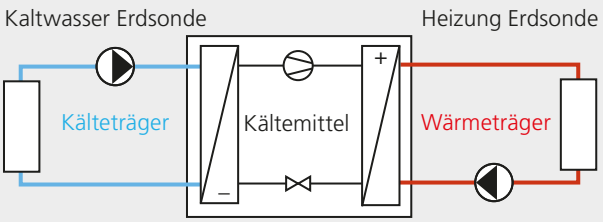


Bild 2.5: Bei einem Wasser-Wasser-System (z. B. Kältemaschine mit Wärmenutzung) werden sowohl die warme wie auch die kalte Seite des Systems genutzt.

2.3 Sicht aufs Ganze

Betrachtet man das ganze System, dann soll die anfallende Wärme aus der Raumkühlung grundsätzlich zuerst im Gebäude genutzt werden. Besteht zu gewissen Zeiten kein Wärmebedarf, soll die Wärme gespeichert werden (Tagesspeicher oder saisonale Speicherung im Erdreich). Erst wenn diese Möglichkeit ausgeschöpft ist, soll die Wärme an die Luft beziehungsweise an das Erdreich, an Grund- oder Oberflächenwasser abgegeben werden.
Diese Betrachtung gilt besonders für die in diesem Fachbuch beschriebenen Klimakälteanlagen mit einer Leistung von 20 bis 300 kW.

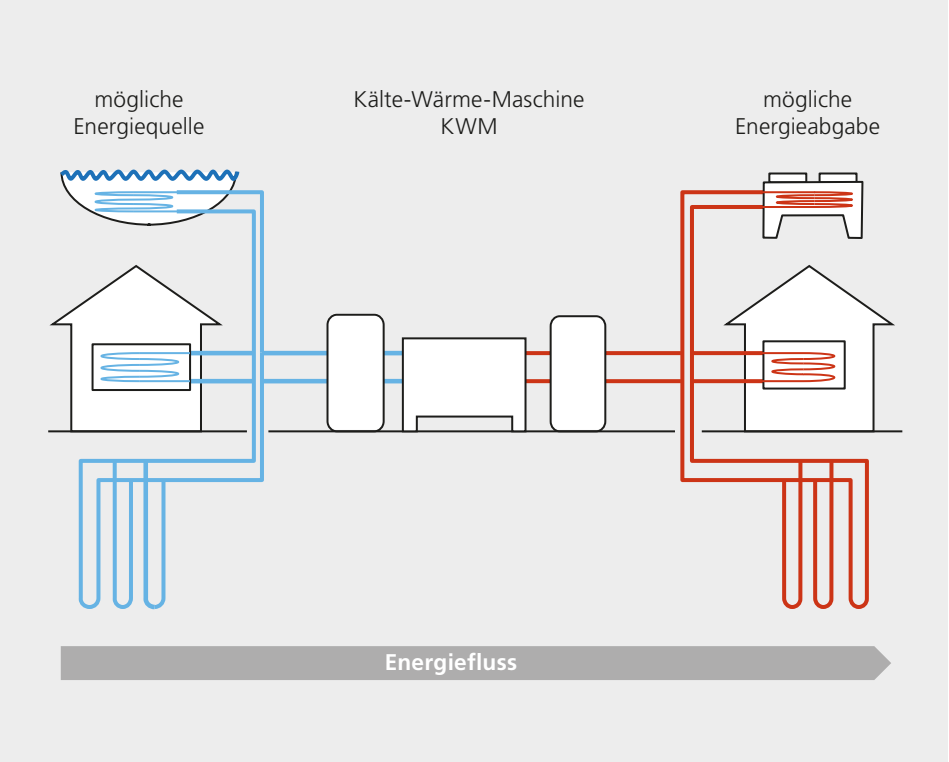


Bild 2.6:
Bei einer Gesamtsicht wird der Energiefluss von der Energiequelle bis zur Wärmeabgabe angeschaut.

2.4 Prinzip der Energie-Umlagerung

Das Prinzip der Energie-Umlagerung (saisonale Speicherung) sieht vor, dass die in den Sommermonaten zur Verfügung stehende Überschusswärme (Kälteerzeugung, Sonnenkollektoren) in einen Speicher gebracht wird. Ein interessanter Ansatz ist dabei die Speicherung innerhalb des eigenen Grundstücks mittels Erdsondenfeld. Mit einer Wärmepumpe, die aus der Erdwärme mit geringer Temperatur solche mit nutzbarer Temperatur erzeugt, wird die Energie anschliessend wieder zurückgewonnen. Saisonale Speicher werden daher als Langzeitspeicher bezeichnet; sie werden z. B. in den Sommermonaten geladen und anschliessend in den Wintermonaten genutzt.
Es muss darauf geachtet werden, dass im Sommer gleich viel Energie eingelagert wird, wie im Winter entzogen wird. Sonst erwärmt respektive unterkühlt sich der Geospeicher langfristig und verliert dadurch seine Funktion als Speicher. Daher sind die Energieflüsse über 50 Jahre zu simulieren. Im Betrieb müssen die eingelagerten und die dem Geospeicher entnommenen Energiemengen gemessen werden. Dafür muss eine qualitativ hochstehende Messeinrichtung installiert sein, da die Temperaturdifferenzen oft klein sind und sich Messungenauigkeiten sehr stark auswirken können.

Die Schwierigkeit bei saisonalen Speichern ist der meist enorme Platzbedarf, um genügend Energie speichern zu können. Dies macht saisonale Speicher im Vergleich zu Kurzzeitspeichern in der Regel wesentlich teurer und die notwendige Technik aufwendiger.

Hinweis: Die aus dem Geospeicher bezogene Energiemenge (Fläche 3 in Bild 2.7) sollte – über mehrere Jahre hinweg betrachtet – der eingelagerten Energiemenge entsprechen (Fläche 2 in Bild 2.7).

2.5 Konzeptionelle Überlegungen

Wie finde ich das optimale System?
Bei Gebäuden, die gekühlt werden, muss sich der Planer immer damit auseinandersetzen, was er mit der anfallenden Wärme macht. Der in Bild 2.8 skizzierte Entscheidungsbaum zeigt, wie das optimale System gefunden wird.
Im Idealfall wird die anfallende Wärme direkt genutzt. Konzepte mit einer Kälte-Wärme-Maschine eignen sich daher besonders bei gemischten Nutzungen, die Kälte und Wärme benötigen. Sie finden sich zum Beispiel in Gebäuden, die Dienstleitungs- und Gewerbebetriebe sowie Wohnen kombinieren. Oder aber in komplexen Bauten wie Krankenhäusern. Die Kälte-Wärme-Maschine funktioniert so-

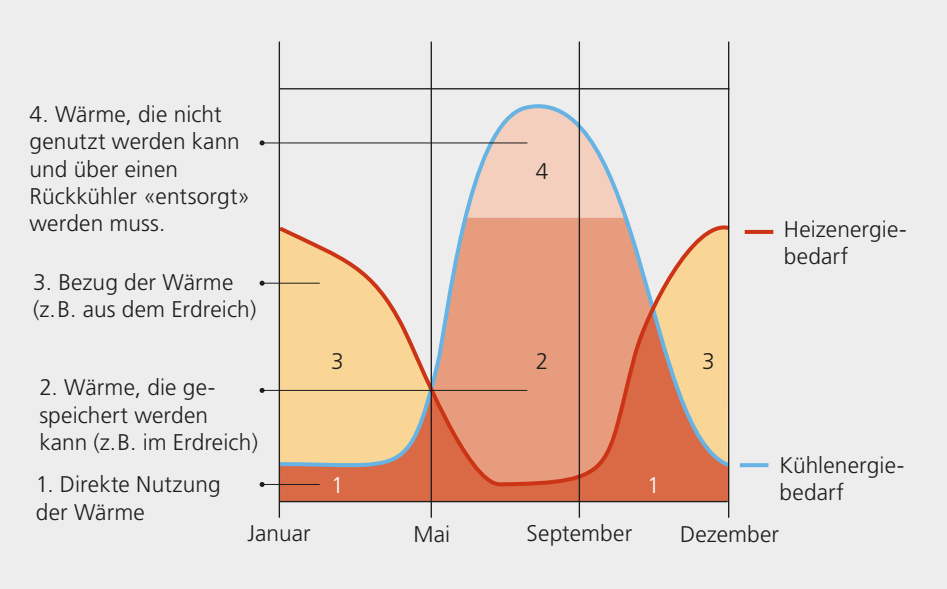


Bild 2.7: Bei der saisonalen Speicherung wird (beispielsweise mittels Erdsonden) die Energie im Sommer in einem Geospeicher eingelagert und kann im Winter wieder bezogen werden.

wohl innerhalb eines Gebäudes wie auch in einem vernetzten Areal.

Effizienz und Beherrschbarkeit des Konzeptes

Bei vielen Betreibern respektive Hausverantwortlichen von Liegenschaften ist die Vorstellung weit verbreitet, dass die Gebäudetechnik vollständig automatisch funktioniert. Dass sie selbständig alle Einstellungen korrekt vornimmt und sich sofort meldet, wenn etwas nicht stimmt.

Die Praxis zeigt aber, dass viel Fachwissen nötig ist, um «Unregelmässigkeiten» zu erkennen – heute mehr noch als früher. Da viele Betreiber dieses Fachwissen nicht haben, bleibt es oft unbemerkt, wenn die Anlage «wegdriftet».

Deshalb muss das Gesamtsystem für Kälte und Wärme einfach und verständlich sein, denn die Betreiber können nur «einfache» Systeme langfristig selber bedienen. Je vernetzter und komplexer das System, desto anspruchsvoller ist die Handhabung. Selbst bei kleinen Eingriffen muss dann eine (teure) Spezialistin beigezogen werden. Damit steigt das Risiko, dass Einstellungen ohne nötiges Sachwissen geändert werden und die Anlage als Folge davon nicht mehr korrekt betrieben wird.

Aus Sicht der Gesamteffizienz kann es deshalb sinnvoll sein, ein einfaches, robustes – wenn auch weniger energieeffizientes – Konzept einer auf Effizienz getrimmten, aber komplexen Lösung vorzuziehen.

Investitionskosten versus Gesamtwirtschaftlichkeit

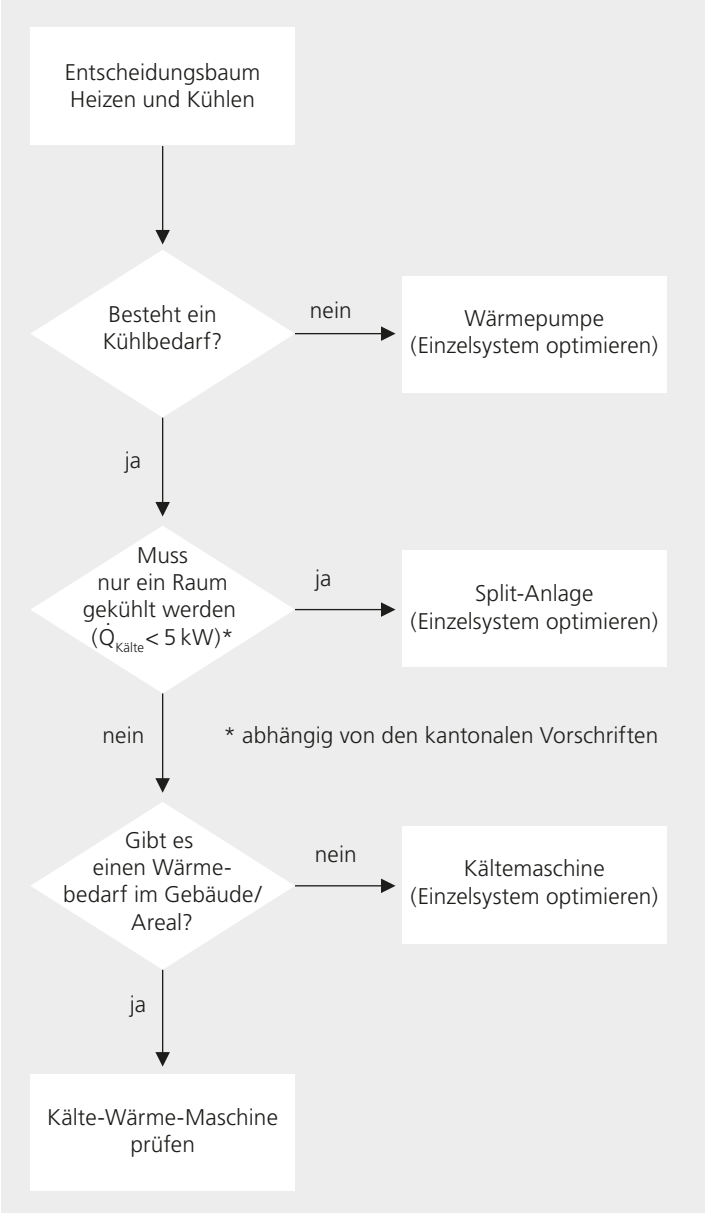
Die Gesamtkosten der Anlage setzen sich aus Investitions-, Service- und Unterhalts- sowie den Energiekosten zusammen. Besonders Investoren, die später die Klimakälteanlage nicht selber betreiben, beziehen lediglich die Investitionskosten als Auswahlkriterium mit ein. Doch über die Lebensdauer der Anlage übersteigen die Betriebskosten die Investitionskosten bei weitem. Es lohnt sich daher aus betriebswirtschaftlicher Sicht, die Kosten entsprechend zu analysieren.

Gesamtkosten =
Investitionskosten
+ jährliche Service-/Unterhaltskosten während 15 Jahren
+ jährliche Energiekosten während 15 Jahren

Zu den Investitionskosten gehören zum einen die Ausgaben für die technischen Installationen. Hinzu kommen die Kosten für:

- den Aufstellungsraum (umbauter Raum)
- die Gewerke Elektro (ev. ATEX-Installation)
- Lüftung (ev. Aussenluftzuführung Sturmlüftung)
- Brandschutz (Entrauchung)

Bild 2.8: Entscheidungsbaum für die Systemwahl für Heizen und Kühlen.



- Sicherheitseinrichtungen (ev. Gaswarnanlage, Brandmeldeanlage)
- Fluchtwege (ev. aussenliegende Treppe)

Investitions-, Service- und Unterhalts- sowie Energiekosten sind gewerkübergreifend zu erfassen und entsprechend zu optimieren. Die Erfahrung zeigt zum Beispiel, dass mit einer etwas teureren Kältemaschine, die jedoch leise arbeitet und mit einem Frequenzumformer ausgerüstet ist, diese Zusatzkosten mit Einsparungen bei der Blindstromkompensation und den schalltechnischen Massnahmen mehr als wettgemacht werden.

Verfügbarkeit und Redundanz

Die Redundanzen der Maschinen (Verfügbarkeit, Sicherheit) richten sich nach den Anforderungen an die Verfügbarkeit der Kälte und Wärme im Gebäude. Mit der Bauherrschaft muss geklärt werden, was mit den einzelnen Prozessen (z. B. Wohnen, Arbeiten, Produktion) passiert, wenn das Kältesystem ausfällt. Dazu eignet sich ein Ampelsystem:

- Prozess weiterhin möglich
- Prozess eingeschränkt möglich
- Prozess nicht mehr möglich

Anhand der Ergebnisse des Ampelsystems kann die Redundanz der Maschinen nach der Methode «n + 1» bestimmt werden. Wird z. B. n = 3 gewählt, werden vier Komponenten zu 33 % in Parallelschaltung installiert. Bei diesem Redundanzkonzept kann also eine Komponente ausfallen (oder in Wartung sein) und es steht immer noch die volle Kapazität zur Verfügung (siehe dazu auch Kapitel 4.2).
Ein anderes Konzept ist die Teilredundanz. Werden zwei Maschinen mit je 50 % Leistung geplant und eine der Kältemaschinen fällt aus, steht immer noch die Hälfte der Leistung zur Verfügung. Bei der Teilredundanz bedeutet ein Ausfall einer Komponente daher, dass das System nur noch einen Teil des Kühlbedarfs deckt.
Zudem muss ein Plan vorhanden sein für den Fall, dass alle Maschinen gleichzeitig ausfallen (z. B. Stromausfall oder Brandalarm in der Technikzentrale).

Aufstellungsort

Beim Maschinenraum und Rückkühler sind folgende Kriterien für die Planung wichtig:

- Platzbedarf
- Lärm
- Vibrationen
- Belüftungsbedarf
- Art des Kältemittels
- Gewicht

Dem Lärm besondere Beachtung schenken

Bei der Wahl des Aufstellungsorts der Kältemaschine und der Rückkühler wird der Lärm oft unterschätzt. Für Rückkühler oder Dach-Units müssen die Vorgaben der lokalen Baubehörden eingehalten werden. Oft ist eine Baubewilligung mit Lärmschutznachweis notwendig, allenfalls braucht es eine Simulation. Um die Lärmemissionen des Systems in der Nacht zu minimieren, kann man es in den Nachtruhestunden mit halber Leistung und damit leiser arbeiten lassen.

Die Grenzen der Kälte-Wärme-Maschine

In sehr dicht besiedelten Gebieten, die viel Kälte benötigen, ist es oft schwierig, einen Abnehmer für die Wärme zu finden. Dazu gehören z. B. Innenstädte mit vielen Geschäften und Büros, aber wenigen Wohnungen. Falls es kein Wärmenetz gibt, bleibt in solchen Fällen nichts anderes übrig, als die Wärme an die Umwelt abzugeben.
Dabei ist es oft eine Herausforderung, in solchen Zonen eine Rückkühlung zu erstellen, die allen Anforderungen gerecht wird: architektonisch gut integriert, technisch richtig platziert (kühler Standort) und schalltechnisch problemlos (kein störender Lärm – besonders in der Nacht).
Als Konsequenz daraus werden in Innenstädten vermehrt Fernkältenetze (oder kalte Fernwärme) installiert. Diese leisten einen Beitrag zur Verminderung von überhitzten Innenstädte (sogenannte Hitzeinseln).

2.6 Trends in der Klimakälte

«Vorhersagen sind schwierig, vor allem wenn sie die Zukunft betreffen».[1] Dennoch gibt es verschiedene Entwicklungen und Trends, welche schon heute auf die Klimakälte wirken – und sie künftig prägen könnten.

Natürliche Kältemittel

Für umweltschonende und energieeffiziente Kälteanlagen stehen Maschinen mit natürlichen Kältemitteln im Fokus: R290 (Propan) oder R1270 (Propen) sowie R717 (NH_3, Ammoniak) und R744 (CO_2, Kohlendioxid). Höhere Effizienz und geringere Kältemittelfüllmengen sind aus technischer Sicht weitere Vorteile der natürlichen Kältemittel.

Kühlen statt heizen

Es werden vermehrt Gebäude gebaut, die weniger beheizt, dafür aber mehr gekühlt werden müssen. Insofern dürfte die Klimakälte in der Gebäudetechnik an Gewicht gewinnen.

Mit Solarenergie kühlen

Bei Kältemaschinen mit Kompressoren kommt die treibende Kraft aus einem Elektromotor. Der Energiebedarf lässt sich deshalb mit einer Photovoltaikanlage decken. Kälte lässt sich aber auch mit Solarwärme erzeugen. Die dafür notwendigen Kältemaschinen arbeiten nach den Prinzipien der Absorption oder der Adsorption (siehe Exkurs «Absorptionskältemaschine» auf Seite 83).

Die Wärme der Klimakälte speichern

Die Speicherung der Wärme aus der Klimakälte beschäftigt die Forschung schon längere Zeit. Das Ziel ist es, die Wärme vom Tag in die Nacht respektive vom Sommer in den Winter zu «transferieren».

Phasenwechselspeicher oder Latentspeicher

Phasenwechselspeicher nutzen die Änderung des Aggregatzustandes eines Mediums ohne Temperaturänderung von flüssig auf fest. Bei dieser Änderung wird Energie aufgenommen oder abgegeben – man spricht daher von «latenter Wärme». Der Vorteil ist, dass in einem Phasenwechselspeicher viel mehr Energie gespeichert werden kann als bei einem herkömmlichen Speicher mit Wasser.
Diese auf eine bestimmte Temperatur ausgelegte Energiespeicherung hat sich – mit Ausnahme der Eisspeicher – bis heute aber noch nicht durchgesetzt, wohl auch aus Kostengründen.

Saisonale Speicherung

Für die saisonale Speicherung wird das Erdreich genutzt (sogenannte Geospeicher). Über ein Erdsondenfeld wird im Sommer Wärme ins Erdreich (Fels) eingelagert und im Winter entnommen.

Vermehrt Kompaktanlagen

Kompaktanlagen (z. B. Roof-Top-Anlagen) dürften stärker an Aufmerksamkeit gewinnen. Solche Anlagen sind in der Regel einfacher und günstiger, aber nicht unbedingt energieeffizienter.

Drehzahlregulierte Verdichter

Die drehzahlregulierten Verdichter (20 % bis 100 %) dürften Marktanteile gewinnen und Systeme mit Stufenschaltungen vermehrt ablösen.

Verdichter mit grösserer Leistungsdichte

Bei den Verdichtern zeichnet sich ein Trend ab hin zu Maschinen, die immer kleiner werden und immer schneller drehen (z. B. Turbo-Verdichter).

---

1 Geflügelte Worte, von denen nicht klar ist, ob sie von Karl Valentin (Kabarettist), Mark Twain (Schriftsteller) oder Niels Bohr (Naturwissenschaftler) stammen.

10 Merkpunkte zum Gesamtsystem Klimakälte

1. Das Gebäude soll immer als Gesamtsystem für ein angenehmes Raumklima betrachtet werden.
2. Die Kälte-Wärme-Maschine verbindet den Kühl- und Heizbedarf im Gebäude.
3. Eine Kälte-Wärme-Maschine nutzt die Energie effizienter als eine separate Wärmepumpe für die Heizung und eine Kältemaschine zum Kühlen (gebäudeinterne Energieverschiebung).
4. Es gibt vier Systeme der Klimakälte:
   - Luft-Luft-Systeme wie Split-Kälteanlagen
   - Luft-Wasser-Systeme wie die Luft-Wasser-Wärmepumpe (reine Wärmelösung)
   - Wasser-Luft-Systeme, die klassische Kältemaschine
   - Wasser-Wasser-Systeme, die Kältemaschine mit Wärmenutzung (Kälte-Wärme-Maschine)
5. Die Wärme soll zuerst direkt im Gebäude oder Areal genutzt werden. Falls dies nicht möglich ist, eine Zwischenspeicherung prüfen. Wenn auch das nicht geht, die Wärme möglichst effizient über den Rückkühler entsorgen.
6. Die Kälte-Wärme-Maschine ermöglicht über Erdsonden und Geospeicher die Energieumlagerung (saisonale Speicherung).
7. Effizienz und Beherrschbarkeit: Ein einfach verständliches Gesamtsystem planen, damit die Betreiber es langfristig selbst bedienen können.
8. Beim Investitionsentscheid die Gesamtkosten der Anlage während der ganzen Lebensdauer berücksichtigen.
9. Die Anforderungen an die Verfügbarkeit von Kälte und Wärme im jeweiligen Gebäude ist die Ausgangslage, um die Redundanzen der Kältemaschinen (Verfügbarkeit, Sicherheit) zu definieren.
10. Die grossen Herausforderungen in der Gebäudetechnik dürften künftig beim Kühlen der Gebäude liegen – und nicht beim Heizen.

Kapitel 3

Grundlagen

Der Kreisprozess ist der Schlüssel zum Verständnis der Kältemaschine. Die vier Phasen des Kreisprozesses nutzen die Temperatur-, Druck- und Aggregatszustandsänderungen des Kältemittels, um die Energie auf nutzbare warme oder kalte Ebenen zu verschieben. Das log p,h-Diagramm stellt diesen komplexen Prozess verständlich dar. Die unterschiedlichen Kältemittel spielen dabei bezüglich Anlagentechnik, Bau und Umwelt eine wichtige Rolle.

3.1 Kälteprozess

Der Begriff Kälte steht für den Wärmefluss, der einem Raum entzogen wird. Da Wärme immer von einer höheren zu einer tieferen Temperatur fliesst, benötigt man für die Kühlung eines Raums ein System mit einer tieferen Temperatur, welches die Wärme des Raums aufnehmen kann. Früher wurde in der Natur vorhandenes Eis im Winter eingelagert und im Sommer zum Kühlen genutzt. Heute verwenden wir dafür Kältemaschinen. Die heutigen Kältemaschinen basieren auf den folgenden Phänomenen:

Gasentspannung

Wenn ein Gas von einem hohen Druck auf den Umgebungsdruck entspannt wird, kühlt es ab (z. B. Abkühlung von Luft beim Öffnen einer Druckluftleitung). Diesen Vorgang bezeichnet man als **Joule-Thomson-Effekt**.

Die Temperatur des Gases nach der Entspannung hängt nicht nur ab von Druck und Temperatur vor der Entspannung, sondern auch von der Art des Gases.

Nutzung der Verdampfungswärme

Beim Verdampfen oder Sieden einer Flüssigkeit findet ein Aggregatzustandswechsel von flüssig zu gasförmig statt. Das benötigt Energie, um die Moleküle voneinander zu trennen. Diese Energie kann von aussen in Form von Wärme zugeführt werden (Beispiele: Kochen von Wasser).

Die Menge an Wärme, die vom Verdampfen der ersten Moleküle bis zum Verdampfen der letzten Flüssigkeitstropfen eingesetzt werden muss, wird als **Verdampfungswärme** bezeichnet. Die zugeführte Wärme wird während der gesamten Verdampfung ausschliesslich für diesen Zweck aufgewendet – es findet bei dieser Wärmezufuhr daher keine Erhöhung der Temperatur statt.

Die Temperatur, bei der die Verdampfung stattfindet (die **Verdampfungstemperatur**) wird durch den Druck bestimmt, dem ein bestimmtes Kältemittel ausgesetzt ist. Wird der Druck erhöht, erhöht sich auch die Verdampfungstemperatur (d. h. der Verdampfungszustand liegt bei einer höheren Temperatur). Wird der Druck abgesenkt, findet die Verdampfung bei tieferen Temperaturen statt. Bei passendem Druck findet die Verdampfung bei Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur statt. Wärme fliesst dann von der Umgebung an das Kältemittel – und die Umgebung kühlt sich ab.

Luft als Kältemittel

Theoretisch kann auch Luft als Kältemittel verwendet werden. Sie wird der Umgebung entnommen, verdichtet, abgekühlt und wieder entspannt. So kann sie kalt in die Umgebung (z. B. in einen Kühlraum) zurückgegeben werden. Doch bezüglich Energieeffizienz schneidet Luft als Kältemittel sehr schlecht ab. Kältemaschinen, die Luft als Kältemittel nutzen, sind daher aus technischer Sicht kaum tauglich.

Falls ein anderes Kältemittel als Luft verwendet wird, ist ein solcher «offener» Prozess ökologisch, technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll. Denn im Raum darf das kalte Gas weder Personen noch das Kühlgut oder die Umwelt gefährden und schädigen. Aus diesem Grund befinden sich alle anderen Kältemittel in einem geschlossenen Kreisprozess.

Für die technische Realisierung dieses Vorgangs muss ein geschlossener Kreislauf für ein Kältemittel aufgebaut werden. Ein Verdichter saugt das Kältemittel gasförmig an und verdichtet es auf ein höheres Druckniveau. Damit sich ein Druckunterschied aufbauen kann, muss im Kreislauf zusätzlich ein Strömungswiderstand platziert werden. Dies kann eine Drosselleitung oder auch ein veränderliches Expansionsventil sein.

Auf seiner Saugseite senkt der Verdichter den Druck (Niederdruck) und sorgt dafür, dass im davor liegenden Verdampfer flüssiges Kältemittel wie oben beschrieben verdampfen kann. Der Verdichter bestimmt somit den Verdampfungsdruck p_0 und damit auch die Verdampfungstemperatur T_0 im Verdampfer. Es muss also nur noch dafür gesorgt werden, dass flüssiges Kältemittel zugeführt wird, damit es verdampfen kann. Dieses kann in einem geschlossenen Kreislauf nur von der Druckseite des Verdichters (Hochdruck) kommen.

Sensible und latente Wärme
Eine Wärmezufuhr, die zu einer Änderung der Temperatur führt, d. h. ohne Wechsel des Aggregatzustandes, ist über die Temperatur «fühlbar» – man spricht von sensibler Wärme.
Eine Wärmezufuhr mit Wechsel des Aggregatzustandes findet bei konstanter Temperatur statt – man spricht von latenter Wärme.

Wenn ein Verdichter gasförmiges Kältemittel verdichtet, wird es aufgrund des Gasgesetzes deutlich erwärmt. Zudem führen Reibungsverluste bei der Kompression zu einer weiteren Temperaturerhöhung des Kältemittels. Das komprimierte Kältemittelgas wird als Heissgas bezeichnet und soll zum Verdampfer zurückgeführt werden – jedoch in flüssiger Form. Es muss also abgekühlt und verflüssigt werden. Die Umgebung ist deutlich kälter als das Heissgas und kann daher helfen, das Heissgas abzukühlen und im Verflüssiger zu verflüssigen. Die Verflüssigung im Hochdruck findet aufgrund des Drucks p_C auf einer deutlich höheren Temperatur T_C als die Verdampfung statt ($T_C > T_0$).

Das verflüssigte Kältemittel kann nun über das Expansionsventil zurück zum Niederdruck strömen. Es wird hierbei seine Temperatur deutlich reduzieren und kalt in den Verdampfer eintreten. Der Joule-Thompson-Effekt wie auch der Einfluss der Verdampfungswärme kommen hierbei zum Tragen.

Dieser beschriebene Kreisprozess des Kältemittels weist eine kalte Seite auf, an der Wärme von der Kühlstelle aufgenommen wird ($\dot{Q}_{Kälte}$) und eine heisse Seite, an der Wärme abgebeben wird ($\dot{Q}_{Wärme}$). Wenn

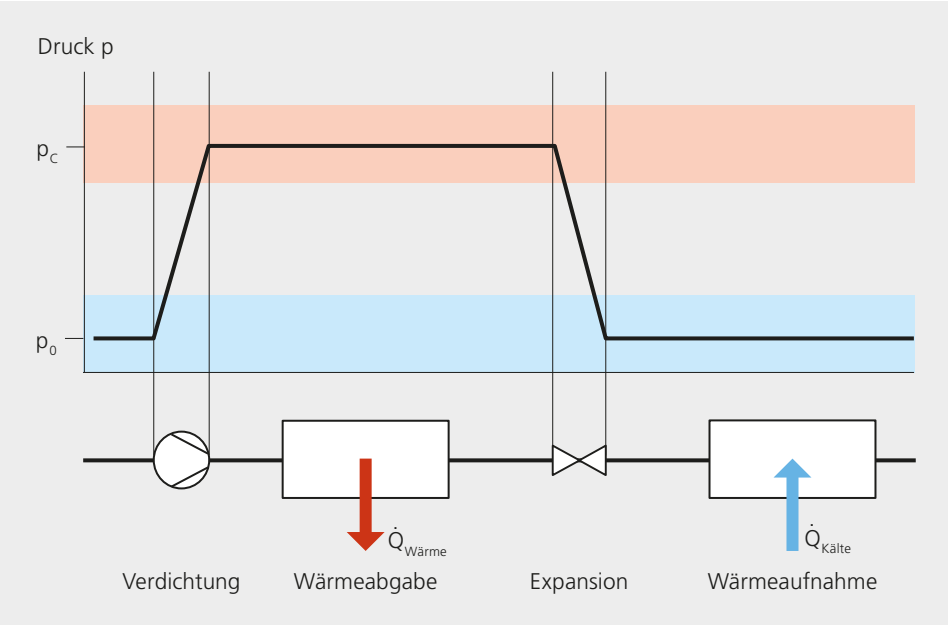


Bild 3.1: Schema mit den vier Haupt-Komponenten des Kältekreises und den beiden Druckniveaus innerhalb des Kreislaufs.

das Temperaturniveau ausreichend ist, kann die heisse Seite genutzt werden, um z. B. Wärme an einen Heizkreis abzugeben (Wärme-Kälte-Nutzung). Der Kreislauf besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Verdichter
- Wärmeübertrager im Hochdruck zur Wärmeabgabe (Verflüssiger)
- Expansionsventil zur Entspannung auf der Niederdruckseite
- Wärmeübertrager im Niederdruck zur Wärmeaufnahme (Verdampfer)

Dieser Kreisprozess ist die in der Klimakälte am weitesten verbreitete Art der Kälteerzeugung. Die entsprechenden Maschinen werden als Kompressionskältemaschinen bezeichnet. Der Kreislauf ist in Bild 3.1 als Prozess auf einer Linie dargestellt. Nach der Wärmeaufnahme (Verdampfung) beginnt auf der linken Seite wieder die Verdichtung.

3.2 Das log p,h-Diagramm

Für die Auslegung der vier Komponenten (Teilprozesse: Verdichtung, Wärmeabgabe, Expansion, Wärmeaufname) benötigt man eine Information über den Energieinhalt des Kältemittels. Der Energieinhalt wird durch die thermodynamische Grösse Enthalpie h repräsentiert und wird in kJ/kg angegeben.

Die Enthalpie eines Kältemittels kann beeinflusst werden, indem Wärme zu- oder abgeführt oder technische Arbeit zugeführt oder entnommen wird. Für ein allgemeines Teilsystem mit einem Eintritt e und einem Austritt a kann dieser Zusammenhang als Energiesatz formuliert werden:

$$q_{e,a} + w_{te,a} = h_a - h_e$$

$q_{e,a}$ Zu- oder abgeführte Wärmemenge in kJ/kg

$w_{te,a}$ Zu- oder abgeführte technische Arbeit in kJ/kg

h_e Enthalpie am Eintritt in das Teilsystem in kJ/kg

h_a Enthalpie am Austritt aus dem Teilsystem in kJ/kg

Die hier verwendeten Grössen liegen in kJ/kg vor. Werden sie mit dem Massenstrom des Kältemittels in kg/s multipliziert, ergeben sie Leistungen in kJ/s, identisch mit Kilowatt (kW).

Anhand des Kältemittel-Energieinhalts kann der Kälteprozess nun über die Niveaus von Hoch- und Niederdruck und unter Angabe der Enthalpie berechnet werden. Es bietet sich daher an, den Kälteprozess in einem Druck-Enthalpie-Diagramm darzustellen (Bild 3.2). Hoch- und Niederdruck sind dann sofort zu erkennen und die Änderungen in der Energie können als Enthalpie-Differenz direkt im Diagramm (log p,h) abgelesen werden. Da ein Verdichter den Druck etwa verzehnfachen kann, wird der Druck sinnvollerweise logarithmisch aufgetragen und das Diagramm somit als log p,h-Diagramm bezeichnet. Die Drücke sind dabei als Absolutdrücke zu verstehen.

Enthalpie

Die Enthalpie – früher auch Wärmeinhalt genannt – gibt Auskunft über die Menge der Energie (kJ), die ein System mit seiner Umwelt austauscht. Enthalpie (H) ist die Summe aus der inneren Energie (U) des Systems und dem Produkt aus Druck (p) und Volumen (V) des Systems H = U + pV.

Bezogen auf 1 kg eines Stoffes ergibt sich die spezifische Enthalpie h (kJ/kg), die im folgenden verwendet und der Einfachheit halber kurz als Enthalpie bezeichnet wird.

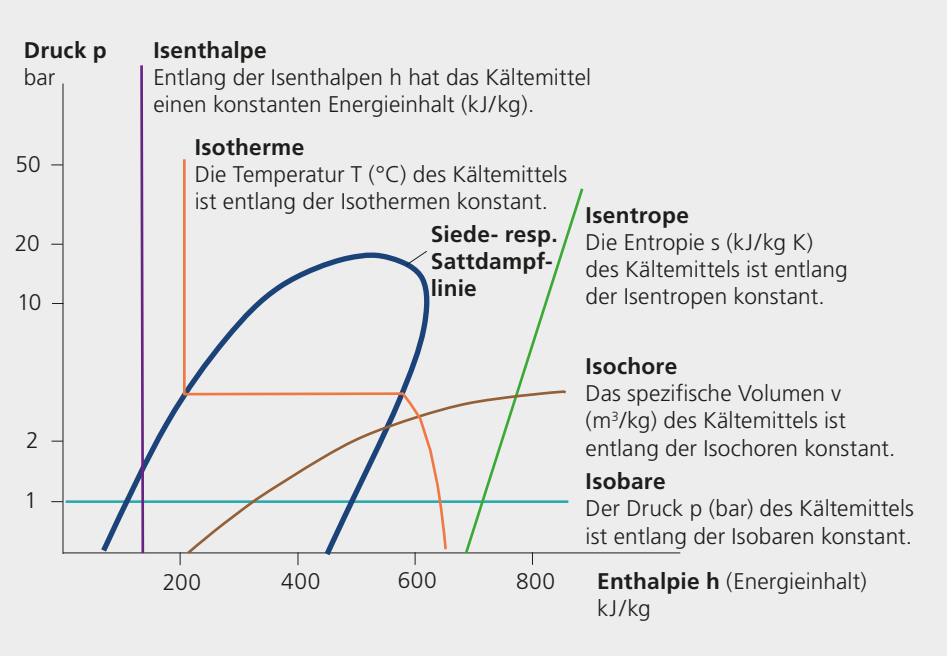


Bild 3.2: Das log p,h-Diagramm zeigt auf der x-Achse den Energieinhalt und auf der logarithmischen y-Achse den Druck. Eingezeichnet sind zudem die verschiedenen Linien mit konstanten Zustandsgrössen.

Im dargestellten log p,h-Diagramm (Bild 3.2) sind neben Druck und Enthalpie weitere Zustandsgrössen mit Linien konstanter Werte eingetragen: Es finden sich Temperatur T, spezifisches Volumen v (Kehrwert der Dichte) und die Entropie s. Die Entropie wird in kJ/(kg K) angegeben. Sie bleibt konstant, wenn ein Prozess verlustfrei umkehrbar (reversibel) und ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung abläuft. Eine konstante Entropie bezeichnet man als Isentrope. Sie stellt den absoluten Idealfall der Verdichtung und der Entspannung dar. Innerhalb des Kreisprozesses der Kältemaschine kann die Entropie nur dann abnehmen, wenn sie mit Hilfe von Wärmeabfuhr das System verlässt.

In Bild 3.3 ist das Nassdampfgebiet eingetragen. Es befindet sich zwischen der Siedelinie und der Taulinie (oder Sattdampflinie). Wenn der Flüssigkeit in einem Wärmeübertrager Wärme zugeführt wird, verläuft dieser Prozess entlang einer Isobaren (d. h. bei konstantem Druck) horizontal von links nach rechts im log p,h-Diagramm (Linie A → B). Zunächst steigt die Temperatur der Flüssigkeit immer weiter an und schliesslich beginnt an der Siedelinie die Verdampfung (erste Gasblasen). Eine weitere Wärmezufuhr verläuft dann bei konstanter Temperatur entlang der Isobaren waagrecht durch das Nassdampfgebiet (gleichzeitiges Vorliegen von Flüssigkeit und Gas). Bei Erreichen der Taulinie ist auch der letzte Anteil Flüssigkeit verdampft und eine weitere Wärmezufuhr führt wieder zu einer Temperatursteigerung des nunmehr überhitzten Gases.

Wenn umgekehrt einem überhitzten Gas isobar Wärme entzogen wird, fällt seine Temperatur (Linie B → A). Es entstehen bei Erreichen der Taulinie erste Tröpfchen Flüssigkeit. Nach Durchqueren des Nassdampfgebietes nach links (Temperatur und Druck bleiben konstant) ist bei Erreichen der Siedelinie jeder Gasanteil kondensiert und die Temperatur der unterkühlten Flüssigkeit fällt wieder mit zunehmender Wärmeabfuhr ab.

Die Verdampfungsenthalpie findet sich im log p,h-Diagramm als horizontale Strecke zwischen Siede- und Taulinie. Dieser Siedezustand hängt vom Druck ab. Mit zunehmendem Druck verringert sich die spezifische Verdampfungsenthalpie, d. h. der konstante Temperaturbereich wird kleiner.

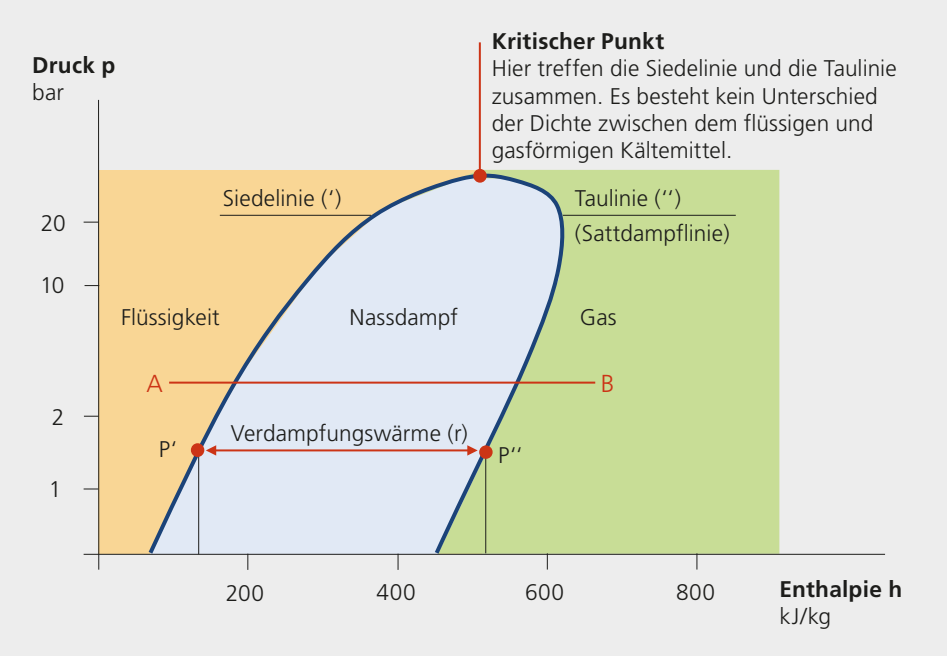


Bild 3.3: Das log p,h-Diagramm mit dem Nassdampfgebiet, in dem Flüssigkeit und Dampf gleichzeitig vorliegen. Die Enthalpie-Differenz zwischen dem Punkt an der Siedelinie (P') und dem Punkt auf der Taulinie (P") ist die Verdampfungswärme (r).

3.3 Carnot-Prozess als idealer Vergleich

Das Verständnis der Idealvorgänge ist für den Kältemaschinenbauer wichtig. Der Idealvorgang ist eine wertvolle Information, wenn es darum geht, das Potenzial für Verbesserungen des realen Prozesses zu erkennen.
Mit dem idealen Kreisprozess von Wärmekraftmaschinen hat sich erstmals 1824 der Begründer der Thermodynamik N. L. Sadi Carnot auseinandergesetzt. Er postulierte, dass ein umgekehrter Prozess zur Dampfmaschine[1] existieren muss – quasi die Erfindung der Kältemaschine respektive der Wärmepumpe.
Der Carnot-Prozess besteht aus zwei Teilprozessen, die bei konstanter Entropie verlaufen (isentrope Verdichtung und isentrope Expansion) und zwei Teilprozessen, bei denen Wärme isotherm (d. h. bei konstanter Temperatur) zu- und abgeführt wird. Er kann also ganz einfach über zwei **Isothermen** und zwei **Isentropen** beschrieben werden.
Auch der Carnot-Prozess kann über einen Wirkungsgrad beurteilt werden. Hierzu wird das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand betrachtet. Der Nutzen einer Kältemaschine ist die aufgenommene Wärmeleistung (Kälteleistung $\dot{Q}_{Kälte}$) – der Aufwand ist die mechanische Leistung des Kompressors P. Da das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand hier grösser als 1 wird, spricht man von einer Leistungszahl ε und nicht mehr von einem Wirkungsgrad η.
Basierend auf idealen Betrachtungen kann die Carnot'sche-Leistungszahl durch das Verhältnis der Temperatur bei der Wärmeaufnahme (T_0) zum Temperatur-Hub zwischen Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe ($T_c - T_0$) berechnet werden, ohne die Leistungen zu kennen:

$$\varepsilon_{c\,Kälte} = \frac{T_0}{(T_c - T_0)}$$

Gleichung 3-1

Die Temperaturen sind in der absoluten Temperaturskala Kelvin (K) einzusetzen (0 °C = 273,15 K).
Die Gleichung 3-1 hilft, mit einer sehr einfachen Rechnung die theoretisch maximal erreichbare Leistungszahl einer Kältemaschine zu berechnen. Sie ist für eine reale Maschine unerreichbar und dokumentiert die physikalischen Grenzen.
Eine Betrachtung der Gleichung zeigt die theoretischen Hebel zur Verbesserung der Leistung auf: Ein geringer Temperatur-Hub ($T_c - T_0$) und eine Anhebung der Kühltemperatur T_0 führen direkt zu einer Verbesserung. Dieser Zusammenhang wird in Bild 3.4 verdeutlicht.
Der Begriff «Wärmepumpe» bezeichnet die gleiche Maschine, wie sie bisher betrachtet wurde, nur dass der Nutzen einer Wärmepumpe auf der heissen Seite liegt ($\dot{Q}_{Wärme}$). Das hat zur Folge, dass die Carnot-Leistungszahl einer Wärmepumpe $\varepsilon_{c\,WP}$ mit der Verflüssigungstemperatur T_c berechnet wird:

$$\varepsilon_{c\,WP} = \frac{T_c}{(T_c - T_0)}$$

Gleichung 3-2

Eine Leistungsbilanz über die ganze Maschine führt zu folgendem Zusammenhang zwischen den beiden Carnot-Leistungszahlen:

$$\varepsilon_{c\,Wärme} = \varepsilon_{c\,Kälte} + 1$$

Gleichung 3-3

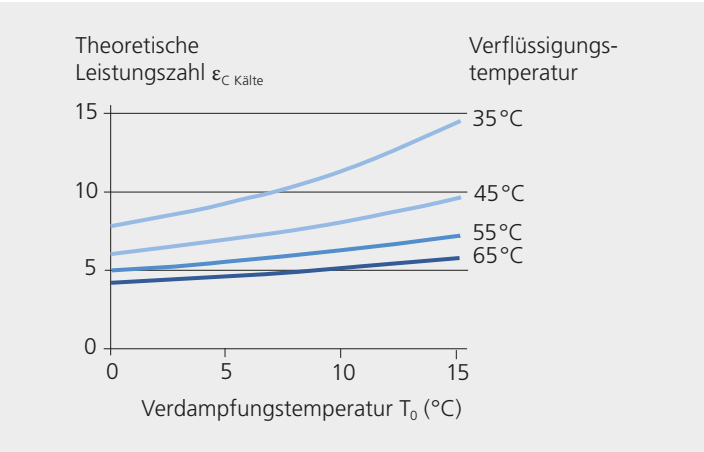


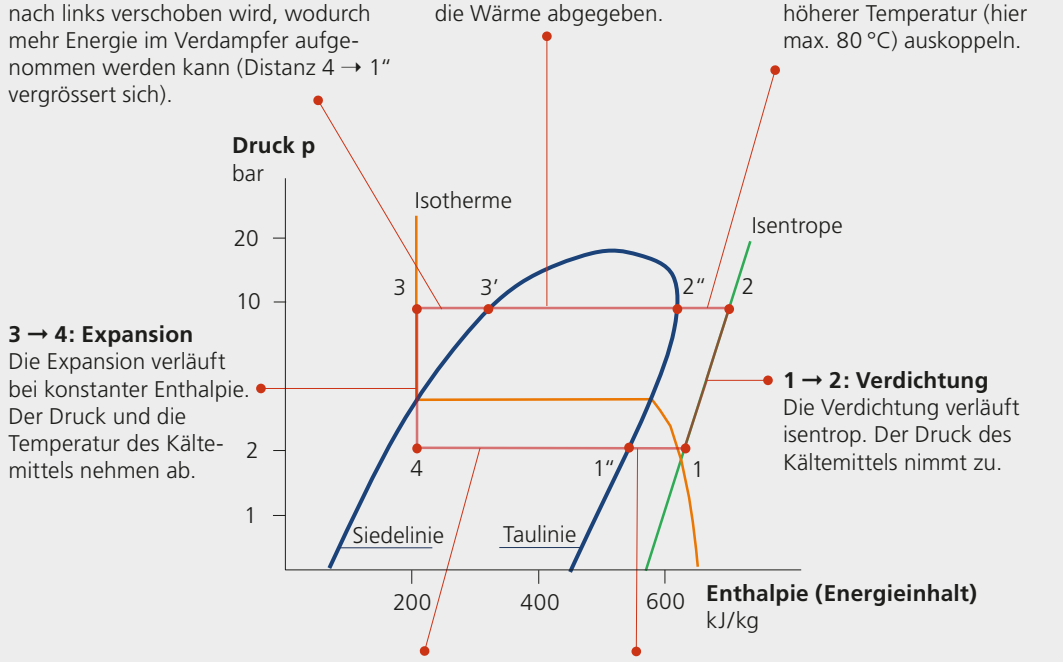
Bild 3.4: Theoretische Leistungszahlen einer Kältemaschine $\varepsilon_{c\,Kälte}$ bei verschiedenen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen in °C.

1 Bei der Dampfmaschine wird die Energie des heissen Dampfs in mechanische Energie umgewandelt.

Der Carnot-Prozess ist der absolut beste Kreisprozess, der umgesetzt werden könnte. Reale Kreisprozesse können ihn zwar nie erreichen, ihn aber sehr gut als Ideal nutzen, um ein Verbesserungspotenzial zu identifizieren. Beim Design einer Maschine kann der Ingenieur versuchen, seinen Prozess dem Carnot-Prozess anzunähern. Oder er kann anhand der Gleichungen 3-1 oder 3-2 beurteilen, ob eine Veränderung der gewählten Betriebsbedingungen zu einer effizienteren Maschine führen könnte.

3.4 Aggregatszustandsänderung nutzen

Wird in einer Kompressionskältemaschine das Druckniveau so gewählt, dass das Kältemittel verdampfen und kondensieren kann, so liegen bei der Wärmeaufnahme und -abgabe bedeutende Bereiche im Nassdampfgebiet, d. h. bei konstanten Temperaturen.
Das ist angenehm für die technische Realisierung (Kühltemperatur bestimmen), stellt eine zusätzlich nutzbare Wärmemenge zur Verfügung (latente Wärme) und führt den Prozess aufgrund der grossen isothermen Anteile näher an den idealen Carnot-Prozess heran.



3' → 3: Unterkühlung
Eine Unterkühlung der reinen Flüssigkeit links von der Siedelinie (hier um ca. 10 K) bewirkt, dass der Punkt 4 nach links verschoben wird, wodurch mehr Energie im Verdampfer aufgenommen werden kann (Distanz 4 → 1" vergrössert sich).

2" → 3': Verflüssigung
Im Verflüssigungsbereich wird bei konstanter Temperatur (hier ca. 60 °C) die Wärme abgegeben.

2 → 2": Enthitzung
Der Enthitzer liefert eine geringere Wärmemenge, kann aber die Wärme bei höherer Temperatur (hier max. 80 °C) auskoppeln.

3 → 4: Expansion
Die Expansion verläuft bei konstanter Enthalpie. Der Druck und die Temperatur des Kältemittels nehmen ab.

1 → 2: Verdichtung
Die Verdichtung verläuft isentrop. Der Druck des Kältemittels nimmt zu.

4 → 1": Verdampfung
Bei der Verdampfung nimmt das Kältemittel Wärme auf.

1" → 1: Sauggasüberhitzung
Die Überhitzung des Sauggases stellt sicher, dass keine Flüssigkeitsanteile in den Verdichter gelangen. Falls ein volumetrisch arbeitender Verdichter eingesetzt wird, führt angesaugte Flüssigkeit zu Schlägen und letztlich zum Ausfall des Verdichters. Da der Verdichter die wertvollste Komponente der Maschine darstellt, ist darauf besonders achtzugeben.

Bild 3.5:
Die (idealen) Zustandsänderungen des Kälteprozesses.

Druck- und Temperaturverhältnisse in der Kompressionskältemaschine
Druck- und Temperaturverhältnisse lassen sich für die vier zentralen Komponenten der Kompressionskältemaschine in vier Quadranten verdeutlichen (Bild 3.6). Die Quadranten unterscheiden sich in Druck, Temperatur und Aggregatszustand des Kältemittels.

3.5 Energieflüsse in der Kältemaschine

Die Darstellung des Prozesses im log p,h-Diagramm hilft beim Verständnis, welche Energie an welcher Stelle umgesetzt wird. Jede Energiezunahme oder -abnahme lässt sich direkt über die Enthalpieänderung ablesen.
Eine Leistungsbilanz über die gesamte Maschine liefert die Grundlage für das Verständnis der Energieflüsse. Als Konvention gilt, dass zugeführte Leistungen positive und abgeführte Leistungen negative Zahlenwerte erhalten. Eine Leistungsbilanz bedeutet, dass die Summe aller Leistungen, die die Systemgrenze überschreiten, Null ergeben muss. Als Leistungen treten die Kühlleistung $\dot{Q}_{Kälte}$ die abgeführte Wärmeleistung $\dot{Q}_{Wärme}$ und die zugeführte

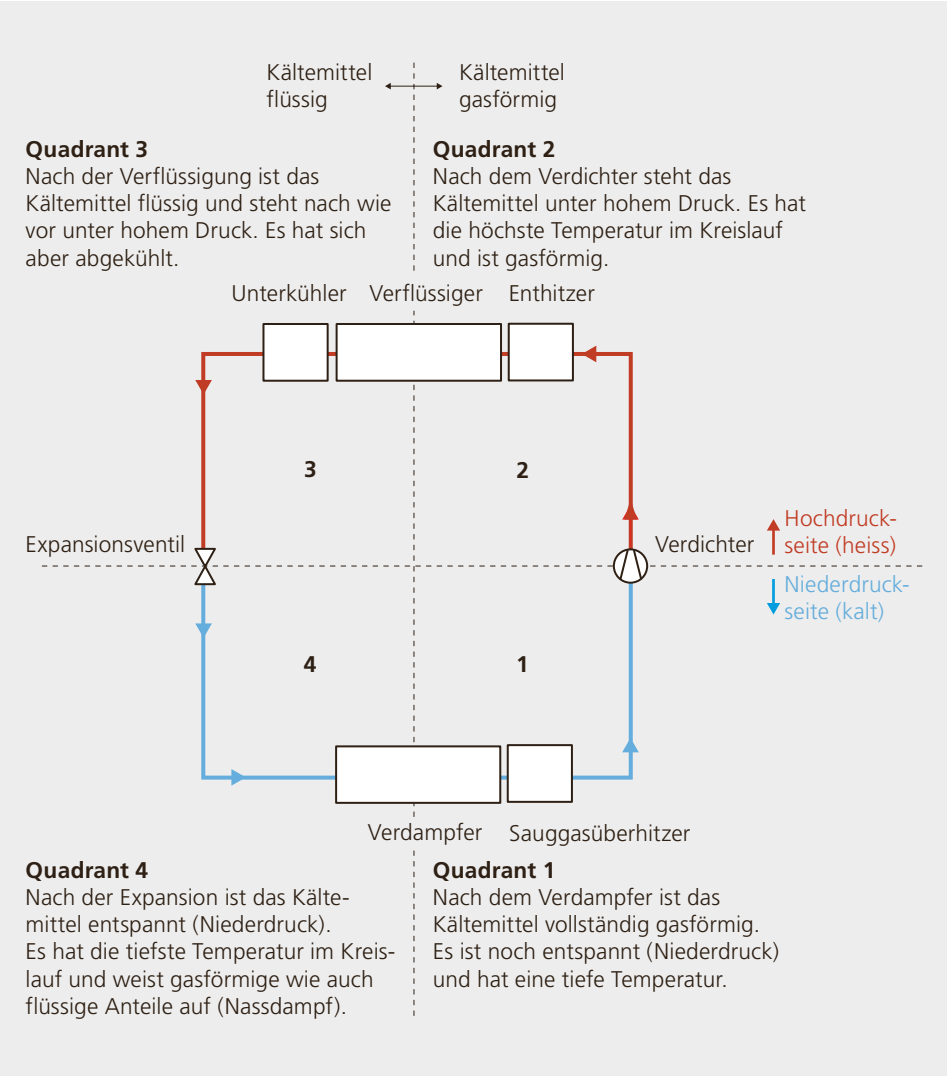


Bild 3.6: Druck- und Temperaturverhältnisse in der Kompressionskältemaschine.

elektrische Verdichterantriebsleistung (P_{el}) auf. Die Gleichung 3-4 verdeutlicht, wie sich im Betrag Kühlleistung und Verdichterantriebsleistung zur abgeführten Wärmeleistung addieren:

$$\dot{Q}_{Kälte} + P_{el} = -\dot{Q}_{Wärme}$$

Gleichung 3-4

$\dot{Q}_{Kälte}$ Zugeführte Wärmeleistung (Kühlleistung) in kW

P_{el} Zugeführte elektrische Leistung zum Verdichter in kW

$\dot{Q}_{Wärme}$ Abgeführte Wärmeleistung in kW

In spezifischen Enthalpien formuliert, lassen sich die Strecken im log p,h-Diagramm in Bild 3-7 wiederfinden.

$$(h_1 - h_4) + (h_2 - h_1) = h_2 - h_3$$

Gleichung 3-5

Interessant ist es, den Weg der Energie durch die Kältemaschine zu verfolgen. Das Bild 3-8 verdeutlicht diese Energieflüsse anhand eines Sankey-Diagramms (Energieflussdiagramm).

Der Energiefluss verdeutlicht das Mass des zu- und abgeführten Wärmeflusses. Am Expansionsventil erkennt man den Energiefluss vom Hoch- zum Niederdruck mit einhergehender Temperaturabsenkung. Im Verdampfer kommt die aufgenommene Wärme von der Kühlstelle hinzu und die Summe beider wird zum Verdichter transportiert. Hier kommt einzig die Antriebsleistung hinzu und die Temperatur steigt zum Heissgas an. Der Grossteil der Energie verlässt die Maschine daraufhin im Verflüssiger als Wärme und der Rest kehrt zum Expansionsventil zurück.
Für jeden Teilschritt kann der Energiesatz aufgestellt werden (siehe auch Abschnitt zum log p,h-Diagramm).

$$q + w_t = h_{aus} - h_{ein}$$

q Zu- oder abgeführte Wärmemenge in kJ/kg

w_t Zu- oder abgeführte technische Arbeit in kJ/kg

h_{ein} Enthalpie am Eintritt in das Teilsystem in kJ/kg

h_{aus} Enthalpie am Austritt aus dem Teilsystem in kJ/kg

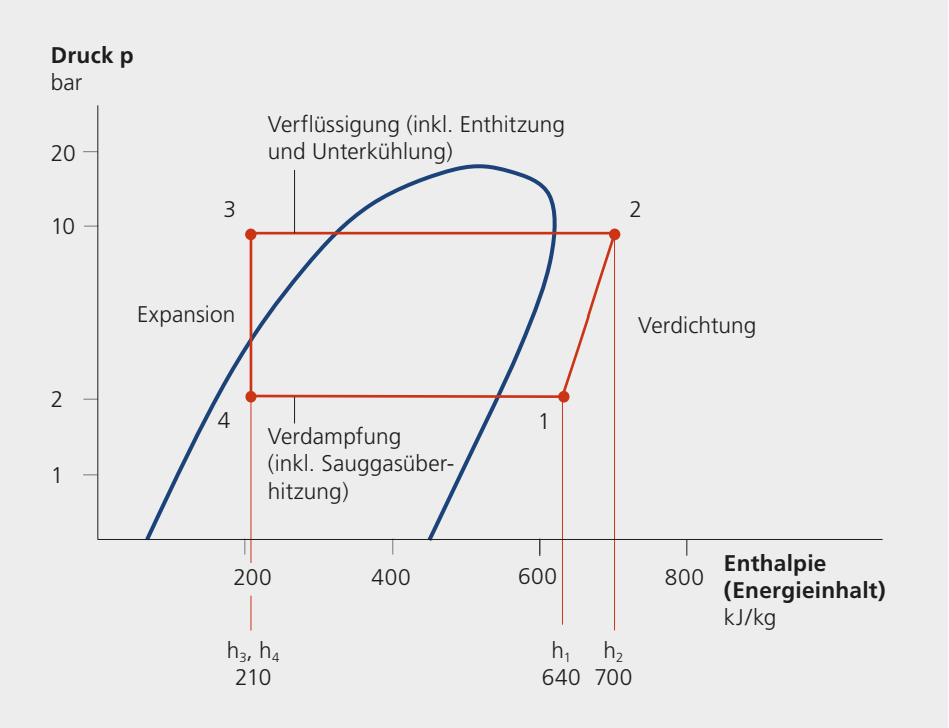


Bild 3.7: Beispiel einer Leistungsbilanz über die gesamte Maschine. Berechnung gemäss Gleichung 3-5: (640 kJ/kg – 210 kJ/kg) + (700 kJ/kg – 640 kJ/kg) = 700 kJ/kg – 210 kJ/kg.

Wir betrachten nun ein Teilsystem vom Punkt 1 als Eintritt und Punkt 2 als Austritt (1-2). Aus der so erhaltenen Wärmemenge q_{12} oder Arbeit w_{t1-2} in kJ/kg wird durch Multiplikation mit dem Kältemittelmassenstrom $\dot{m}$ (kg/s) eine Leistung in kW errechnet:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}\, q_{1-2}$$

$$P = \dot{m}\, w_{t1-2}$$

Eine Bilanz kann auch über einen einzelnen Wärmeübertrager aufgestellt werden. Die übertragene spezifische Wärmemenge für eine Seite des Wärmeübertragers errechnet sich allein aus der Enthalpiedifferenz des strömenden Mediums.

$$q_{1-2} = h_2 - h_1$$

Unter der Annahme, dass die gesamte Energiemenge, die auf der einen Seite abgegeben wird, auch komplett von der anderen Seite aufgenommen wird, können die Enthalpiedifferenzen auf der Kältemittelseite und der Wärmeträgerseite eines Wärmeübertragers gleichgesetzt werden. Für den Verflüssiger (Index c) verdeutlicht Bild 3.9 diese Situation.
Die übertragene Wärme lässt sich bilanzieren. Es gilt der folgende Berechnungsweg:

Sekundärseite

$$\dot{Q}_{cWärmeträger} = \dot{m}_W\,(h_{AW} - h_{EW})$$

Primärseite

$$\dot{Q}_{cKältemittel} = \dot{m}_K\,(h_{K\,ein} - h_{K\,aus})$$

Bilanz

$$\dot{Q}_{cWärmeträger} = -\,\dot{Q}_{cKältemittel}$$

Daraus folgt

$$(h_{K\,ein} - h_{K\,aus}) = (h_{AW} - h_{EW})\,\frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_K}$$

Gleichung 3-6

h_{EW}	Enthalpie Wärmeträger ein
h_{AW}	Enthalpie Wärmeträger aus
$\dot{m}_W$	Massenstrom Wärmeträger
$h_{K\,ein}$	Enthalpie Kältemittel ein
$h_{K\,aus}$	Enthalpie Kältemittel aus
$\dot{m}_K$	Massenstrom Kältemittel

Bild 3.9 zeigt die dazugehörigen Temperaturverläufe von Kältemittel und Wärmeträgermedium. Deutlich zeigt sich, wie die Verflüssigung des Kältemittels eine Stufe im Verlauf erzeugt und das Wärmeträgermedium rein flüssig einen kontinuierlichen Temperaturanstieg erlebt.
Für einzelne Bereiche, in denen keine Aggregatszustandsänderung stattfindet, kann eine Enthalpiedifferenz annähernd mit der Wärmekapazität c und der Tempe-

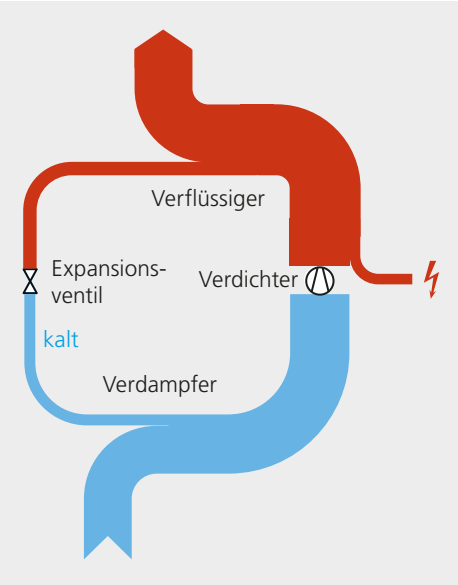


Bild 3.8: Energiefluss-diagramm der Kompressions-kältemaschine.

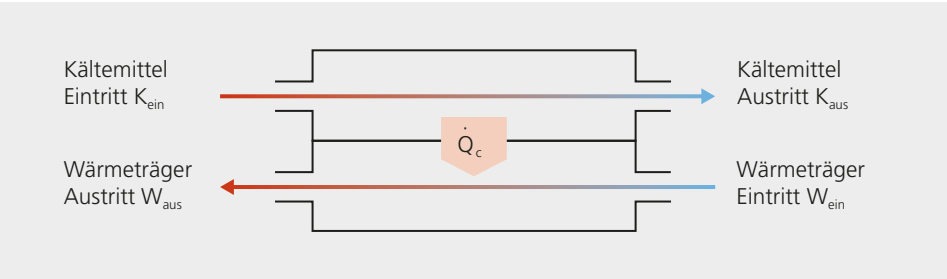


Bild 3.9: Darstellung eines Wärmeübertragers am Beispiel eines Verflüssigers. Das Kältemittel (K) tritt bei K_{ein} ein und bei K_{aus} aus, das Wärmeträgermedium (W) tritt bei W_{ein} ein und bei W_{aus} aus. Die vom Kältemittel abgegebene Wärme geht vollständig an das Wärmeträgermedium über.

raturdifferenz berechnet werden. Für die Wärmeträgerseite gilt somit:

$$\dot{Q}_{cWärmeträger} = \dot{m}_W c_W (T_{AW} - T_{EW})$$

Diese einfache Beziehung kann nur abschnittsweise auf die Kältemittelseite angewandt werden (Enthitzung, Verflüssigung, Unterkühlung), da sich die Wärmekapazität von gasförmigem, kondensierendem und flüssigem Kältemittel deutlich unterscheiden.
Die Gleichung 3-5 verdeutlicht den Zusammenhang. Eine Änderung von Massenstrom oder Eintrittstemperatur auf der Wärmeträgerseite wird sich sofort auf die Enthalpie des Kältemittels am Austritt auswirken – und das ist genau Punkt 3 des Kreisprozesses. Tritt bei Betrachtung des Verflüssigers das Wärmeträgermedium wärmer ein, als es geplant ist, verlagert sich Punkt 3 des Kreisprozesses nach rechts – und damit auch Punkt 4. Dies bedeutet eine direkte Reduktion der Kälteleistung (siehe Bild 3.11).

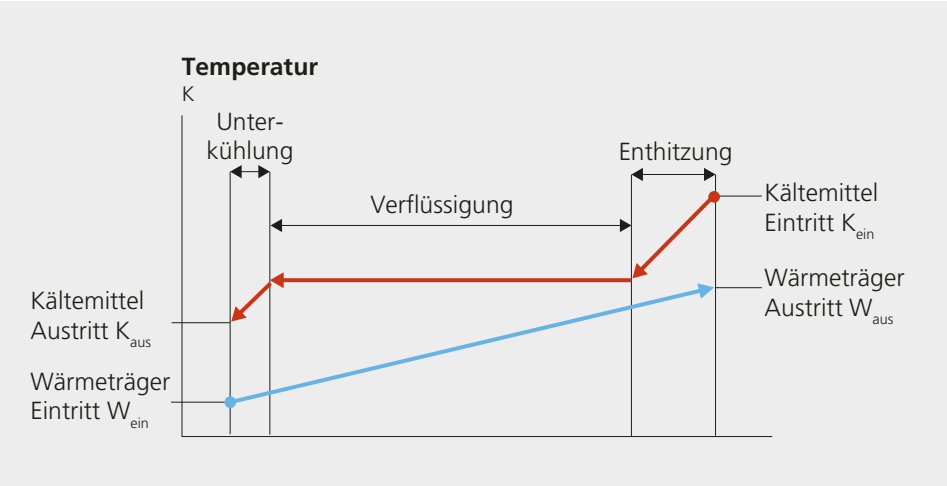


Bild 3.10: Beispiel für reale Temperaturverläufe im Verflüssiger: Kältemittel (rot) und das Wärmeaufnahmemedium (blau).

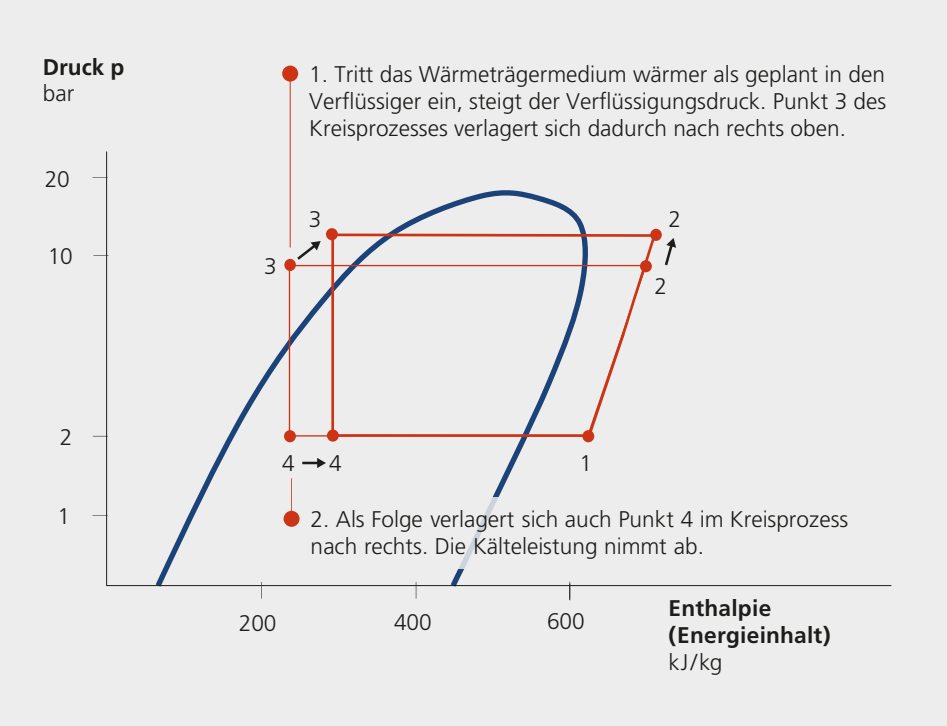


Bild 3.11: Beispiel der Auswirkung einer höheren Eintrittstemperatur des Wärmeträgers auf die Kälteleistung. Kann die Wärme nicht bei der optimalen Temperatur abgegeben werden, reduziert sich die Kälteleistung.

3.6 Auswahl von geeigneten Kältemitteln

Um einen Stoff als Kältemittel verwenden zu können, muss er sich für den Kälteprozess (Verdichtung, Verflüssigung, Expansion, Verdampfung) gut eignen. Die ersten Kältemittel waren Stoffe, die in der Natur vorkommen – sogenannte natürliche Kältemittel. Dies sind z. B. Kohlendioxid, Wasser oder Ammoniak.
Neben der technischen Beherrschbarkeit war die Dichtheit der Anlagen ein Problem. Erste gängige Kältemittel im 19. und frühen 20. Jahrhundert waren z. T. giftig oder schnell entflammbar. Ein möglicher Austritt des Kältemittels in die Umgebung bedeutete daher eine Gefahr (vergleiche auch «Zeitreise durch die Klimakälte» auf Seite 7).
Dies forcierte die Suche nach Sicherheitskältemitteln, die künstlich hergestellt werden – sogenannte synthetische Kältemittel, die ab 1930 zum Einsatz kamen. Giftigkeit und Entflammbarkeit konnten so vermieden werden. Allerdings haben sich mit der Zeit andere Probleme bemerkbar gemacht (vgl. weiter unten: Ozonabbaupotenzial ODP, Erderwärmungspotenzial GWP).
In der Norm SN-EN 378 sind die sicherheitstechnischen und umweltrelevanten Anforderungen an Kältemaschinen definiert und geregelt. Zudem müssen bei der Kältemittelwahl die örtlichen Umweltgesetze beachtet werden.

Eigenschaften	Wunsch
Thermophysikalisch	• Hohe Verdampfungsenthalpie • Dampfdruck bei den Arbeitstemperaturen auf technisch gut beherrschbarem Niveau • Niedrige Viskosität
Chemisch	• Chemische und thermische Beständigkeit • Gute Werkstoffverträglichkeit • Gute Verträglichkeit mit Maschinenölen
Ökologisch	• Keine Ozonschichtzerstörung (ODP = 0) • Geringes Treibhauspotenzial (GWP = 0, kleiner TEWI)
Physiologisch	• Ungefährlicher Umgang
Ökonomisch	• Hohe Verfügbarkeit • Geringe Kosten

Bild 3.12: Anforderungen an das Kältemittel bei der Auswahl.

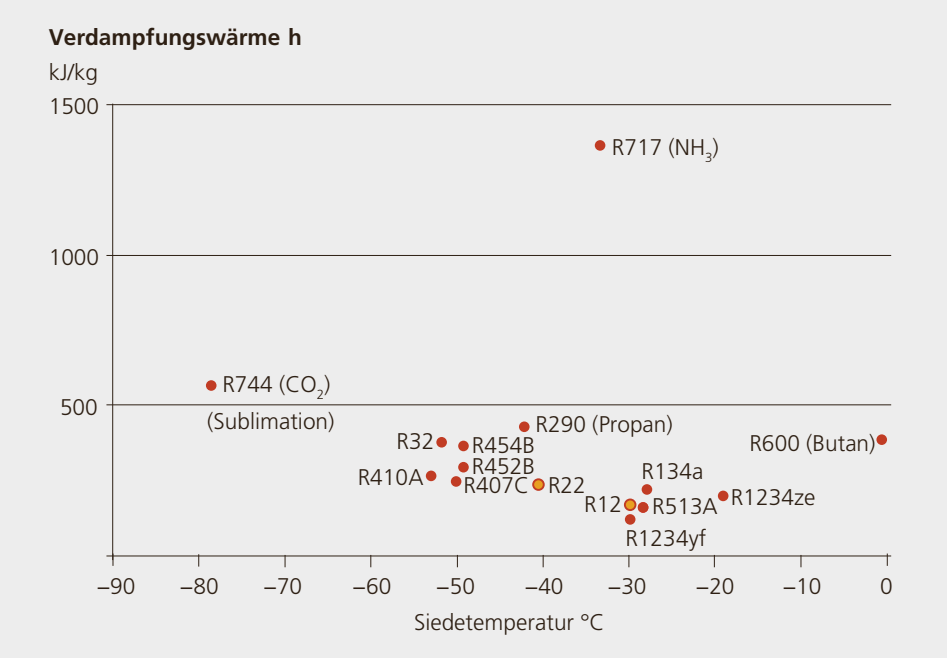


Bild 3.13: Verdampfungswärme und Siedetemperatur von Kältemitteln bei Umgebungsdruck (p = 1,013 bar). Achtung, die Kältemittel R12 und R22 sind verboten, sie werden jedoch noch häufig als Vergleichswerte beigezogen. Darum werden sie hier ebenfalls aufgeführt.

Für die Auswahl eines geeigneten Kältemittels werden die jeweiligen thermophysikalischen, chemischen, ökologischen, physiologischen und ökonomischen Eigenschaften beurteilt (Bild 3.12).
Die Auswahl eines Kältemittels beginnt mit der thermophysikalischen Betrachtung der Anlage: Welche Kälteleistung soll die Anlage bei welchen Temperaturen liefern, ohne dass die Kältemittelmenge zu gross wird?
Danach wird geprüft, welche ökologischen Vorschriften einzuhalten sind und ob dies mit dem Kältemittel möglich ist. Für den Maschinenbauer ist zudem relevant, welche Werkstoffe und Dichtungsmaterialien gewählt werden müssen. Und welches Öl bei Bedarf zur Schmierung des Verdichters eingesetzt werden kann (chemische Eigenschaften). Öl und Kältemittel beschränken den Betriebsbereich auf der Hochdruckseite der Maschine massgeblich, da sie nur bis zu den vom Hersteller angegebenen Temperaturen eingesetzt werden können.
Die physiologischen Eigenschaften des Kältemittels spiegeln sich zumeist in den Sicherheitsanforderungen an die Kältemaschine. Dazu werden die Kältemittel hinsichtlich ihrer Giftigkeit und Brennbarkeit in Klassen eingeteilt und entsprechende Sicherheitsmassnahmen für den Anlagenbau vorgeschrieben.
Die Wahl des Kältemittels erfolgt auch nach ökonomischen Gesichtspunkten. Dies beschränkt sich nicht allein auf den Preis des Kältemittels und die Kosten der Maschine. Vielmehr liegt der Fokus auf den Betriebskosten der Kältemaschine. Erfahrungen zeigen, dass gegen 80 % der Gesamtkosten einer Anlage aus dem Betrieb (Energiekosten und Unterhalt) resultieren.

Thermophysikalische Eigenschaften

Die thermophysikalischen Eigenschaften des Kältemittels beeinflussen vor allem den Bau der Maschine. Bild 3.14 zeigt die Verdampfungsenthalpie gängiger Kältemittel über der Siedetemperatur bei Umgebungsdruck als Auslegungskriterium. Die gewünschte Verdampfungstemperatur T_0 wird durch eine Erhöhung des Systemdruckes in der Kältemaschine erreicht. Die im Bereich der Klimakälte notwendige Kühltemperatur von ca. 0 °C führt für die meisten gängigen Kältemittel zu einem relativ einfach zu handhabenden Druckbereich unterhalb von 10 bar. Der Einsatz von CO_2 als Kältemittel führt zu deutlich höheren Drücken (grösser ca. 30 bar Verdampferdruck p_0) und erfordert daher vom Maschinenhersteller spezielles Wissen und die

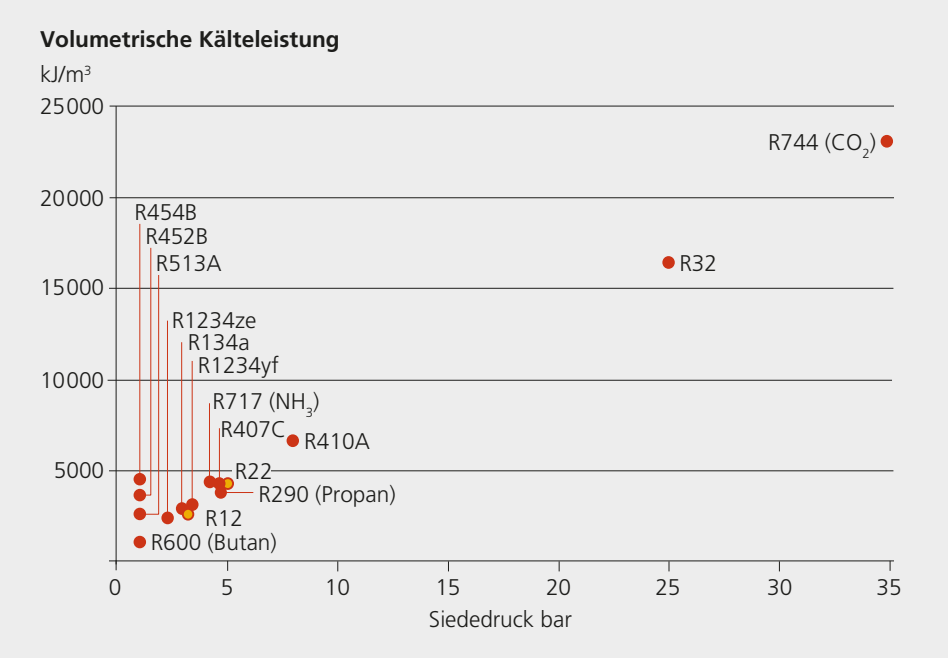


Bild 3.14: Maximale volumetrische Kälteleistung von verschiedenen Kältemitteln (theoretischer Wert mit (h″ – h′) bei 0 °C). Je nach Betriebsbedingungen ändert die volumetrische Kälteleistung des Kältemittels. Werte, wie sie in der Praxis bei Klimakälteanlagen üblich sind, finden sich in Bild 3.16.

Beherrschung entsprechender Fertigungsverfahren.
Ammoniak bietet eine rund dreimal grössere Verdampfungswärme als andere Kältemittel und ermöglicht daher grössere Kühlleistungen bei sinnvollen Kältemittelmassenströmen. Gleichzeitig kann im Vergleich zu anderen Kältemitteln die Kältemittelmenge bei grösseren Anlagen deutlich reduziert werden. Zu beachten ist, dass in die Berechnung der Kälteleistung die Dichte des Kältemittels eingeht (sogenannte volumetrische Kälteleistung, vgl. Bild 3.14).
Bei Betrachtung der volumetrischen Kälteleistung bei 0 °C zeigt das Bild 3.14 das Verdampfungswärme-Potenzial verschiedener Kältemittel bei Ausnutzung der kompletten Verdampfungswärme. Hier fällt das natürliche Kältemittel CO_2 auf, das allerdings höhere Betriebsdrücke benötigt. Zudem ist bei CO_2-Anlagen eine Wärmenutzung empfehlenswert.

Physiologische Eigenschaften
Die physiologische Einteilung von Kältemittel ist aufgrund ihrer Brennbarkeit und ihrer Giftigkeit vorgenommen worden. Geltende Normen regeln den Umgang entsprechend der Klassen in Bild 3.15.
Grundsätzlich werden weniger giftige Kältemittel in die Klasse A und stärker giftige Kältemittel in die Klasse B eingeteilt. Die Brennbarkeit wird mit einer angehängten Zahl angegeben und steigt von 1 (keine Flammenausbreitung) bis auf 3 (stark brennbar) an.
Die Einteilung des Kältemittels bestimmt die Sicherheitsmassnahmen bei der Aufstellung von Kältemaschinen. Die Massnahmen sind in SN EN 378 geregelt und im Kapitel Planung (siehe Bild 4.3) erläutert.

brennbar	giftig	
	weniger	stärker
stark	A3	B3
gering	A2	B2
kaum	A2L	B2L
nicht (keine Flammenausbreitung)	A1	B1

Bild 3.15: Die verschiedenen Klassen von Kältemitteln in Abhängigkeit von Giftigkeit und Brennbarkeit.

Für die neuen HFO-Kältemittel wurde eine neue Klasse 2L definiert, da HFO zwar unter bestimmten Umständen brennbar sein können, ihre Verbrennungsgeschwindigkeit jedoch gering bleibt. In der Definition der Sicherheitsmassnahmen beim Umgang mit HFO hat sich der Kältemaschinenbauer eher an Ammoniak zu orientieren als an R134a, für welches HFO gerne als Ersatzkältemittel eingesetzt wird.

Ökologische Eigenschaften
- **Zerstörung der Ozonschicht (ODP):** Die ersten Sicherheitskältemittel gehörten zur Gruppe der Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe FCKW. Sie sind ungiftig und nicht entflammbar. Sie weisen aber ein hohes Potenzial zur Zerstörung der Ozonschicht in der Atmosphäre auf.
- **Das Ozonabbaupotenzial**, das ein Kältemittel hat, wird mit ODP – Ozone Depletion Potential – bezeichnet. Je grösser der ODP-Wert, desto schädlicher ist das Kältemittel für die Ozonschicht. Die heute aktuellen Kältemittel haben praktisch kein Ozonabbaupotenzial mehr.
- **Erderwärmungspotenzial (GWP):** Kältemittel haben ein Treibhauspotenzial und tragen damit zur globalen Erwärmung bei. Das entsprechende Erderwärmungspotenzial eines Kältemittels wird mit dem Wert GWP – Global Warming Potential – angegeben. Der GWP-Wert des Kältemittels steht in Relation zu CO_2 (GWP = 1), das für die Erderwärmung mengenmässig hauptverantwortlich ist.

Aus Sicht der Umwelt steht der GWP-Wert eines Kältemittels im Vordergrund. Je höher der GWP ist, desto stärker trägt das Kältemittel zur globalen Erwärmung bei, wenn es freigesetzt wird. Zu beachten ist: Das natürlichen Kältemittel CO_2 wird nicht künstlich erzeugt, sondern ist bereits in der Umwelt vorhanden. Damit kann es für die Auswirkung auf die Atmosphäre neutral bewertet werden.

3.7 TEWI-Bewertung

Zur Berechnung der ökologischen Eigenschaften einer Kälteanlage über ihren gesamten Lebenszeitraum wurde der TEWI-Wert (Total Equivalent Warming Impact) definiert. Er berücksichtigt zum einen den indirekten Umwelteinfluss, der aus dem Jahresenergiebedarf einer Anlage (Stromverbrauch und dem entsprechenden CO_2-Ausstoss) bewertet wird. Hinzu kommt der direkte Treibhausgasbeitrag durch Freisetzen des verwendeten Kältemittels. Der direkte Beitrag berücksichtigt den Ersatz von Kältemittel aufgrund von Leckage und die Rate der Recyclierung beim Rückbau der Anlage. Der TEWI-Wert steht also für die äquivalente CO_2-Menge, die während der Lebensdauer einer Anlage freigesetzt wird. Der TEWI berechnet sich wie folgt:

$$TEWI = GWP_{Betrieb} + GWP_{Leckage} + GWP_{Rückbau}$$

Dabei ist der indirekte Anteil (CO_2-Ausstoss durch Elektrizitätsverbrauch) erfasst mit

$$GWP_{Betrieb} = n\ E\ b$$

n Lebensdauer der Anlage (Jahre)
E Energiebedarf der Anlage (kWh/Jahr)
b CO_2-Inhalt des genutzten Strommixes (kg CO_2/kWh)

und die direkten Anteile durch die Nachfüllmenge aufgrund von Leckage abzüglich des zurückgegebenen Kältemittels bei Abbruch der Anlage:

$$GWP_{Leckage} = GWP_{KM}\ L\ n$$

GWP_{KM} GWP des Kältemittels
L Leckagerate (kg/Jahr)
n Lebensdauer der Anlage (Jahre)

$$GWP_{Rückbau} = GWP_{KM}\ m\ (1 - a)$$

GWP_{KM} GWP des Kältemittels
m Füllmenge Kältemittel in der Anlage (kg)
a Rückgabeanteil des Kältemittels zum Recycling (%)

3.8 Kältemittel in der Klimakälte

Natürliche Kältemittel

In der Klimakälte werden die folgenden natürlichen Kältemittel verbreitet eingesetzt:

- R717 Ammoniak NH_3
- R290 Propan C_3H_8
- R744 Kohlendioxid CO_2

Natürliche Kältemittel weisen einen sehr kleinen GWP auf. Sie werden aus der Umwelt entnommen und treten wieder in die Umwelt aus, falls es Lecks an der Maschine geben sollte. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften sind aber zum Teil aufwendige Sicherheitsmassnahmen vorzusehen.

Synthetische, in der Luft stabile Kältemittel

In der Klimakälte sind die folgenden synthetischen Kältemittel verbreitet im Einsatz:

- R32
- R452B
- R454B
- R513A

Das Inverkehrbringen von Anlagen mit folgenden Kältemitteln wird voraussichtlich weiter eingeschränkt. Zudem ist die künftige Verfügbarkeit ungewiss.

- R134a
- R407C

Die Kältemittel R407C und 513A sind Gemische auf Basis des Kältemittels R32. Bei der Verdampfung neigen sie dazu, sich zu trennen. Dies hat zur Folge, dass die Verdampfungstemperatur mit zunehmendem Gasgehalt zunimmt. Man spricht in diesem Zusammenhang vom sogenannten Temperaturgleit, der beispielsweise bei R407C ca. 7 K beträgt. Gemische mit dieser Eigenschaft werden als zeotrope Gemische bezeichnet.
Bei 513A ist dieses Verhalten kaum sichtbar, es verhält sich nahezu azeotrop (wie ein Reinstoff).
R32 ist zunehmend in der Diskussion als Reinstoff-Kältemittel, obwohl es eine ge-

wisse Brennbarkeit aufweist (Klasse A2L). Insbesondere im Bereich kleiner Kälteleistungen findet es sich zunehmend in Kältemaschinen.

Synthetische, in der Luft nicht stabile Kältemittel

HFO (Hydro Fluor Olefine) sind synthetische Kältemittel, die in der Luft aber nicht stabil sind. In der Klimakälte sind zur Zeit die folgenden HFO zunehmend im Einsatz:

- R1234yf (GWP = 1)
- R1234ze (GWP = 1)

HFO werden als Kältemittel der 4. Generation bezeichnet und wurden mit dem Hintergrund eines geringen GWP entwickelt. Dieser liegt mit 1 bei einem Bruchteil des GWP von sonst gängigen synthetischen Kältemitteln. HFO kommen fast an den GWP der natürlichen Kältemittel heran (CO_2 = 1; Ammoniak = 0; Propan = 3). Aufgrund der chemischen Eigenschaften von HFO sind ebenfalls Sicherheitsmassnahmen bei der Aufstellung zu treffen. Sie sind der Sicherheitsklasse A2L zugeordnet, da sie eine langsame Verbrennungsgeschwindigkeit aufweisen. Die Konzeption der Anlagen orientiert sich somit eher an Ammoniak-Anlagen als an Anlagen mit R134a. Bei der chemischen Reaktion kann es zu säurehaltigen Reaktionsprodukten kommen. HFO sind ca. 10 Tage in der Luft stabil und zerfallen dann. Die Reaktionsprodukte des Zerfalls können in der Atmosphäre nachgewiesen werden. Ihre Langzeitwirkung – speziell was die Bildung von Trifluoressigsäure (TFA) bei einer Freisetzung und die dadurch entstehenden sauren Niederschläge betrifft – ist noch unklar und wird gut beobachtet, damit keine langfristigen Umweltschäden resultieren.
Für den beruflichen oder gewerblichen Umgang mit Kältemitteln braucht es eine Fachbewilligung.

Datengrundlage GWP

Das Treibhauspotential (GWP) eines Kältemittels wird unter anderem durch Verweilzeit in der Atmosphäre und dem Strahlungsantrieb (radiative forcing) bestimmt. Die Kenntnisse zur Verweilzeit und des Strahlungsantriebs werden laufend verbessert. Darum aktualisiert der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) in seinen Berichten die Werte für das Treibhauspotential regelmässig.
Die GWP-Werte in diesem Fachbuch basieren auf der «Übersicht über die wichtigsten Kältemittel» des BAFU vom September 2020. Das Treibhauspotenzial GWP wird in diesem Dokument über einen Zeithorizont von 100 Jahren betrachtet. Die Zahlenwerte für FCKW, HFCKW, FKW/HFKW und natürliche Kältemittel basieren auf dem IPCC (2007), die Zahlenwerte für HCFO auf den Werten der Weltorganisation für Meteorologie WMO (2018) und die Zahlenwerte für HFO auf dem IPCC (2014).

Die wichtigsten Kältemittel in der Klimakälte

Kältemittel		GWP [1]	Volumenstrom-bezogene Kälteleistung kJ/m³ [2]	Temperaturbereich einer wirtschaftlichen Abwärmenutzung °C [3]	Praktischer Grenzwert kg/m³ [4]	Sicherheits-klasse (Seite 16) [5]	Toxizität (ATEL/ODL) [6]	Brennbarkeit (LFL) [7]
Synthetische, in der Luft stabile Kältemittel								
R32		675	5300	35–45 (max. 55)	0,061	A2L	gering toxisch	schwer entflammbar
R134a	[9]	1430	2050	30–40 (max. 75)	0,25	A1	gering toxisch	nicht entflammbar
R410A	[9]	2090	4600	30–40 (max. 55)	0,44	A1	gering toxisch	nicht entflammbar
R452B		698	4400	30–40 (max. 55)	0,062	A2L	gering toxisch	schwer entflammbar
R454B		466	4500	30–40 (max. 55)	0,039	A2L	gering toxisch	schwer entflammbar
R513A		631	2050	30–40 (max. 75)	0,35	A1	gering toxisch	nicht entflammbar
Synthetische, in der Luft nicht stabile Kältemittel								
R1234ze		1	1550	30–40 (max. 85)	0,061	A2L	gering toxisch	schwer entflammbar
R1234yf		1	1900	30–40 (max. 75)	0,058	A2L	gering toxisch	schwer entflammbar
Natürliche Kältemittel								
R290	Propan	3	2750	30–40 (max. 60)	0,008	A3	gering toxisch	hoch entflammbar
R717	Ammoniak NH_3	0	3650	30–40 (max. 90)	0,00035	B2L	hoch toxisch	schwer entflammbar
R1270	Propen (Propylen)	3	3350	30–40 (max. 55)	0,008	A3	gering toxisch	hoch entflammbar
R744	CO_2	1	8500	30–60 (max. 90) [8]	0,1	A1	gering toxisch	nicht entflammbar

[1] GWP = Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial). Quelle IPCC IV, 2007 und GWP HFO gemäss Report 2014

[2] Werte gelten für $T_0 = 0\,°C$, $T_c = 40\,°C$

[3] Richtwerte der Abwärmetemperaturen, bei denen die Wärmeenergie zu einem Wärmepreis von weniger als 2 Rp./kWh ausgekoppelt werden kann. Je nach Verdichtertyp und und Anlagekonzept sind auch nutzbare Abwärmen mit höherer Temperatur möglich. Die maximale Temperatur des jeweiligen Kältemittels liegt im Bereich des in der Klammer aufgeführten Wertes. In jedem Fall muss die Wirtschaftlichkeit (Mehraufwand und Mehrertrag) beachtet werden. Mit einem Enthitzer können ca. 10 % bis 15 % der Verflüssigerleistung – ohne Anheben der Kondensationstemperatur – genutzt werden. Diese Abwärme ist «gratis» (siehe auch: Grundlagendokument zur Leistungsgarantie Kälteanlagen, Seite 3: Abwärmenutzung, EnergieSchweiz/SVK 2015).

[4] Mit dem praktischen Grenzwert kann die höchste zugelassene Konzentration in einem Personen-Aufenthaltsbereich berechnet werden. Je nachdem, welcher Wert höher ist, bestimmt die Toxizität oder die Brennbarkeit den praktischen Grenzwert (siehe Anhang C, SN EN 378-1). Sofern restriktivere nationale oder regionale Bestimmungen vorhanden sind, haben diese vor den Anforderungen der Norm an diese Grenzwerte Vorrang.

[5] Siehe auch Kapitel «Bauliche Massnahmen» (Seite 16 ff.)

[6] Für eine bessere Verständlichkeit sprachlich leicht angepasst. Die verwendeten Bezeichnungen entsprechen der Einordnung in der SN EN 387-1, Anhang E, wie folgt:
- gering toxisch = Klasse A (geringere Giftigkeit)
- hoch toxisch = Klasse B (grössere Giftigkeit)

[7] Die verwendeten Bezeichnungen entsprechen der Klassifizierung gemäss ISO 817 und ASHRAE 34:
- nicht entflammbar = Klasse 1
- schwer entflammbar = Klasse 2L
- entflammbar = Klasse 2
- hoch entflammbar = Klasse 3

[8] Beim CO_2 ist die Rücklauftemperatur (Eintrittstemperatur des CO_2 in den Gaskühler/Verflüssiger) entscheidend. Diese muss möglichst tief sein (Faustregel immer unter 35 °C).

[9] Das Inverkehrbringen von Anlagen mit diesen Kältemitteln wird voraussichtlich weiter eingeschränkt werden, die zukünftige Verfügbarkeit dieser Kältemittel ist ungewiss.

Bild 3.16: Die wichtigsten Kältemittel in der Klimakälte. (Kältemittel-Fibel, Energie Schweiz 10/2020)

10 Merkpunkte zu den Grundlagen der Klimakälte

1. Der Kreisprozess ist der Schlüssel für das Verständnis der Kältemaschine.
2. Im Kreisprozess durchläuft das Kältemittel vier Phasen:
   - Der Druck des Kältemittels wird mit dem Verdichter erhöht, und es erwärmt sich.
   - Es gibt im Verflüssiger die Wärme ab.
   - Es wird im Expansionsventil entspannt und kühlt sich dadurch ab.
   - Es verdampft anschliessend im Verdampfer und nimmt dabei Wärme auf.
3. Mit dem log p,h-Diagramm können die umgesetzten Energien (Enthalpie-Differenzen) einfach dargestellt werden.
4. Der Carnot-Prozess ist der absolut beste Kreisprozess, der umgesetzt werden könnte. Reale Kreisprozesse können ihn zwar nie erreichen, aber mit seiner Hilfe kann der reale Kreisprozess optimiert werden.
5. Ja näher zusammen die Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur liegen, desto effizienter wird der Kreisprozess. Dies gilt auch für steigende Verdampfungstemperaturen an sich.
6. Jedes Kältemittel hat Vor- und Nachteile. Für die Auswahl eines geeigneten Kältemittels werden die jeweiligen thermo-physikalischen, chemischen, ökologischen, physiologischen und ökonomischen Eigenschaften beurteilt.
7. Das Kältemittel hat grossen Einfluss auf den Aufstellungsort der Kältemaschine und die notwendigen Sicherheitsanforderungen.
8. Setzt man Kältemittel frei, kann das klimaschädigend, giftig, säurebildend oder schädlich für die Ozonschicht sein.
9. Natürliche Kältemittel und die HFO haben bei ihrer Freisetzung ein sehr geringes Treibhauspotenzial.
10. Der Einsatz von Kältemittel ist gesetzlich reglementiert. Für den Umgang mit Kältemitteln braucht man eine Fachbewilligung.

Kapitel 4

Der Planungsprozess

Hohe Funktionalität und Behaglichkeit für die Nutzer, Gestaltungsqualität und Werthaltigkeit – das sind die Ziele bei der Planung eines Gebäudes, das sich an Nachhaltigkeit und Gesamtwirtschaftlichkeit orientiert. Bereits in der Wettbewerbsphase braucht es daher eine Gebäudeplanung, die alle Fachkompetenzen verbindet und ins Boot holt: Entwurfsarchitekt, Energie- und Gebäudetechnikplaner, Baustatik-Ingenieur, Bauphysiker und Fassadenplaner.

4.1 Generelle Anforderungen

Für ein klimagerechtes Planen und Bauen müssen unterschiedliche Komponenten intelligent kombiniert werden: Fensterflächen, Sonnenschutz, alternative Beschattungen müssen mit Kühlung, Heizung und Gebäudeautomation abgestimmt werden.

4.2 Einflussfaktoren

Temperaturen sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit

Die Differenz zwischen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur ist entscheidend für die Effizienz eines Verdichters. Je kleiner die Temperaturdifferenz ist, desto effizienter und wirtschaftlicher arbeitet der Verdichter. Dafür muss auf der Warmseite eine tiefe Verflüssigungstemperatur angestrebt werden und auf der Kaltseite eine hohe Verdampfungstemperatur.

Bezogen auf ein konkretes Projekt sind in erster Priorität die Medium-Temperaturen (Kühlen und Heizen) festzulegen. In den meisten Liegenschaften werden diese Temperaturen durch die Kühlung, die Heizung und die notwendige Heizwassertemperatur für die Trinkwarmwasseraufbereitung bestimmt. Folgende Rahmenbedingungen sind dabei zu beachten:

- Die Kühlmedium-Temperaturen sind durch den Prozess und die Norm SIA 382/1 (2014) definiert, welche die Kälteträger-Temperaturen aus energetischen Gründen vorgibt. Diese dürfen nicht unterschritten werden und liegen zwischen 6 °C und 14 °C.
- Die Heizmedium-Temperatur ist bei Rückkühlung über das Dach an die sommerliche Umgebungstemperatur gebunden (allenfalls reduziert durch adiabate Effekte, wie bei der Besprühung des Rückkühlers). Nach SIA 2028 ist für Zürich-Kloten die Auslegungstemperatur zum Beispiel 32,9 °C.
- Der Legionellenschutz im Trinkwarmwasser ist entsprechend zu beachten.

Kälteträger-Temperaturen der Norm SIA 382/1 (2014) richtig interpretieren

Für eine typische Gewerbeliegenschaft oder auch ein Krankenhaus im schweizerischen Mittelland ist es nicht unbedingt notwendig, eine Kälteträger-Vorlauftemperatur gemäss Norm SIA 382/1 (2014) von genau 10 °C zu planen. Folgendes Beispiel zeigt, wie auch höhere, optimierte Temperaturen zu guten Lösungen führen können.

Wird die Kälteträger-Temperatur mit einer Vorlauftemperatur von 12 °C definiert (statt 10 °C gemäss Norm SIA), so ermöglicht dies einen Zuluft-Taupunkt von 14 °C. Damit kann für die Kühldecken eine Vorlauftemperatur des Kühlmediums von 14 °C durch eine Vorlauftemperatur-Regulierung auf der Gruppe sichergestellt werden. Es ist zu erwarten, dass durch «Kälteverluste» (Energiegewinne) am «Point of use» die Kühlmedium-Temperaturen noch um 1 K bis 2 K höher liegen und somit Kondensatbildung an den Kühlflächen und auch in Umluftkühlern vermieden werden kann.

Eine Kühlmedium-Rücklauftemperatur von 18 °C – 20 °C (ΔT ca. 3 K bis 4 K in der Kühldecke) ergibt gute Volumenströme und sichert optimale mittlere Temperatur-Differenzen bei Kühldecken. Dadurch resultieren Raumkonditionen von rund 24 °C und 55 % bis 60 % r. F. bei vernünftigen, wirt-

schaftlichen Leistungen pro Flächeneinheit. Muss eine kondensatfreie Kühlung garantiert werden, so sollte eine Taupunktüberwachung der Zuluft oder – bei Feuchte-Emission im Raum – der Abluft installiert werden. Dazu müssen Temperatur und Feuchte gemessen und daraus der Taupunkt berechnet werden. Liegt der Taupunkt über der Auslegungssolltemperatur, kann über eine programmierte Routine der Gruppen-Vorlauf entsprechend angehoben und die Kondesatfreiheit garantiert werden. Dadurch wird zwar die Leistung der Kühldecke vorübergehend reduziert, die Kühlleistung bleibt jedoch – auf einer um den gleichen Wert erhöhten Raumtemperatur – erhalten.

Ist ein tieferer Zuluft-Taupunkt notwendig, sollte nur der absolut minimal notwendige Zuluftvolumenstrom zusätzlich mit einer kleinen, allenfalls direktverdampfenden Kältemaschine behandelt werden. Diese kann optimal an das 12-°C-Kühlmediumnetz rückgekühlt werden. Daraus resultiert eine sehr gute Leistungszahl ($COP_{Kälte}$) und der Energieeinsatz wird minimiert.

Eine Heizmedium-Temperatur von 38/32 °C ist das Pendant zur Kühlung. Diese Temperaturen können auch bei erhöhten Aussentemperaturen mit hybriden Rückkühlern gehalten werden, garantieren eine optimale Leistungszahl ($COP_{Kälte}$) der Kälte-Wärme-Maschine und sind gut geeignet für Flächenheizungen (Heiz-Kühl-Decken und Bodenheizungen), für Geräte mit forciertem Wärmeübergang (Umluftgeräte, Heizlüfter, aktive Konvektoren mit Ventilatoren, Zulufterhitzer) sowie für die Trinkwasser-Vorwärmung über Plattentauscher (Ladesystem). Für die Nachwärmung des Trinkwarmwassers kann eine kleine, angepasste Wärmepumpe (Propan, CO_2) eingesetzt werden. Diese kann optimal die Energie aus dem Heizmedium-Netz beziehen. Aufgrund der hohen Temperatur der Energiequelle arbeitet diese Wärmepumpe sehr effizient und hat darum eine sehr gute Leistungszahl.

Hohe Betriebssicherheit und Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit des Kühl- beziehungsweise Heizsystems und seiner Komponenten ist definiert als prozentualer Anteil der Laufzeit, in dem dieses System beziehungsweise die Komponente fehlerfrei funktioniert – die Laufzeit wird dabei meistens auf die Jahreszeit bezogen. IT- und Prozesssysteme, medizinische Apparate aber auch Sicherheitseinrichtungen und Analysesysteme in Laboratorien sind abhängig von der Kühlung und somit von der Verfügbarkeit der Kälteanlage beziehungsweise des Kühl- und allenfalls Heizsystems. Oft wird eine Verfügbarkeit oder mittlere ausfallfreie Zeit eines Systems (MTBF, Mean Time Between Failure) von 99,9 % gefordert, was einem maximalen Ausfall des Systems von knapp zehn Stunden pro Jahr entspricht (8760 h mal 0,001). Die mittlere Dauer für die Wiederherstellung nach einem Ausfall (MTTR,

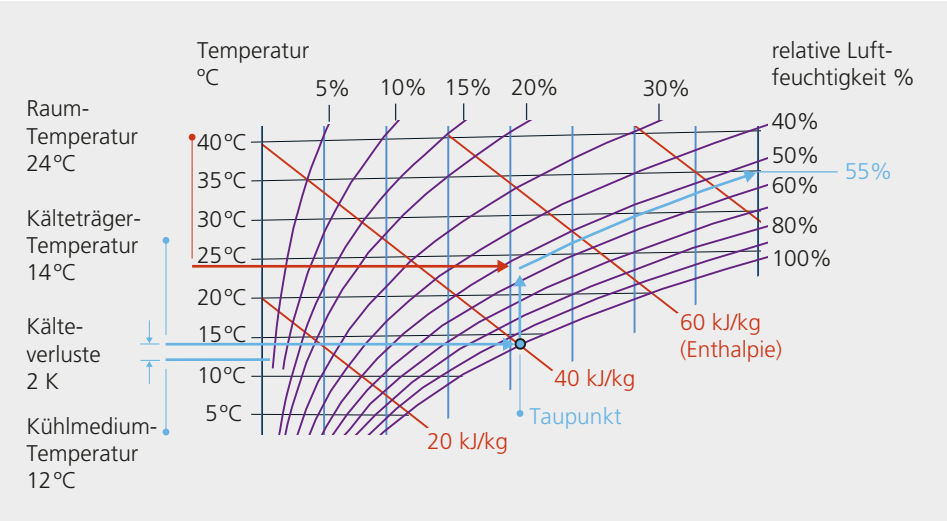


Bild 4.1: Das Mollier-Diagramm (hx-Diagramm) zeigt, wenn 14 °C warme Luft am Taupunkt auf 24 °C erwärmt wird, stellt sich eine relative Feuchtigkeit der Zuluft von ca. 55 % ein. Trotz Feuchteeinträge im Raum (Personen) kann eine Raumfeuchte von 60 % r. F. sichergestellt werden.

Mean Time to Repair) definiert die mittlere Reparaturzeit beziehungsweise wie lange ein System maximal ausfallen darf (RTO, Recovery Time Objective).
Oft wird bei der Risikoabschätzung nur die Erzeugung genau unter die Lupe genommen. Die Verfügbarkeit ist aber eine Anforderung an das ganze System und es müssen alle Komponenten beachtet werden. Die Kälteerzeugung erfüllt den Zweck nicht, wenn die Rückkühlung nicht funktioniert, eine Pumpe ausfällt oder ein Benutzer versehentlich einen Sollwert über das Leitsystem fehlerhaft verändert. Mit Blick auf das Gesamtsystem muss für jede Komponente eine individuelle Risikobetrachtung erstellt werden. Bei kritischen Komponenten wie Erzeuger, Pumpen, Ventilantriebe und andere, die einem Verschleiss unterworfen sind, muss vermieden werden, dass ein Single Point of Failure (SPOF) entsteht, d. h. dass der Ausfall der Komponente zum Versagen des ganzen Systems führen würde.
Als kritisch identifizierte Komponenten sind durch konzeptionelle Massnahmen abzusichern. Meistens wird dazu die (n+1)-Methode gewählt. Wird n = 1 definiert, so kommen zwei Komponenten mit je 100 % Kapazität zum Einsatz. Wird z. B. n = 3 gewählt, werden vier Komponenten zu 33 % in Parallelschaltung installiert. Bei diesem Redundanzkonzept kann also eine Komponente ausfallen und es steht immer noch die volle Kapazität zur Verfügung.
(siehe dazu auch Kapitel 2.5).

Dabei muss durch geeignete Massnahmen sichergestellt werden, dass die Umschaltung beziehungsweise die Rangfolgeschaltung durch die Gebäudeautomation automatisch erfolgt. Muss eine maximale Ausfallzeit (RTO, Recovery Time Objective) eingehalten werden, ist nur in seltenen Fällen eine Handumschaltung möglich (Pikettdienst, Nachteinsatz, Wochenendeinsatz).
Jede kritische Komponente muss im laufenden Betrieb unterbruchsfrei ausgetauscht werden können, d. h. ohne Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Systems. Dies bedingt nebst dem (n+1)-Konzept auch eine bestimmte Ausrüstung der Komponenten. So muss z. B. eine redundante Pumpe durch Klappen vom Netz isoliert werden können, wobei das Medium (Wasser) aus dem isolierten Netzteil durch Entlüftungs- und Entleerhahnen entfernt wird. Nun kann man die Pumpe austauschen, die Rückschlagklappe prüfen und anschliessend das Netzteil wieder befüllen und entlüften. Bevor die Pumpe wieder ans Netz gehen kann, sind deren Funktion (Betriebszustände, spezielle Programmierungen, Betriebsmeldungen, usw.) sowie der allenfalls vorhandene Pumpenschutz zu testen.

Redundanz und Instandhaltung
Redundanz führt zu Mehrinstallation und hat zur Folge, dass mehr potenzielle Fehlerquellen bestehen und mehr Komponenten ausfallen als bei einem Single-System.

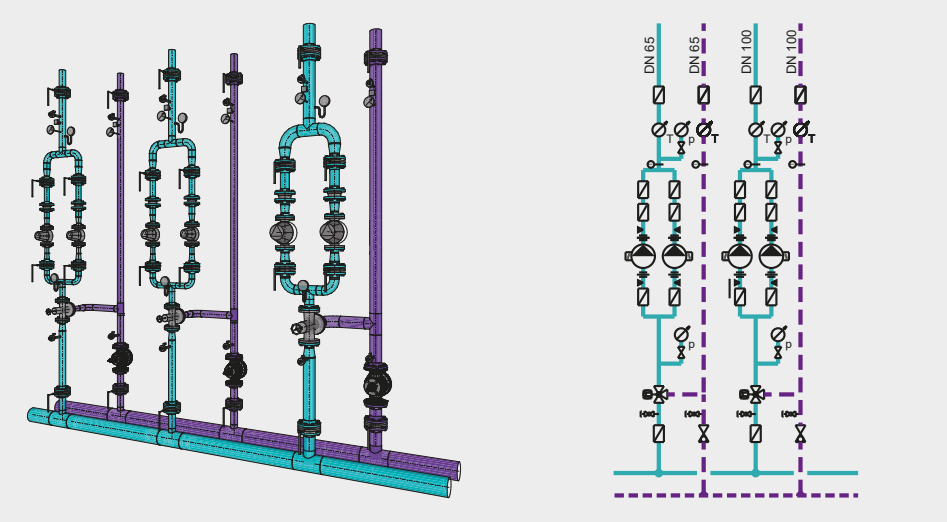


Bild 4.2: Kälteverteiler mit redundant angeordneten Gruppenpumpen und im Rücklauf angeordneten Volumenstrom-Begrenzern. Die Komponenten sind so zu installieren, dass die Pumpen im Betrieb ausgewechselt werden können.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Komponenten redundanter Systeme häufiger ausfallen, ist zwar gegeben, insgesamt ist die Verfügbarkeit des Systems aber trotzdem höher. Diese höhere Verfügbarkeit wird allerdings mit einem deutlich höheren Investitions-, Wartungs- und Managementaufwand erkauft.
Der Ausfall einer einzelnen Komponente in einem redundanten System bedeutet per Definition nicht den Ausfall des Systems. Doch der Betreiber des Systems muss innert nützlicher Frist die Redundanz wiederherstellen können. Damit dies ohne Ausfall des Systems geschehen kann, müssen sowohl das Ersatzmaterial wie auch das Knowhow zum Ersatz der Komponenten vorhanden beziehungsweise in der vereinbarten Zeit verfügbar sein. Trotzdem ist es möglich, dass die Wiederherstellung der Redundanz einen Betriebsunterbruch nötig macht. In diesem Fall muss der Betreiber die Arbeit auf ein geplantes Wartungsfenster legen.

Elektrische Installationen in Räumen, in denen brennbare Kältemittel A2L eingesetzt werden
Es muss sichergestellt werden, dass bei einem Kältemittelaustritt die elektrische Installation im Raum stromlos gemacht wird. Für Anlagen, die gemäss

der SN EN 378 ausgeführt werden, gilt:
Sobald die Kältemittelkonzentration im Raum 25 % der unteren Explosionsgrenze (LFL-Wert) überschreitet, muss der Strom abgeschaltet werden.

dem SUVA-Merkblatt 66139 ausgeführt werden, gilt:
Sobald die Kältemittelkonzentration im Raum 20 % der unteren Explosionsgrenze (LF-Wert) überschreitet, muss der Strom abgeschaltet werden.

Elektrische Elemente, die spannungsführend bleiben (z. B. Notbeleuchtung oder Ventilatoren) müssen explosionsgeschützte Ausführungen sein. Zu beachten ist dies speziell auch bei der Klimatisierung von Hotelzimmern, die mit VRV-VRF-Anlagen mit brennbaren Kälte mitteln direkt gekühlt werden.

Aufstellung und Zugänglichkeit
Die Anforderungen an die Kälte-Wärme-Zentrale bezüglich Standort, Absicherung, Belüftung, Lärm, Zugänglichkeit etc. können vor allem bei grösseren Anlagen äusserst komplex sein.[1]
Die Sicherheitsvorgaben sind abhängig von Art und Füllmenge des Kältemittels. Je nach Sicherheitsklasse sind unterschiedliche Massnahmen nötig.[2]
Je nachdem, wo die kältetechnischen Komponenten installiert werden, verlangt die SN EN 378-3 unterschiedliche Sicherheitsmassnahmen. Dabei werden folgende Aufstellungsorte unterschieden:

1. im Freien
2. im Maschinenraum
3. in einem Raum, in dem sich Personen aufhalten (Personen-Aufenthaltsbereich)
4. in einem (beliebigen) Raum ohne Personen-Aufenthalt
5. in einem begehbaren belüfteten Gehäuse

Kälteerzeuger in einem nicht begehbaren Gehäuse aufgestellt
Sind die kältetechnischen Komponenten in einem nicht begehbaren Gehäuse installiert, ist zu beachten, dass beim Arbeiten das Gehäuse offen und das Kältemittel in den umgebenden Raum entweichen kann. Mit Blick auf die Sicherheit unterscheidet die SN EN 378:

1. Gehäuse ohne Belüftung
Bei Anlagen mit Kältemitteln A1, in einem Gehäuse ohne Belüftung, darf die maximal erlaubte Füllmenge (Toxizität) am Aufstellungsort nicht überschritten werden.

1 Die wichtigsten Einflüsse kommen aus der Richtlinie SN EN 378 Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen Teile 1 – 3 sowie aus den VKF-Brandschutzrichtlinien Wärmetechnische Anlagen (24-12d).
2 Die Details zu den baulichen Massnahmen sind in SN EN 378-1 bis 378-3 und in der Vollzugshilfe zur ChemRRV Punkt 4.4.3 beschrieben.

Für die Kältemittel der Klassen A1 und A2L sind unten die wichtigsten baulichen Massnahmen beschrieben.[1]

LUFT UND LÜFTUNG
Der Maschinenraum muss mit mindestens einem vierfachen Luftwechsel pro Stunde mit frischer Aussenluft belüftet werden. (5.13.2)

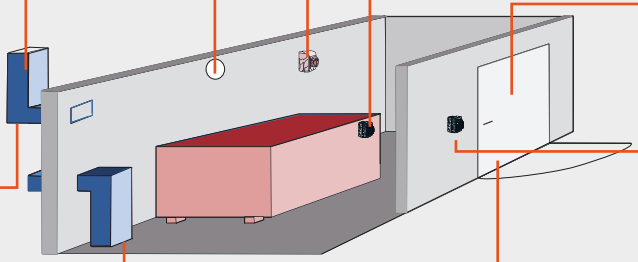
Eine mechanische Notlüftung ist notwendig, wenn die Konzentration der Kältemittel der Sicherheitsklasse A1 entweder den praktischen Grenzwert oder die Toxizitätsgrenze überschreitet. (5.13)

Für Kältemittel der Sicherheitsklasse A2L ist zusätzlich die untere Explosionsgrenze (LFL) zu beurteilen. (5.14)

Tritt Kältemittel aus, muss sichergestellt werden, dass dieses ins Freie abgeführt wird. (5.13.1)

Stehen andere Maschinen (Heizkessel, Druckluftkompressoren etc.) im Maschinenraum, dürfen diese keine Kältemittelgase ansaugen. Die Luft muss über ein eigenes Kanalsystem von aussen zugeführt werden. (5.3)

Hinweis zu Brandmelder
Brandmelder dürfen nicht auf Kältemittel-Nebel reagieren. Die Priorität des Einschaltbefehls der Lüftung ist mit der zuständigen Behörde oder Gebäudeversicherung zu klären.



NOTMASSNAHMEN
Alle Maschinenräume müssen mit Kältemittel-Detektoren ausgerüstet werden, sofern der praktische Grenzwert überschritten wird. Die Kältemittel-Detektoren müssen einen Alarm auslösen und die mechanische Lüftung (Sturmlüftung) einschalten. (9.1)

Not-Aus-Schalter 1: Im Maschinenraum muss ein Not-Aus-Schalter vorgesehen sein. (5.6)

Ein Notausgang muss ins Freie oder in einen Notausgangkorridor führen. (5.12.2)

Not-Aus-Schalter 2: Ausserhalb des Maschinenraums – in der Nähe der Türe – ist eine Fernabschaltung vorzusehen. (5.6)

DICHTIGKEIT
Alle Stellen, an denen Rohrleitungen und Lüftungskanäle durch Wände, Decken und Böden dringen, müssen abgedichtet sein. (5.8)

Maschinenräume müssen dicht sein («rauchdicht»). Kältemittel, das entweicht, darf nicht in andere Räume gelangen. (5.2)

WÄNDE, BODEN, DECKE
Wände, Böden und Decken müssen so ausgeführt werden, dass sie mindestens 1 Stunde feuerbeständig sind (EI60).

TÜREN
Die Türen müssen nach aussen öffnen und eine Feuerbeständigkeit von 30 Minuten (EI30) haben. (EKAS 6517 und VKF 24-15)

Übersteigt die Füllmenge der Kältemittel der Sicherheitsklasse A2L den zugelassenen praktischen Grenzwert (kg/m³), muss der Raum entweder eine Tür haben,
- die direkt ins Freie führt oder
- die in einen Vorraum mit einer selbstschliessenden dichten Tür führt. Der Vorraum wiederum muss eine Türe haben, die ins Freie führt. (nach SN EN 378 Teil 1 5.14.5)

1 Im Zweifelsfall kommen immer die entsprechenden Originaltexte der SN EN 378 oder SUVA 66139 zur Anwendung.

AUFSTELLUNGSORT IM FREIEN
- Bei einem Leck darf das Kältemittel nicht in Lüftungsöffnungen (z. B. Zuluftkanal), über Türen oder Dachöffnungen ins Gebäude eindringen. (4.2)
- Kann sich austretendes Kältemittel ansammeln (z. B. Aufstellung in einer begehbaren Vertiefung), sind weitere Anforderungen wie eine Belüftung, Gas-Detektoren etc. einzuhalten. (4.2)
- Bei Anlagen mit mehr als 25 kg Kältemittelfüllung sind zudem Detektoren, eine Alarmierung etc. erforderlich (BAFU, Vollzugshilfe, 4.4.3)

Bild 4.3: Die wichtigsten sicherheitstechnischen Grundsätze, die beim Bau einer Anlage mit einem in der Luft stabilen Kältemittel der Klassen A1 und A2L zu beachten sind. (Quelle: Kältemittel-Fibel, BFE, 10/2020)

2. Belüftete Gehäuse
Anlagen mit brennbarem Kältemittel (z. B. A2L) in einem belüfteten Gehäuse benötigen eine Entlüftung ins Freie. Werden belüftete Gehäuse in einem Maschinenraum aufgestellt, müssen die Anforderung an die Lüftung im Maschinenraum beachtet werden (SN EN 378-3, Punkt 4.3 und 5). Erfolgt die Aufstellung im Personen-Aufenthaltsbereich, dürfen sie nur eingesetzt werden, wenn die maximal erlaubte Füllmenge nicht überschritten und die Anforderung an die Lüftung beachtet wird (SN EN 378-3 Punkt 4.6 und SN EN 378-2, Punkt 6.2.15 und 6.2.14).

Sicherheitstechnische Grundsätze am Beispiel eines Maschinenraums
Für die Kältemittel der Klassen A1 und A2L sind im Bild 4.3 die wichtigsten baulichen Massnahmen zu finden. In den Klammern wird zudem auf die massgebenden Passagen in der SN EN 378-3 verwiesen. Es ist zu beachten, dass für die anderen Kältemittel-Klassen (A3, B2L) strengere Anforderungen gelten. Planer ohne Erfahrungen ziehen für solche Anlagen vorzugsweise einen Planer oder Lieferanten bei, der bereits Erfahrungen mit diesen Kältemitteln hat und die Stolpersteine kennt.
Zudem sind die in der SN EN 378 im nationalen Vorwort erwähnten Verordnungen und Richtlinien zu beachten (z. B. SUVA Merkblatt 66139 «Kälteanlagen und Wärmepumpen sicher betreiben»).

Welche Sicherheitsanforderungen sind zu beachten? Die SN EN 378 oder das SUVA-Merkblatt 66139?
Je nach Raumsituation und Kältemittel werden die Sicherheitsanforderungen der SN EN 378 mit Anforderungen der SUVA (Arbeitssicherheit) verschärft. In der Vertiefung 6 auf Seite 205 bietet ein Entscheidungsbaum eine Orientierung, welche Anforderungen in welchem Fall zu beachten sind.

Wie bestimme ich die maximal erlaubte Kältemittel-Füllmenge?
Je nach Nutzung des Gebäudes und dem Standort der kältemittelführenden Teile kann aus Sicherheitsüberlegungen (Toxizität und Brennbarkeit) die maximale Kältefüllmenge begrenzt sein. Die fünf Schritte im Bild 4.4 zeigen den Weg zur maximalen Füllmenge.

Wichtig: Die maximale Füllmenge ist eine sicherheitstechnische Vorgabe. Diese kann durch die Umweltvorgaben in der ChemRRV noch verschärft werden.

Weitere Sicherheitsmassnahmen
Je nach Anlagenkonstellation sind Löschmittel, Einrichtungen und Ausrüstungen für den Personenschutz, Fluchtwege, Brandabschnitte etc. mit den örtlichen Behörden zu klären sowie in einigen Fällen eine Risikoanalyse zu erstellen.[3]
Alle Anlagen sind gegen zu hohe Systemdrücke abzusichern. Je nach Anlageart und Anlagegrösse müssen die Abblasleitungen der Sicherheitsventile direkt ins Freie oder in einen speziellen Auffangbehälter geführt werden. Dabei gilt es, die entsprechenden Vorschriften und Richtlinien zu beachten.
Ob und wie die Belüftung des Aufstellungsraumes der Kälte-Wärme-Maschinen in Bezug auf Personen- respektive Umweltgefährdung auszuführen sind, ist in der Richtlinie SN EN 378 und weiteren Vorschriften geregelt. Im Zweifelsfall sind die zuständigen Behörden (z. B. SUVA) zu kontaktieren.

Technische Bedingungen
Die Lage der Kältemaschine und der Rückkühler in Bezug auf lärmempfindliche Räume (Schlafzimmer, Büro etc.) und benachbarter Liegenschaften ist bereits bei der Gebäudeplanung durch den Architekten zu berücksichtigen. Dem Schallschutz und im speziellen dem Körperschall ist bei der Planung und der Installation Rechnung zu tragen. Besonders zu beachten sind die aussen aufgestellten Rückkühler im Sommer-Nachtbetrieb.

---

3 Bundesamt für Umwelt, Bern BAFU: Mengenschwellen gemäss Störfallverordnung (StFV). 3. aktualisierte Ausgabe, Februar 2017; www.bafu.admin.ch/uv-0611-d)

1. Zu welcher Sicherheitsklasse gehört das Kältemittel
Die Sicherheitsklasse (siehe Bild 3.15) zeigt, wie brennbar (1, 2L, 2 oder 3) und wie toxisch (A oder B) das Kältemittel ist.

2. Wer hat Zugang zum Gebäude?
Die SN EN 378-1 (Kapitel 4.2.5) unterscheidet drei verschiedene Aufstellungs- respektive Zugangsbereiche (Räume, Gebäudeteile, Gebäude).

Kategorie a **Publikumsverkehr:** Hier hält sich eine unkontrollierte Anzahl Personen auf. Diese sind mit den Sicherheitsvorkehrungen nicht vertraut. Beispiele: Spitäler, Supermärkte, Schulen, Hotels, Gaststätten, Wohnungen etc.

Kategorie b **Beschränkter Personenzutritt:** Hier hält sich nur eine bestimmte Anzahl Personen auf. Mindestens eine ist mit den Sicherheitsvorkehrungen vertraut. Beispiele: Büro- oder Geschäftsräume, Laboratorien etc.

Kategorie c **Kontrollierter Personenzutritt:** Hier halten sich nur berechtigte Personen auf. Diese sind mit den Sicherheitsvorkehrungen vertraut. Beispiele: Produktionsbetriebe (Nahrungsmittel, Chemie, Molkereien, Schlachthöfe), nicht öffentlicher Bereich von Supermärkten etc.

3. Wo befinden sich die kältemittelführenden Teile?
Beim Aufstellungsort der Kälteanlage respektive der kältemittelführenden Teile werden folgende vier Klassen unterschieden:

Klasse I Die Kälteanlage oder die kältemittelführenden Teile befinden sich im Personen-Aufenthaltsbereich.

Klasse II Alle Verdichter und Druckbehälter befinden sich im Maschinenraum oder im Freien. Rohrleitung, Verdampfer, Ventile können sich im Personen-Aufenthaltsbereich befinden.

Klasse III Alle kältemittelführenden Teile befinden sich in einem Maschinenraum oder im Freien.

Klasse IV Alle kältemittelführenden Teile befinden sich in einem belüfteten Gehäuse.

4. Wie gross ist der Raum?
Das massgebende Netto-Raumvolumen wird durch den kleinsten Raum bestimmt, in dem sich kältemittelführende Teile befinden und in dem sich Personen aufhalten können. (SN EN 378-1, Kapitel 7)

5. Bestimmung der maximalen Füllmenge
Die Anforderungen an die Grenzwerte für die Kältemittel-Füllmenge können mit den oben ermittelten Werten aus den Tabellen der SN EN 378-1 entnommen werden:

1. Basis Toxizität vergleiche Tabelle C1 in der SN EN 378-1
2. Basis Brennbarkeit vergleiche Tabelle C2 in der SN EN 378-1

Der kleinere der beiden Werte bestimmt die maximal erlaubte Füllmenge.

Bild 4.4: Die fünf Schritte, mit denen die maximal erlaubte Kältemittelfüllmenge für eine Klimakälteanlage bestimmt wird.

Dimensionierung Kälte-Erzeugung
Bei der Auslegung der Kältemaschine bestimmen drei Energie-Einträge die Kälteleistung:

1. Äussere Kühllasten
- Wärmeeintrag von aussen über Hülle und Lüftung
- Die Berechnung der äusseren Kühllasten erfolgt gemäss der SIA 382-2.

2. Innere Kühllasten
- Energieeintrag durch die Nutzung (Menschen, Beleuchtung, Maschinen, Prozesse)
- Für eine erste Auslegung der Inneren Kühllasten im Vorprojekt können die Werte der Standardnutzungen nach SIA 2024 eingesetzt werden.

3. Latente (verborgene) Wärmelasten
- Wasserdampfgehalt in der Raumluft

Für die Bestimmung der benötigten Kälteleistung müssen alle drei Energieeinträge berücksichtigt werden.
Die effektiv benötigte Kälteleistung setzt sich aus folgenden Werten zusammen:

1. Kühlbedarf der Lüftung $\dot{Q}_L$ aufgeteilt in äussere (Aussenklima) und innere (Raumtemperatur) Kühllasten.
2. Kühlbedarf der Raumkühlung (Kühldecken, Umluftkühler etc.) $\dot{Q}_R$
3. Kühlbedarf der Prozesse $\dot{Q}_P$

Die Summe dieser Energieeinträge ergibt die Kühllast eines Raumes. Da jedoch nie alle Lasten gleichzeitig zu 100 % anfallen, werden die einzelnen Kühllasten mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt. So stellt man sicher, dass die Leistung der Kälteerzeugung nicht unnötig überdimensioniert wird.

Messkonzept
Bereits im Vorprojekt muss sich der Planer Gedanken zum Messkonzept machen. Braucht es nur eine Messung für die Garantieabnahme oder sind Messungen für die Überwachung der Anlage und der Energieeffizienz nötig? Kälteenergie ist eine wertvolle und teure Energie. Da zunehmend mehr Gebäude nicht mehr beheizt, dafür aber gekühlt werden müssen, ist eine individuelle Verbrauchserfassung der **teuer erzeugten** Kälte für die verschiedenen Mietparteien notwendig.

Messungen für die Garantieabnahme: Das Ziel ist es, die vom Hersteller gemachten Angaben in Offerte und Vertrag mit den effektiven Daten im Betrieb zu vergleichen. Für die Garantieabnahme können vor allem bei der Volumenstrommessung mobile Messinstrumente verwendet werden.

Energie-Messkonzept: Mit der Energiemessung wird überprüft, ob die Planungsvorgaben eingehalten werden. Zudem ermöglicht die Messung ein Energiecontrolling und liefert die notwendigen Daten für

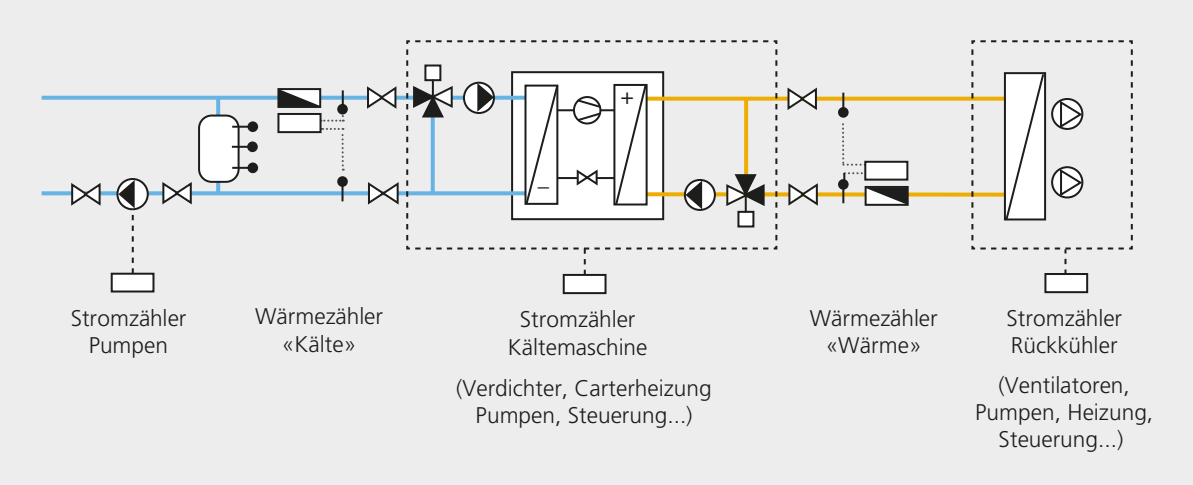


Bild 4.5: Beispiel eines Messkonzepts einer Kälteerzeugung mit einer Rückkühlung.

eine Betriebsoptimierung und eine allfällige Energiekostenverrechnung. Ein Energie-Messkonzept verlangt eine Festinstallation der Messinstrumente. Beim Aufbau der Messanordnung ist auf folgende Punkte zu achten:

- Hohe Genauigkeit der Durchflussmessung mit genügender Einlauf- und Auslaufstrecke
- Genaue Temperaturmessung: auf Schichtung achten
- Leistungsmessung: Stromaufnahme mit hoher Genauigkeit (Spannung und Strom für alle 3 Phasen)
- Zur Verifizierung der Messung sollte eine Energiebilanz erstellt werden können.
- Wärme- und Stromzähler, die zur Weiterverrechnung der Kosten an die Mietparteien genutzt werden, müssen geeicht sein.

4.3 Normen und Vorgaben

Die Norm SIA 382/1 (2014)[4] enthält die Bestimmungen, um mit Lüftungs- und Klimaanlagen bei massvollem Energieverbrauch ganzjährig Raumkonditionen zu schaffen, die behaglich sind und die keine negativen Auswirkungen auf Gesundheit und Bauwerk haben. Durch präzise Definitionen des Komfortzustandes auf der Basis der Norm SIA 180 sowie der Garantiewerte und der Abnahmebedingungen will die Norm SIA 382/1 (2014) dazu beitragen, dass die Bedürfnisse der Nutzer klar erfasst und die relevanten Bedingungen quantitativ festgelegt und kontrolliert werden können.

Bauliche Anforderungen

In der SIA 382/1 (2014) werden bauliche Anforderungen bezüglich Wärme- und Feuchteschutz nach SIA 180 verlangt. Die Grenzwerte für die Anforderungen an die thermische Gebäudehülle werden gestützt auf die SIA 380/1 definiert. Bauliche Anforderungen für Gebäude mit Lüftungs- und Klimaanlagen erstrecken sich auf die Luftdichtheit der Gebäudehülle, den Wärmeschutz im Sommer, den Feuchteschutz sowie die Behaglichkeit für die Nutzer.

Voraussetzung, dass ein Gebäude gekühlt werden darf

Eine Kühlung darf nur realisiert werden, wenn die baulichen Anforderungen gemäss SIA 382/1 (2014) und dem Energiegesetz[5] erfüllt sind. Die Notwendigkeit einer Kühlung kann gegeben sein:

1. Bei besonderen Anforderungen an die Raumlufttemperatur: Verkaufsflächen und Lagerhallen für temperaturempfindliche Güter, Labors oder Server-Räume mit Auslegung auf 26 °C usw.
2. Bei erhöhten internen Wärmeeinträgen mit oder ohne Fensterlüftung (mit oder ohne Nachtauskühlung)
3. Bei hohen sommerlichen Raumtemperatur (Wärmeeintrag über 250 Wh/m^2 in 12 Stunden oder 350 Wh/m^2 in 24 Stunden durch Simulation oder Messungen zu belegen)
4. Für bestimmte Prozess- oder Produktionsanforderungen (Lebensmittel- und Pharmaindustrie, Krankenhäuser, Präzisions-Maschinenbau usw.)

Kältemaschine oder Wärmepumpe?

Die beste Nutzung der eingebrachten elektrischen Energie wird erzielt, wenn die Anlage gleichzeitig als Kältemaschine und als Wärmepumpe (Kälte-Wärme-Maschine KWM) genutzt wird. So wird sowohl die produzierte Kälte als auch die dabei anfallende Wärme verwendet. Oft ist dies nur möglich, wenn der Nutzer der Kühlleistung auch einen Wärmebedarf aufweist (z. B. Warmwasser-Vorwärmung oder Luft-Nachwärmung bei Entfeuchtung). Wird die ganze anfallende Wärme genutzt, so kann «bewilligungstechnisch» von einem Wärmepumpensystem ausgegangen werden.

Vorgaben zur Nutzung der Wärme

Die bei der Kälteerzeugung anfallende Wärme ist gemäss Energiegesetz (EnG) zu nutzen, soweit dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist.

4 Norm SIA 382/1 (2014): Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen

5 Energienachweis EN-5: Kühlung/Befeuchtung

Dies gilt insbesondere für ganzjährig betriebene Kälteanlagen. In jedem Fall sind Kälteanlagen bedarfsgerecht zu betreiben.

Anforderungen an die Kaltwassertemperaturen

Bei der Kälteerzeugung ist die Kaltwassertemperatur möglichst hoch zu wählen. Für Klimaanwendungen gelten folgende Werte nach SIA 382/1 (2014) (projektspezifisch sind auch höhere Temperaturen möglich):

- Kälteanwendungen ohne Entfeuchtung ab 14 °C
- Kälteanwendungen mit Teilentfeuchtung ab 10 °C
- Kälteanwendungen (Prozesskälte) mit kontrollierter Entfeuchtung ab 6 °C

(siehe auch Kapitel 6.2)

Für Spezialfälle mit tieferen Kaltwassertemperaturen (unter 6 °C) ist gemäss ChemRRV eine separate Anlage mit eigenem Temperaturniveau zu installieren. Bei einer Abhängigkeit der Kältelast von der Aussenlufttemperatur muss der Sollwert der Kaltwassertemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur angepasst werden können.

Bestimmung des Kältebedarfs

Der Einsatz von exakten Berechnungsverfahren und Simulationsprogrammen ist bei der Planung wichtig. Doch in der Phase Vorprojekt und Entwurf sind Erfahrungswerte und Benchmark-Zahlen (SIA 2024 Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik) für Konzeptoptimierungen besser geeignet.
Die SIA 382/2 (Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf) beschreibt die Anforderungen an Berechnungsverfahren zur Ermittlung des thermischen Leistungsbedarfs sowie des Heizwärme- und Klimakältebedarfs von Gebäuden. Die Norm behandelt ebenfalls die Berechnung des Leistungs- und Energiebedarfs auf Stufe Endenergie. Sie dient zur Optimierung klimatisierter und befeuchteter Gebäude. Die Norm wird ergänzt durch das Merkblatt SIA 2044, in dem das Standard-Berechnungsverfahren detailliert beschrieben ist.

Weitere wichtige Normen

Zu beachten sind auch die Normen SIA 384/201 (Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast) und SIA 380/1 (Heizwärmebedarf).
Zweck der Norm SIA 380/1 ist ein massvoller und wirtschaftlicher Einsatz von Energie für die Raumheizung in Gebäuden und ist koordiniert mit der MuKEn 2014 (Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich). Die Norm leistet damit einen Beitrag an eine ökologische Bauweise.

4.4 Vorgehen bei der Planung

Anforderungen an das System

Bei der Planung von Kälteerzeugung und Verteilung muss immer auch die warme Seite – Nutzung oder Abführen (Entsorgen) der anfallenden Wärme – berücksichtigt werden. Der optimale und wirtschaftlich sehr interessante Fall ist die Nutzung beider «Seiten».

Grundschema

Ausgangspunkt für die Planung ist das Grundschema der Kälte-(Wärme-)Versorgung. Im Idealfall steht die Maschine im Zentrum, die sowohl auf der «kalten Seite» (Energieaufnahme) als auch auf der «warmen Seite» (Energieabgabe) je einen Speicher bewirtschaftet. Das jeweilige Speichermanagement schaltet die Maschine ein – entweder «wärmegeführt» (Wärmebedarf) oder «kältegeführt» (Kältebedarf). Ist z. B. ein Kältebedarf durch entsprechende Messungen am Kühlmedium-Speicher gegeben und schaltet die Maschine dadurch ein, so ist sofort der Ladezustand des Heizmedium-Speichers zu überprüfen. Denn die Produktion der nachgefragten «Kälte» macht es zwingend notwendig, dass die anfallende Wärme abgeführt wird. Sobald der Heizmedium-Speicher einen gewissen Ladezustand erreicht hat (z. B. 80 %), muss ein «Zwangsverbraucher» zugeschaltet werden. Dies kann z. B. der Energieeintrag in das Erdsondenfeld sein oder das Abführen von Energie über Rückkühler an die Aussenluft (Entsorgen von Energie). Gleiches gilt umgekehrt: Wird die Maschine wärmegeführt eingeschaltet, so sind die notwendigen Energiequellen bereitzustellen (nebst Raumkühlung auch Grund-, See- oder Flusswasser, Erdsondenfeld oder andere).

Wenn kein Wärmebedarf besteht

Je nach Projekt kann es vorkommen, dass keine oder nur eine bescheidene Wärmenutzungsmöglichkeit besteht. In diesen Fällen kann auf den Wärmespeicher verzichtet und die anfallende Energie direkt an die Umwelt abgegeben werden. Es muss aber zwingend eine Schiebung der Verflüssigungstemperatur nach der Aussentemperatur vorgesehen werden. So kann während kühleren Zeiten (Frühjahr, Herbst, Winter) die Kondensationstemperatur reduziert, die Effizienz des Systems spürbar erhöht und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

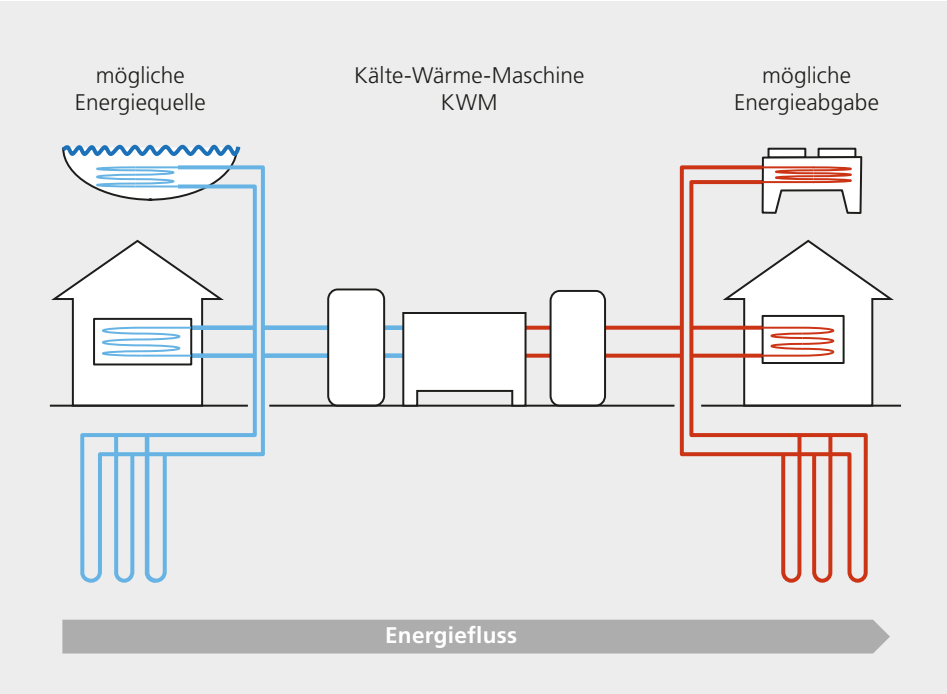


Bild 4.6: Gesamtsystem mit den Energiequellen, der Kälte-Wärme-Maschine und den Möglichkeiten, wie die Wärme abgegeben werden kann.

Checkliste: Konzeption
Punkte, über die sich der Planer und die Planerin im Konzept Gedanken machen sollen.

1. Zur Erzeugung

- ☐ Leistung (Kühlmedium, Heizmedium)
- ☐ Verfügbarkeit (Anforderungen an die Versorgungssicherheit)
- ☐ Aufteilung der Erzeugung auf mehrere Maschinen (mindestens mit getrennten Kreisläufen)
- ☐ Regelbereich der Maschine, Leistungsstufung
- ☐ Hydraulische Einbindung der Maschinen
- ☐ Hochlaufzeit $Q_{Kälte}$ der Kältemaschine von 0 % auf 100 %
- ☐ Maximale Temperaturtoleranz (Wärme-Kälte)
- ☐ Elektroanschluss, Trafo-Kapazität und EW-Vorschriften (Anlaufstrom)
- ☐ Bedingungen, Wünsche des Kunden
- ☐ Geologische Bedingungen (Erdsonden, Grundwasser)

2. Zu den Kälteverbrauchern

- ☐ Wird die Zuluft respektive Raumluft sensibel oder latent gekühlt?
- ☐ Erforderliche Kältekreis-Vorlauftemperatur (T_{KK-VL}), zulässige Temperaturtoleranz
- ☐ Anhebung der Kälteträger-Temperatur (Winter)
- ☐ Wie hoch ist die zu erwartende Kältekreislauf-Rücklauftemperatur (T_{KK-RL})
- ☐ Geforderte Kälteleistung, Klima beeinflusst: Grundlast, Tagesspitze, Nachtminimum, Wochenende
- ☐ Geforderte Kälteleistung (interne Last, Winterkühlung): Bandlast, Tagesspitze, Nachtminimum, Wochenende
- ☐ Maximal mögliche Speichergrösse
- ☐ Saisonale Speicherung mit Erdkoppelung (Erdsonden) geplant

3. Zu den Wärmeverbrauchern

- ☐ Erforderliche Heizungsvorlauftemperatur (T_{WK-VL}), zulässige Temperaturtoleranz
- ☐ Absenkung der HW-Temperatur (Sommer)
- ☐ Wie tief ist die zu erwartende Rücklauftemperatur (T_{WK-RL})
- ☐ Wärmenutzung klären (Trinkwassererwärmung, Spitzenleistung, Tagesbedarf, Grundlast)
- ☐ Geforderte Heizleistung
- ☐ Geforderte Heizleistung klimabeinflusst: Tagesspitze, Nachtminimum, Wochenende
- ☐ Maximal mögliche Speichergrösse
- ☐ Saisonale Speicherung mit Erdkoppelung (Erdsonden) prüfen
- ☐ Wird die Zuluft vor- oder nachgewärmt?

Hinweise zur Hydraulik

Die Hydraulik ist so einfach wie möglich zu konzipieren. Stark verhängte Systeme und komplizierte Klappenumstellungen sind möglichst zu vermeiden. Wenn notwendig, ist die Hydraulik mittels eines Wärmeübertragers zu trennen.

- Die Hydraulik ist so zu planen, dass jederzeit Kontrollmessungen der Temperaturen und des Volumenstroms möglich sind; bei der Durchflussmessung genügt oft eine Temporärmessung, vor allem bei Systemen mit konstantem Volumenstrom. Eine entsprechende Messstrecke ist dabei zu berücksichtigen.
- Für die Druckmessung respektive Differenzdruckmessung sind entsprechende Messeinrichtungen einzubauen (z. B. Twinlock Messnippel): So können die Pumpen von extern überprüft und der Betrieb optimiert werden.
- Bei variablem Volumenstrom im Verdampfer- beziehungsweise Verflüssigerkreislauf sind die Vorgaben des Maschinenlieferanten einzuhalten.
- Um im Störungsfall eine allfällige Überhitzung des Verdampfer- beziehungsweise des Verflüssigerkreislaufes bei einer Beimisch-Schaltung zu verhindern, empfiehlt es sich, eine entsprechende Sicherheitsschaltung vorzusehen (Fall: Kältemaschine «Aus«, Pumpe «Ein», Mischventil bleibt in der Umlenkstellung «hängen»).
- Behandeltes Wasser (nach SWKI BT102) verwenden

Einbindung der Kältemaschine

Mit der Beimisch-Schaltung können die zulässigen Temperaturgrenzwerte sowohl auf der Verdampferseite (maximale Eintrittstemperatur), als auch auf der Verflüssigerseite (minimale Eintrittstemperatur) entsprechend eingehalten und Störungen vermieden werden (siehe dazu auch Kapitel 8.3).

Werden auf beiden Seiten (Kühl- und Heizmedium) Schichtspeicher eingesetzt, so müssen die (warmen wie kalten) Medien, die in diese Speicher eingebracht werden, zwingend die Auslegungstemperatur aufweisen. Ist dies nicht der Fall, so kann nicht nur die Temperaturschichtung – und damit die Speicherkapazität – beeinträchtigt werden, sondern auch die Temperaturmessung für die Maschinensteuerung beziehungsweise die Rangfolgeschaltung der Maschinen. Je nach Einbringung des Mediums in den Speicher kann es zu starken Temperaturschwankungen und dadurch zu Fehlfunktionen kommen (siehe dazu Kapitel 8.6).

Sowohl auf der Erzeuger- als auch auf der Verbraucherseite ist es wichtig, dass die Temperaturen möglichst gut eingehalten werden. Die hydraulische Einbindung der Verbraucher ist sorgfältig zu planen und die Volumenströme mit den zugehörigen Differenzdrücken sind bei der Inbetriebsetzung lückenlos einzuregulieren.

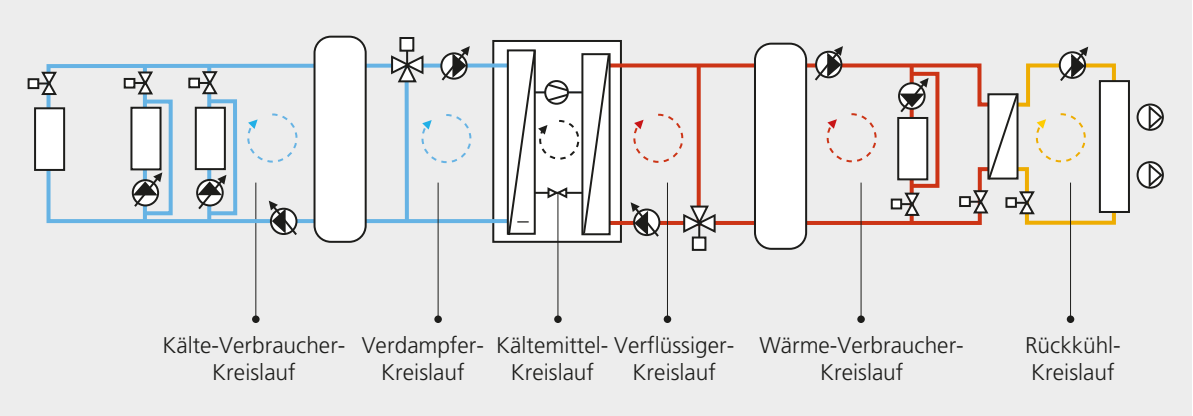


Bild 4.7: Überblick Gesamtsystem mit den verschiedenen Kreisläufen.

Schallminderungsmassnahmen
Bei der Planung von Kälte-Wärme-Maschinen ist eine sorgfältige Beurteilung der Schallemissionen erforderlich. Lärmminderungsmassnahmen, die früh im Planungsprozess berücksichtigt werden, verursachen die geringsten zusätzlichen Kosten. Nachträgliche Massnahmen verursachen oft einen extrem hohen Zusatzaufwand und entsprechende Umtriebe.

Schallemissionen
Luftschall: Für den Erzeuger ist ein schalldämmendes Gehäuse vorzusehen, bei Grossanlagen ist eine schalldämmende Abkapselung respektive die schalldämmende Verkleidung des Raumes nötig. Spezielle Aufmerksamkeit braucht es bei den Rückkühlern. Jeder Verdichter muss über eine eigene Freigabe verfügen. So wird es möglich, in Sommernächten – mit reduziertem Rückkühlbedarf – alle Rückkühler zu betreiben. In diesem Fall werden die Rückkühl-Ventilatoren mit einer geringen Drehzahl betrieben, was den Schallleistungspegel erheblich reduziert. Die Anlage arbeitet so «geräuscharm».
Im Extremfall sind Rückkühlwerke in einem Technikraum vorzusehen, mit Kulissenschalldämpfern für die Lufteintritts- und Luftaustrittsöffnungen.

Körperschall: Der Körperschall kann durch konsequenten Einsatz von flexiblen Anschlüssen (Schläuche, Kompensatoren, elastische Manschetten, flexible elektrische Anschlüsse) verhindert werden. Nötig ist eine Schwingungsminderung des Erzeugers durch Einsatz von Schwingungsdämpfern zwischen Maschine und Sockel oder zwischen Sockel und Betonboden.

Planungsablauf nach SIA-Phasen
Während des Planungsprozesses werden, wie in Bild 4.8 dargestellt, in verschiedenen Schritten oder Phasen Abklärungen getätigt, Daten erfasst, Konzepte erstellt und Entscheidungen getroffen. In der Phasenbeschreibung werden die kältespezifischen Punkte hervorgehoben, grundsätzlich sind aber die in SIA-Regularien festgehaltenen Planungsleistungen zu erbringen.

Phase 31 Vorprojekt
- Grundsatzentscheid zu Kühlung
- Erfassung der Bedürfnisse (Nutzung, Prozess, andere Gewerke, Architektur etc.)
- Konzepterarbeitung: Kühlung und Heizung als System betrachten
- Systemwahl und mögliche Systemtemperaturen
- Grobleistungen (erste Berechnungen)
- Abschätzen der Technikflächen (Raumgrössen)
- Vorgespräche mit den Behörden bezüglich Bewilligungsfähigkeit des Konzeptes
- Grobkostenschätzung Investitions- und Betriebskosten

Phase 32 Bauprojekt
- Zusammenstellen der Leistungsdaten (Der Kältebedarf ist oft schwer zu bestimmen – wichtig ist darum eine transparente Dokumentation.)
- Einbringung der Komponenten sicherstellen (Installation, Revision, Ersatz)
- Systemtemperaturen und (Kälte-)Leistungen genau bestimmen
- Messkonzept erstellen (auch im Hinblick auf die Abnahmemessungen und Betriebsoptimierung)
- Grobfunktionen definieren
- Behördliche Nachweise erarbeiten (Energie, Schall, Brandschutz, usw.)
- Kostenvoranschlag

Phase 33 Bewilligungsverfahren / Auflageprojekt
- Eingaben an Behörden: Bewilligungen können – wie die Erfahrung zeigt – für das ganze Projekt massgebend sein: «Kühlbewilligung» (EN-5 Energienachweis), Be- und Entlüftung von Technikzentralen, Entrauchungen, Fluchtwege und Brandschutzauflagen, Revisionszugänge etc.

Phase 4 Ausschreibung
- Behördenauflagen einarbeiten
- Funktionsbeschreibung
- Detaillierte Maschinenspezifikation mit mindestens zwei Betriebszuständen
- Leistungsverzeichnis für Offertanfragen
- Ausschreibung, Offertvergleich, Vergabeantrag

Phase 51 Ausführungsplanung
- Koordinationssitzung mit dem Kältemaschinen-Lieferanten und dem GA-Lieferanten, bei der die Kommunikation (Datenschnittstellen) festgelegt werden.
- Werksnachweise einholen
- Ausführungsplanung auf der Basis der Lieferanten- und Unternehmerangaben
- Steuerungs- und Regulierungsbeschreibung prüfen bzw. ergänzen

Phase 52 Ausführung/Fachbauleitung
- Werksabnahmen durchführen (wenn notwendig)
- Vollständigkeitskontrolle Hydraulik
- Kontrolle Sicherheitseinrichtungen
- Planung Inbetriebsetzung

Phase 53 Inbetriebnahme, Abschluss
- Leistungsnachweise und Dokumentation
- Inbetriebsetzung: Abstimmung mit dem Kältemaschinen- und GA-Lieferanten
- Abnahme. Bei der Abnahme die klimatischen Bedingungen berücksichtigen (Aussentemperaturen)
- Leistungsüberprüfung mit Funktionsnachweis, Nachjustierung (wird empfohlen)
- Offerte für Betriebsoptimierung unterbreiten (Phase 6)
- Meldung der Anlage beim BAFU (siehe Seite 57)

Bild 4.8: SIA-Phasenbeschreibung mit einigen Hinweisen zu Punkten, die bei einer Klimakälteanlage speziell zu beachten sind.

4.5 Häufige Stolpersteine bei der Planung

In der Praxis stolpern die Planer immer wieder über ähnliche Punkte. Einige Beispiele, was bei der Planung zu beachten ist:

- Aufstellung, Kältemittelüberwachung und Lüftung (Sturmlüftung, Einhausung der Maschinen) sind abhängig von der Art des Kältemittels (z. B. NH_3 oder R134a).
- Die Kältemittelmenge beeinflusst den Volumenstrom der mechanischen Lüftung (Richtlinie SN EN 378 beachten).
- Kältemaschinen mit synthetischen Kältemitteln dürfen nur unter bestimmten Voraussetzungen eingesetzt werden (siehe ChemRRV und Kältemittel-Fibel von EnergieSchweiz).
- Die elektrischen Anschlussdaten haben einen Einfluss auf die Elektroinstallation (Anschlusswert, Einspeisung, Anlaufstrom, Blindstrom, Sperrzeiten usw.). Dies hat Auswirkungen auf den Leistungstarif (hohe Anlaufströme der Verdichtermotoren) und so auch auf die Stromkosten.
  Zu klären ist, ob das Stromnetz (d. h. die Gebäude-Zuleitung) genügend Leistung liefern kann.
- Zu beachten sind Abmessungen, Anschlussart und Anzahl der Anschlüsse auf der Heiz- wie auch auf der Kühlmediumseite (z. B. ein oder zwei Verflüssiger).
- Das Gewicht der Bauteile beeinflusst die Aufstellung, Einbringung und Anschlussdimensionen.
- In der Regulierungs-Philosophie und der Schnittstellen-Lösung bestehen grosse Unterschiede bei den Herstellern – die Möglichkeiten und die verfügbaren Regulierungsbereiche können sehr unterschiedlich sein. Eine klare Funktionsbeschreibung ist daher unumgänglich. Grundsätzlich sollten die Maschinensteuerung und wenn möglich auch die Speicherbewirtschaftung vom Maschinenlieferanten stammen. Nicht alle Maschinenlieferanten bieten dies jedoch an.
- Die variablen Volumenströme über die Maschine sind – je nach hydraulischer Einbindung der Maschine – möglich, müssen aber mit dem Maschinenlieferanten abgesprochen werden. Auch hier helfen eine klare Funktionsbeschreibung und ein hydraulisches Schema mit Leistungsangaben.
- Der Regulierungsbereich der Kältemaschine beeinflusst die Dimensionierung des Kältespeichers. Bei einer Kältemaschine mit Ein- und Ausschaltung muss der Speicher viel grösser sein als bei einer Kältemaschine mit einem variablen Regulierungsbereich zwischen 20 % und 100 % oder einer mehrstufigen Erzeugung beziehungsweise bei mehreren Maschinen.
- Wird die Verflüssigungs-Temperatur für das Trinkwarmwasser temporär angehoben, ist die hydraulische Einbindung der Speicher genau zu beachten. Es ist möglich, dass die Heizmedium-Temperatur im Speicher beeinflusst wird und damit Temperaturschwankungen im Heizungsvorlauf unvermeidlich sind.
- Bei einer abnahmepflichtigen Anlage fallen im Betrieb zusätzliche Kosten für die regelmässigen Kontrollen an.
- Es braucht ein Konzept für das Ein- und Ausbringen aller grossen Apparate und Komponenten (Kälte-Wärme-Maschinen, Speicher, Tauscher, Lüftungsgeräte usw.).

4.6 Vorgaben an die Lieferanten

Damit sich der Lieferant des Kälteerzeugers ein Bild von der Gesamtanlage machen kann, braucht er vom HLK-Planer eine Beschreibung der Anlage. Dabei sollen die Ziele des Planers und des Bauherrn vermittelt werden. Folgende Informationen werden benötigt:

Schema
Vollständiges Schema mit den geplanten Medien-Temperaturen (Vor- und Rücklauf) sowie den hydraulischen Verknüpfungen mit eingetragenen Leistungsmerkmalen.

Auslegungsdaten
Winter- und Sommer-Auslegetemperatur, allfällige Sollwertschiebungen, detaillierte Zusammenstellung der Leistungen und Lastverläufe.

Zulieferung Energieträger, Lagerung
Gibt es verfügbare erneuerbare Energien wie Aussenluft, Erdsonden, See-, Fluss- und Grundwassernutzung?
Stehen für höhere Temperaturniveaus Holzschnitzel oder -pellets sowie Bio-, Erd- oder Flüssiggas zur Verfügung?
Wie sieht es aus mit der Heizöltankanlage und der elektrischen Versorgung?

Beispiel: Festlegung der Temperaturen
- 75 °C: Hochtemperatur für Trinkwarmwasser-Nachwärmung, Heizung Nebengebäude, Bestand (spätere Reduzierung auf 65 °C)
- 30 °C – 38 °C: Niedertemperatur für thermoaktives Bauteilsystem, Heiz-Kühl-Decken, Lufterhitzer RLT-Anlagen, Umluftheizer, Trinkwarmwasser-Vorwärmung
- 14 °C – 18 °C: Klimakälte für thermoaktives Bauteilsystem, Heiz-Kühl-Decken, Luftkühler RLT-Anlagen, Umluftkühler
- 6 °C – 10 °C: Prozesskälte für medizinische Grossgeräte, Entfeuchter RLT-Anlagen, Bestand, Klimaschränke

Kälte-Wärme-Erzeugung
Detaillierte Zusammenstellung der Leistungen mit erforderlichen Temperaturen, Lastverläufen, Verfügbarkeit, Redundanzen etc.

Kälteverteilung
Kühlsysteme wie Kühl-Heiz-Decken, Deckensegel, aktive Kühlpaneele beziehungsweise Kühlbalken, TABS, Gruppeneinteilung und Regulierung

Wärmeverteilung
Wärmeabgabesysteme wie Boden- und Wandheizungen, Heiz-Kühl-Decken, Konvektoren, Heizwände, TABS (thermoaktives Bauteilsystem), Gruppeneinteilung und Regulierung

MSR, GA, Speichermanagement
Alle Anlagen und Baugruppen sollen für einen einwandfreien und sicheren Betrieb mit Einrichtungen zum Messen, Steuern, Regulieren und Überwachen ausgestattet sein. Die projektspezifisch angepassten Programme sollen auch externe Systemkomponenten einbinden und somit die ganzheitliche Regulierung und Überwachung des gesamten Erzeugersystems inklusive Speicherbewirtschaftung sicherstellen. Dazu ist eine Anbindung an die Gebäudeautomation notwendig.

Funktionale Ausschreibung von Anlagen oder Anlagenteilen
Bei einer funktionalen Ausschreibung, die meist für kleinere Systeme angewendet wird, werden «lediglich» die Ziele beziehungsweise Leistungen der Anlage oder einer Anlagenkomponente bei gegebenen Bedingungen festgelegt. So kann man sich bei der Präzisierung und Konkretisierung der Anlage auf das Wissen, die Kreativität und die Erfahrungen der Anbieter stützen. Nachteilig ist, dass der Vergleich verschiedener Angebote anspruchsvoll ist. Abhängig von der Dokumentation sind die Offerten nicht oder nur schwer vergleichbar. Besonders bei Gesamtleistungen, bei kleineren ganzheitlichen Anlagen auf der Suche nach neuen Lösungen, kann die funktionale Ausschreibung eine gute Lösung sein. Zurückhaltung ist angezeigt bei kom-

plexen Werkleistungen mit grossem Änderungspotenzial.

Zu definierende Funktionen bei einer Kälteerzeugung oder Wärmepumpe
Mit einem klar definierten Messkonzept sowie der Auswertung der Energie- und Medienmessungen hat der Lieferant der Anlage folgende Hauptfunktionen nachzuweisen beziehungsweise zu etablieren:

- Aussagekräftige Kennzahlen zur Erfüllung von Garantiewerten
- Bereitstellen von Daten für die energetische Betriebsoptimierung (BO)
- Trendaufzeichnungen zur Früherkennung von Fehlfunktionen
- Grundlagen für Verbrauchsprognosen und Budgetierung
- Nachweis der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften (z. B. Energiegesetz)

In der funktionalen Ausschreibung sind die Rahmenbedingungen und die zu erfüllenden Zielsetzungen klar zu umschreiben und als Grundlage auch in den Werkvertrag aufzunehmen.

Technische Daten einer Kälte-Wärme-Maschine
Damit die Qualität einer Kälte-Wärme-Maschine beurteilt werden kann, benötigt der Planer detaillierte Angaben. Diese betreffen den Kältebetrieb, die Wärmenutzung, den Teillastbetrieb, die Regulierbarkeit, Angaben zum Kältemittel und der Füllmenge und Angaben zum Schall (oder zur Schallleistung). Bild 4.9 zeigt die wichtigsten Daten, die ein Planer für eine seriöse Beurteilung benötigt.

Kältebetrieb mit offenem Verdunstungsrückkühler und einem Verflüssiger

Kälteleistung $\dot{Q}_{Kälte}$	300 kW
Verflüssigerleistung $\dot{Q}_{Wärme}$	379 kW
Leistungsaufnahme P_{el}	79 kW
$COP_{Kälte}$ – Volllast	3,8
Kaltwasser Eintritt	14 °C
Kaltwasser Austritt	8 °C
Kaltwasser Durchflussmenge	43,1 m³/h
Kaltwasser Glykolanteil	0 %
Druckverlust Verdampfer	27 kPa
Rückkühlwasser Eintritt	34 °C
Rückkühlwasser Austritt	40 °C
Rückkühlwasser Durchfluss	57,5 m³/h
Rückkühlwasser Glykolanteil	35 %
Druckverlust Verflüssiger	25 kPa

Teillastdaten $COP_{Kälte}$ und ESEER
mit konstanter Kaltwassertemperatur von 8 °C und abgesenkter Temperatur am Verflüssiger Eintritt (T_{EW}).

Last	T_{WE}	$\dot{Q}_{Kälte}$	P_{el}	$COP_{Kälte}$	ESEER	
%	°C	kW	kW		%	
100	30	300	79	3,8	3	0,1
75	26	225	41	5,5	33	1,8
50	22	150	16	9,4	41	3,8
25	18	75	7	10,7	23	2,5
ESEER						8,2

Leistungsregulierung Wärmenutzungs-Betrieb bezogen auf die Kälteleistung

Stufenlos von	70 % bis 100 %
Minimale Leistung $\dot{Q}_{Kälte}$ bei	~180 kW

Leistungsregelung Kältebetrieb

Stufenlos von	25 % bis 100 %
Anzahl Verflüssiger	1 Stück
Anzahl Verdampfer	1 Stück
Foulingfaktor Tauscher	0,044 m² K/kW
Anzahl Verdichter (ölfreier Turbo-Verdichter)	1 Stück
Spannung-Phasen-Frequenz	400-3-50
Nennstrom	max. 145 A
Anlaufstrom	5 A
Kältemittelkreise	1 Stück
Kältemittel Art/Menge	R134a/70 kg
Betriebsgewicht	1500 kg
Länge	1900 mm
Breite	1100 mm
Höhe	1900 mm
Schalldruck	72 dB(A)
Schallleistungspegel	81 dB(A)

Bild 4.9: Technische Daten, die man benötigt, um eine Kälte-Wärme-Maschine beurteilen zu können (Beispiel).

4.7 Was ist bei Inbetriebsetzung und Abnahme zu beachten?

Meldepflicht

Wer eine stationäre Anlage in Betrieb nimmt (oder ausser Betrieb setzt), die mehr als 3 kg Kältemittel enthält, muss dies dem BAFU melden. Bei neuen Anlagen muss die vom BAFU mitgeteilte Anlage-Nummer mit einer Vignette sichtbar, leicht lesbar und dauerhaft auf der Anlage angebracht werden.

Integrierte Tests (Funktionstests)

Nach der Inbetriebsetzung der Anlagen sind integrierte Tests (Funktionstests) jedes Gewerkes einzeln sowie gewerkübergreifend nach einem Testplan durchzuführen und zu protokollieren.

Folgende Kontrollpunkte sind zu prüfen:

- Prinzipschema mit Leistungs- und Temperaturangaben
- Dimensionierung und wesentliche Leistungsmerkmale von Trinkwassererwärmern, Speichern, Erdsondenfelder, Pumpen etc.
- Konzept Verfügbarkeit (Betriebssicherheit, Redundanz etc.)
- Funktions- und Regulierungsbeschreibung: Steuerung der Anlagen, Überwachung, Sicherheit etc.
- Protokoll Wasserqualitäten im Leitungsnetz
- Unterhaltskonzept: Überprüfen der Zugänglichkeit der Anlagen, Wartungsmassnahmen etc.
- Leistungsnachweise (Vorbehalt in Abnahmeprotokoll aufnehmen, dass die Leistungsfähigkeit bei entsprechenden Aussenbedingungen nachgewiesen werden muss).

Das Einhalten der spezifizierten Leistungsdaten der verschiedenen gebäudetechnischen Einrichtungen ist unter realen Betriebsbedingungen nachzuweisen. Mit den Funktionsmessungen soll nachgewiesen werden, dass die einzelnen Kompo-

Messgrösse	Toleranz vom Sollwert	Art der Abweichung	
		relativ	absolut
Luftvolumenstrom			
• beim versorgten Raum	± 15 %	X	
• bei jeder Anlage und jedem Hauptversorgungsstrang	± 10 %	X	
Zulufttemperatur	± 1,0 K		X
Raumlufttemperatur	± 1,0 K		X
Raumluftgeschwindigkeit ($V_{50\%}$)	± 15 %	X	
Relative Raumluftfeuchte	± 15 %	X	
Druckdifferenz	± 10 %	X	
Elektrische Stromaufnahme	±5 %	X	
Elektrische Leistungsaufnahme	± 10 %	X	
Elektrische Spannung	± 5 %	X	
Wassertemperatur	± 1,0 K		X
Massenstrom von Flüssigkeiten	± 10 %	X	
Wärme- und Kälteleistung	± 15 %	X	
Energieäquivalenter Dauerschallpegel und Beurteilungspegel	1)		X

1) Es gelten die Bestimmungen von SIA 181 (ganzzahlige Angabe, keine Toleranz, Wiederholung der Messungen bis zum Erreichen gesicherter Werte)

Beispiel: Sollwert für die Raumluftfeuchte = 40 % r. F.
Relative Toleranz vom Sollwert ± 15 %
Toleranzbereich 34 % bis 46 % r. F.
Bei einem Messwert zwischen 34 % und 46 % r. F. sind die Abnahmebedingungen erfüllt.

Bild 4.10: Toleranzen der Messgrössen. (Quelle: SIA 382/1 (2014))

nenten und die Anlage als Ganzes die vereinbarten Sollwerte erreichen. Die Funktionsmessungen können in den meisten Fällen nicht bei den Auslegungsbedingungen durchgeführt werden. Die während der Kontrollmessungen herrschenden Aussenbedingungen müssen daher immer registriert werden. Bei der Messung lastabhängiger Grössen ist ein möglichst stationärer Betrieb anzustreben (z. B. alle Türen und Fenster sind während der Funktionsmessungen geschlossen zu halten).

Abnahmebedingungen
Die Abnahmebedingungen sind erfüllt, wenn die Messwerte im vereinbarten Toleranzbereich des Sollwertes liegen. Wenn nichts anderes vereinbart wurde, gelten die Anforderungen in SN EN 12599 mit den Toleranzen der Messgrössen (siehe SIA 382/1 (2014): Tab. 27 Toleranzen der Messgrössen). Es müssen alle vereinbarten Anforderungen gleichzeitig erfüllt sein.

Inbetriebsetzung
Die Inbetriebsetzung hat gemäss den Vorgaben in SIA 378/4 zu erfolgen. Insbesondere wird die messtechnische Überprüfung mit zugehörigen Berechnungen und Protokollierung folgender Leistungsdaten verlangt:

- Nachweis, dass der hydraulische Abgleich gemacht wurde
- Leistungszahl ($COP_{Wärme}$) und Leistung von Wärmepumpensystemen
- Leistungszahl ($COP_{Kälte}$) und Leistung von Kältemaschinen
- Wassermengen von hydraulischen Systemen

Es ist sinnvoll, den Betreiber während den Tests erstmals zu instruieren und die notwendigen Dokumente zur Verfügung zu stellen. Anschliessend müssen alle Betreiber geschult werden. Die Schulung erfolgt auf der Basis einer umfassenden Anlagendokumentation. Im Anschluss an die Tests und die Betreiberinstruktionen erfolgt die Vorabnahme und Mängelbehebung.

Integrale Tests (vernetzte Funktionen)
Mit integralen Tests werden die vernetzten Funktionen der gebäude- und sicherheitstechnischen Anlagen sowie das Funktionieren des Gesamtsystems geprüft (z. B. Blackout-Test). Zudem werden Schwachstellen aufgezeigt. Dieser Test erfolgt auf der Basis des Merkblattes SIA 2046. Dabei ist es wichtig, dass vor dem Test die Durchführungsbestimmungen erfüllt sind.

Nachinstruktionen
Für die Betreiber wird mindestens eine Nachschulung (z. B. nach einem halben Jahr) durchgeführt.

Nachjustierung
Es empfiehlt sich, nach 300 Betriebsstunden eine Nacheinstellung und Anlageüberprüfung vorzunehmen. Dies wird sinnvollerweise als Auftragsbestandteil im Werkvertrag vereinbart.

Erfolgskontrolle
Da die Abnahmemessungen nicht bei Auslegungszuständen gemacht werden können, kann mittels einer Erfolgskontrolle nachgewiesen werden, dass die Anlage auch bei den (angenäherten) Auslegungszuständen ihre Leistung erbringt. Der Entscheid über die Durchführung einer Erfolgskontrolle wird fallweise zwischen der Bauherrschaft und dem Planer abgesprochen und zumindest teilweise separat beauftragt. Während der Erfolgskontrolle aufgedeckte Mängel sind Teil der Garantieleistungen und als verdeckte Mängel zu rügen. Die Erfolgskontrolle findet nach Inbetriebsetzung, Abnahme und Mängelbehebung in einer Zeitspanne von ein bis zwei Jahren statt.
Die Erfolgskontrolle verfolgt Ziele wie:

- Mängelfreier Betrieb
- Nachweis der korrekten Funktion der Anlagen unter realen Betriebsbedingungen (Sommer, Winter, Übergangszeit).
- Messen ESEER bei der Kältemaschine und die JAZ (Jahresarbeitszahl) bei der Wärmepumpe

Oft wird eine Erfolgskontrolle zusammen mit einer Betriebsoptimierung beauftragt.

4.8 Wartung und Instandhaltung der Klimakälteanlage

Betriebsoptimierung
Eine Betriebsoptimierung (BO) erfolgt fallweise nach Absprache zwischen der Bauherrschaft und dem Planer (oder einer externen Institution) und wird separat beauftragt. Betriebsoptimierungen sollten auf dem Merkblatt SIA 2048 Energetische Betriebsoptimierung basieren. Startet eine BO unmittelbar nach der Abnahme, so gelten aufgedeckte Mängel als Teil der Garantieleistungen und müssen als verdeckte Mängel gerügt werden.
Die BO wird nach Inbetriebsetzung, Abnahme, Mängelbehebung und Erfolgskontrolle in den ersten zwei Jahren durchgeführt. Im dritten Jahr findet typischerweise die Erfolgskontrolle der Betriebsoptimierungsmassnahmen statt.
Die Betriebsoptimierung verfolgt die Ziele:
- Anpassen des Anlagenbetriebes an die effektive Nutzung
- Minimierung des Energieverbrauchs und der Betriebskosten

Wartung
Die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung ChemRRV schreibt vor, dass Inhaber von Geräten und Anlagen mit mehr als 3 kg Kältemittel ein Wartungsheft führen müssen. Darin muss die Fachperson, welche die Wartungsarbeiten durchführt, nach der Wartung und nach jedem Eingriff die notwendigen Angaben eintragen.

Dichtigkeitsprüfung
Alle Klimakälteanlagen mit mehr als 3 kg in der Luft stabilem Kältemitteln sind regelmässig, mindestens aber bei jedem Eingriff und bei jeder Wartung, auf ihre Dichtigkeit hin zu überprüfen. (Details siehe Vertiefung 7 Kältemittel-Ersatz und Dichtigkeit Seite 206).

Meldepflicht
Klimakälteanlagen mit mehr als 3 kg Kältemitteln müssen bei der Inbetrieb- und der Ausserbetriebnahme dem BAFU gemeldet werden (www.bafu.admin.ch/mel-dung-kw).

Technische Überwachung
Bei Anlagen ab 25 kg Kältemittelfüllung pro Kreislauf bedarf es zur Früherkennung von Leckagen einer technischen Überwachung der Umgebungsluft mit automatischer Alarmvorrichtung. Überwacht wird zumindest der Maschinenraum und bei Aussenaufstellung oder Aufstellung auf dem Dach die Innenluft des Anlagengehäuses. Auf eine technische Überwachung der luftgekühlten Verflüssiger kann verzichtet werden. Für die Sicherheit von Personen macht die SN EN 378-3 zusätzliche Vorgaben.
Speziell die Dichtheit der Sicherheitsventile sollte überwacht werden. Bei grösseren Kältemittelinhalten empfiehlt sich der Einsatz von Berstscheiben oder zumindest der Einbau von Ölfallen (siehe SN EN 378-2).
(aus BAFU: uv-1726-d)

Kältemittel: Nachfüllen und Ersatz
Bestehende Anlagen dürfen weiterbetrieben werden, auch wenn sie ein Kältemittel enthalten, das nicht mehr nachgefüllt werden darf (z. B. R22). Bei einem Kältemittelverlust (z. B. durch ein Leck) muss das Kältemittel jedoch vollständig zurückgewonnen und durch ein erlaubtes ersetzt werden.
Dabei muss gut geprüft werden, ob sich ein Umrüsten des Kältekreises auf ein neues, geeignetes Ersatzkältemittel tatsächlich lohnt. Dies gilt auch beim Umbau der Anlage (z. B. Verdichterersatz). (Details siehe Vertiefung 7, Seite 206).

Faustregel Kältemittelersatz:
Bei Kaltwassersätzen, die älter als 10 Jahre sind und Klimaanlagen mit einer Kälteleistung mit weniger als 80 kW immer einen Anlageersatz prüfen.

Exkurs

Bauen ohne Kühlung – was ist zu beachten?

Um das Innenraumklima angenehm zu halten und das Gebäude vor Sommerhitze zu schützen, gibt es zwei unterschiedliche Strategien:

- Durch bauliche Massnahmen verhindern, dass sich das Gebäude stark erhitzt.
- Die vorhandene Wärme mit technischen Massnahmen abführen beziehungsweise den Luftaustausch in den Räumen optimal regeln. Hier handelt es sich in der Regel um Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die in vielen Neubauten (Minergie-Gebäude, Gewerbeliegenschaften, Spitäler usw.) Standard sind.

Dämmung und Farbwahl

Im Neubau wie auch im Bestandsgebäude ist Dämmung eine wichtige Massnahme, um das Gebäude vor starker Erwärmung zu schützen. Für eine gute Wärmedämmung im Winter wird ein Material mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit benötigt. Für das Abhalten der Sommerhitze ist ein Dämmstoff mit möglichst geringer Wärmespeicherfähigkeit gefragt. Dämmstoffe sollten daher beide Eigenschaften vereinen. Auch die Fassadenfarbe wirkt sich auf die Temperaturen im Hausinneren aus: Helle Farben reflektieren das Sonnenlicht stärker und heizen sich demnach nicht so stark auf wie dunklere Farbtöne. Gute Dämmung bedeutet aber nicht, dass keine Kühlung nötig ist. Bei erhöhter interner Wärmeabgabe durch die Nutzung kann eine gute Wärmedämmung zudem kontraproduktiv sein. Daher leistet eine gute bauphysikalische Beratung zur Wahl und Bauweise der Gebäudedämmung einen wesentlichen Beitrag zum Hitze- und Kälteschutz.

Fenster und Beschattung

Grösse, Lage, Art und Anzahl der Fenster sollten in Kombination mit Verschattungseinrichtungen optimiert und in ein wirkungsvolles Hitzeschutzkonzept miteinbezogen werden. Gegebenenfalls ist es sinnvoll, den Anteil der Fensterflächen zu begrenzen oder auf grosse Fensterfronten zu verzichten. Auch für bestehende Gebäude gibt es ein breites Angebot an Verschattungsmassnahmen und -elementen wie beispielsweise flexible Roll-, Klapp- oder Schiebeläden, Jalousien oder Markisen. Aussen angebrachte Verschattungsvorrichtungen sind deutlich effektiver, weil so die Sonneneinstrahlung nicht direkt auf das Fensterglas trifft. Eine Alternative bieten speziell getönte Fenster (Sonnenschutzglas) oder Fenster mit einer Sonnenschutzfolie – diese lassen jedoch auch weniger Licht ins Haus. Eine innen liegende Beschattung hält weniger Wärme ab und ist nur als Blendschutz zu empfehlen.

Check-Punkte

Zusammenfassend sind folgende Punkte zu beachten:

- Anzahl, Grösse und Ausrichtung der Fenster optimieren und mit Verschattungselementen versehen
- Möglichst keine Bodenversiegelung in der Gebäudeumgebung anstreben
- Bäume sind natürliche Schattenspender auf dem Grundstück (mit dem Risiko der ungewollten Verschattung des Gebäudes auf Kosten der Helligkeit).
- Richtige Wahl des Dämmmaterials für Dach und Fassaden
- Natürliche Baumaterialien nutzen
- Helle Fassadenfarben
- Gründächer (Regenwasser-Retention und Hitzeschutz)
- Begrünung der Hausfassade prüfen
- Bei fixen Verschattungselementen Sonnenstand im Sommer und Winter beachten
- Automatisierte Nachtauskühlung prüfen (Schutz vor Wind und Wetter, Einbruchsschutz sicherstellen)
- Ist Nachtauskühlung keine Option, sollte zumindest eine Zuluftkühlung ins Auge gefasst werden.

Weitere Informationen sind in der SIA 180, Kapitel 5 «Wärmeschutz im Sommer» zu finden.

10 Merkpunkte zum Planen einer Klimakälte

1. Es ist oft schwierig, den Kältebedarf korrekt zu bestimmen – darum braucht es eine transparente, nachvollziehbare Dokumentierung, wie und mit welchen Annahmen der Kältebedarf ermittelt wurde.
2. Bei der Konzeption der Klimakälte wird immer auch die warme Seite miteinbezogen und eine sinnvolle Nutzung der Wärme angestrebt.
3. Mit einem sorgfältigen Messkonzept schaffen Planerinnen und Planer die nötigen Grundlagen für Garantieabnahme, Kontrolle der Planungsvorgaben sowie Energiecontrolling. Letzteres ist die Voraussetzung für eine Betriebsoptimierung.
4. Gute Klimakälteanlagen vermeiden tiefe Systemtemperaturen. Nur im Ausnahmefall – wenn die Luft entfeuchtet werden muss – sind Kaltwassertemperaturen von 10 °C oder weniger notwendig.
5. Für eine hohe Verfügbarkeit der Klimakälte müssen die Kältemaschinen sowie alle anderen Komponenten (z. B. der Rückkühler) miteinbezogen werden. Mit Blick auf das Gesamtsystem muss für jede Komponente eine individuelle Risikobetrachtung erstellt werden.
6. Der Erzeuger soll auf die tatsächlich erforderliche Leistung ausgelegt und nicht überdimensioniert werden. Die Kälteleistung wird bestimmt durch die äusseren und die inneren Kühllasten sowie durch latente (verborgene) Kühllasten.
7. Die Kältemaschine läuft zum grossen Teil im Teillastbereich. Bei der Beurteilung verschiedener Angebote müssen die Angaben zum Teillastverhalten dokumentiert und verglichen werden.
8. Den Themen wie Brennbarkeit (Kältemittel) oder Schall («Lärm» der Verdichter, Verflüssiger, Rückkühler) muss genügend Stellenwert eingeräumt werden.
9. Mit einer sorgfältigen Inbetriebnahme, einer Nachjustierung nach 300 Stunden und einer Betriebsoptimierung nach dem ersten Betriebsjahr wird die Basis für einen sparsamen und umweltfreundlichen Betrieb gelegt.
10. Mit einer geschickten Gebäudekonzeption sind sehr oft behagliche Raumklimata ohne aktive Kühlung – d. h. ohne Kälteanlagen – möglich.

Kapitel 5

Bauarten und Komponenten

Die Kältemaschine ist das Herz der Kälteanlage. Der Planer kennt die Parameter einer guten Anlage und kann dem Lieferanten entsprechende Vorgaben machen. Und er weiss, wie die Parameter nach der Inbetriebnahme kontrolliert werden. Der Planer ist aber nicht dafür zuständig, die einzelnen Komponenten der Kältemaschine zu definieren und auszulegen.

5.1 Der Kältekreis und seine Komponenten

Die wichtigsten Komponenten eines Kältekreises in einer Kompressions-Kältemaschine sind:

- der Verdichter
- die Wärmeübertrager
  - Verflüssiger
  - Verdampfer
- das Expansionsventil

Ergänzt wird das System durch weitere Komponenten wie Schauglas, Filter und Sammler.

Hinweis zu den Leitungen

Um bei einer Kältemaschine die Kälteverluste zu minimieren und eine Kondensation der Luftfeuchtigkeit an den kalten Leitungen zu vermeiden, muss die Saugleitung mit einer Kältedämmung versehen werden. Bei Maschinen mit Wärmenutzung ist zudem eine Wärmedämmung der Druckleitung und des Verflüssigers notwendig.

5.2 Verdichtertypen und ihre Funktion

Der Verdichter komprimiert das aus dem Verdampfer angesaugte Kältemittelgas auf den Druck, der zur Verflüssigung des Kältemittels notwendig ist. Für die Verdichtung werden unterschiedliche Technologien eingesetzt.
Die wichtigsten Verdichtertypen sind im Bild 5.2 zusammengestellt. Die eingefärbten Bauarten (Hubkolben, Scroll, Doppelschraube, Turbo) werden üblicherweise in der Klimakälte eingesetzt.

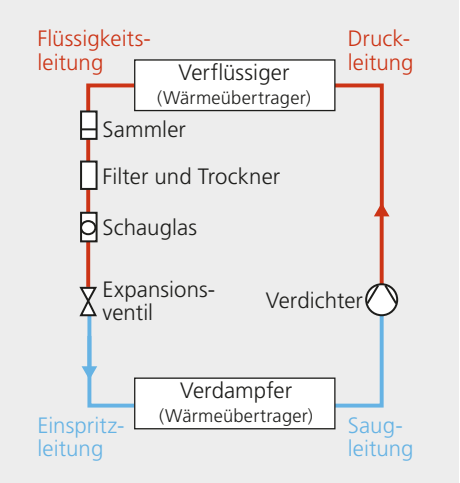


Bild 5.1:
Der Kältekreis und die wichtigsten Komponenten einer Kälteanlage mit Direktverdampfung und Direktverflüssigung.

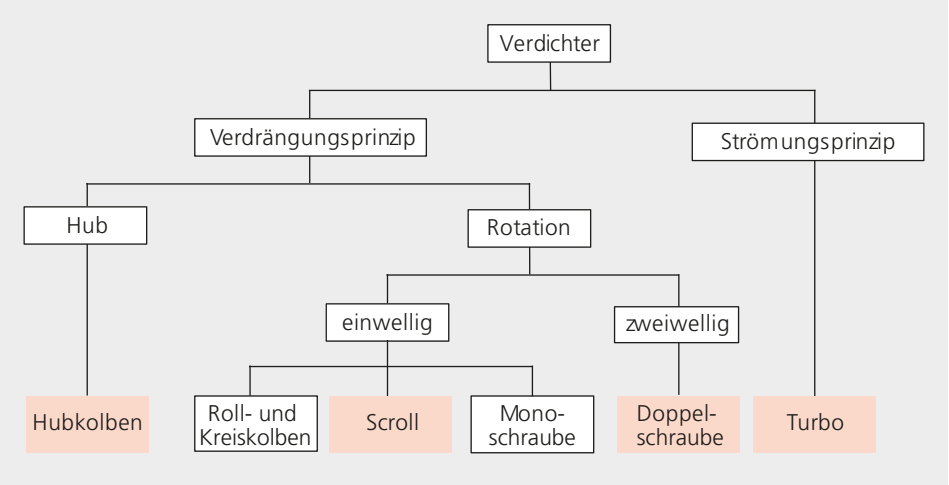


Bild 5.2:
Die Verdichter nach ihrem Arbeitsprinzip. Die farbig eingefärbten Verdichter trifft man in der Klimakälte am häufigsten an.

Hubkolben-Verdichter

Kolben-Verdichter sind universell einsetzbar und werden in der Klimakälte im kleinen bis mittelgrossen Leistungsbereich genutzt. Sie eignen sich auch für die Überwindung von grösseren Druckdifferenzen zwischen Verflüssigung und Verdampfung, wie sie zum Beispiel bei Wärmenutzungen für die Wassererwärmung entstehen. Zudem zeichnen sie sich durch gute Effizienz bei Volllast aus. Im Teillastbereich – mit reduzierter Leistung – sind sie mässig effizient.

Bild 5.3: Halbhermetischer Hubkolben-Verdichter. (Bild: Bitzer)

Scroll-Verdichter

Bei einem Scroll-Verdichter verengen zwei exzentrisch gelagerte Spiralen den Zwischenraum immer stärker. Das Kältemittel im Zwischenraum wird dadurch in die Mitte gedrückt und verdichtet.
Die Kälteleistung wird durch Zu- und Abschaltung von einzelnen Verdichtern gesteuert (Mehrverdichtermaschine). Kältemaschinen mit Scroll-Verdichtern stellen eine preisgünstige Lösung im Leistungsbereich von 30 kW bis 300 kW Kälteleistung dar.

Bild 5.4: Hermetischer Scroll-Verdichter. (Bild: Emerson Climate Technologies GmbH)

Schrauben-Verdichter

Überwiegend wird ein so genannter Doppelschrauben-Verdichter verwendet. In einem Gehäuse befinden sich zwei parallel angeordnete, mechanisch zwangsgekoppelte Rotoren mit ineinandergreifender, schraubenförmiger Verzahnung. Der freie Raum zwischen den Schraubenflanken wird in Förderrichtung immer kleiner, wodurch Druck aufgebaut wird. Um die Reibung und Rückströmungen zu reduzieren, wird zwischen die Schrauben Öl eingespritzt.
Der ungeregelte Schrauben-Verdichter arbeitet mit konstantem Druckverhältnis. Um den Betrieb des Verdichters an die Betriebsbedingungen anzupassen, ist eine entsprechende Regulierung erforderlich.

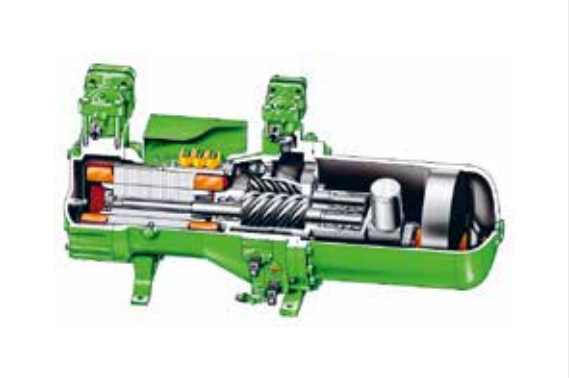


Bild 5.5: Halbhermetischer Schrauben-Verdichter. (Bild: Bitzer)

Turbo-Verdichter

Beim Turbo-Verdichter wird das in das Laufrad eintretende Gas durch die Drehbewegung des Rotors nach aussen beschleunigt. Die Geschwindigkeit nimmt ab und Druck wird aufgebaut. Im Diffusor wird danach die dynamische Energie in Druck umgewandelt.
Mehr Details über Verhalten und Einsatz der Turbo-Verdichter siehe Anhang (Kapitel 11.3 Vertiefung 1: Strömungs-Verdichter).

Bild 5.6: Turbo-Verdichter. (Bild: Turbocor)

Eigenschaften der unterschiedlichen Verdichter

In Bild 5.7 sind die wichtigsten Eigenschaften mit groben Leistungsangaben für den Einsatz im Klimabereich aufgelistet. Nicht jede Verdichterart kann im ganzen Leistungssegment eingesetzt werden. Zudem unterscheiden sie sich im möglichen Temperatur-Hub (Differenz zwischen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur).

Bild 5.7: Eigenschaften der verschiedenen Verdichterarten.

Verdichterart	Hubkolben	Scroll	Schraube	Turbo
Einsatz	kleine bis mittlere Leistungen	kleine bis mittlere Leistungen	mittlere bis grössere Leistungen	ab 200 kW, bis sehr grosse Leistungen
Kälteleistung Verdichter	bis 500 kW	bis 90 kW	bis 800 kW	ab 250 kW
Kälteleistung Kältemaschine	bis 1000 kW	bis 300 kW	bis 6000 kW	200 kW – 30 MW
Regulierbarkeit				
bei konstanter Drehzahl	Stufen mit Zylinderabschaltung	nur Digitalscroll: stufenlos möglich	stufenlos mit Schieber oder Bypass-Regelung	stufenlos mit Saugdrossel
mit Drehzahlregelung ca.[3]	50 % – 100 %	20 % – 100 %	20 % – 100 %	25 % – 100 %
Wärmenutzung mit Heissgasenthitzer möglich	ja (ca. 10 % der Leistung)	ja (ca. 10 % der Leistung)	bedingt	nein
Temperatur-Hub (ca.)[1]	0 °C – 65 °C	0 °C – 65 °C	0 °C – 65 °C	0 °C – 50 °C
Anlaufstrom[2]	relativ hoher Einschaltstrom	klein	mittel	mittel
Verursacht Erschütterungen	ja	nein	nein	nein
Wartung	einfach zu warten		grössere Wartungsarbeiten nur in Spezialwerkstatt möglich	durch Spezialisten relativ einfach zu warten
Weiteres	Pulsation beachten			

1 Verdampfung auf Verflüssigung
2 ohne Drehzahlregelung
3 Die minimale Drehzahl ist (bei den ölgeschmierten Verdichtern) von der Ölrückführung abhängig. Eine zu kleine Drehzahl führt zu einer mangelhaften Schmierung (Öldruckstörung).

5.3 Verhalten des Verdichters

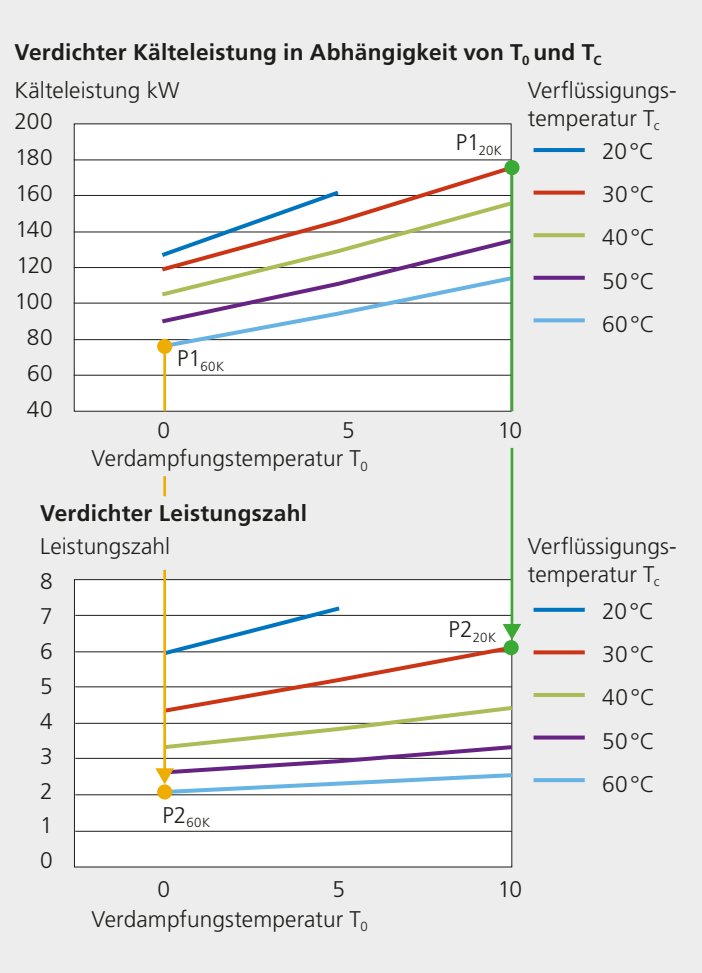
Die Verdampfungs- und die Verflüssigungstemperatur haben einen grossen Einfluss auf die Leistung und Effizienz des Verdichters. Je näher die Verdampfungs- und die Verflüssigungstemperatur beieinander liegen, desto effizienter und leistungsstarker ist der Verdichter. Das Beispiel eines Kolben-Verdichters illustriert dies (Bild 5.8).

Temperatur-Hub 60 K: Bei einer Verflüssigungstemperatur von 60 °C und einer Verdampfungstemperatur von 0 °C hat der Verdichter im Beispiel eine Leistung von 75 kW ($P1_{60K}$) und eine Leistungszahl von 2 ($P2_{60K}$).

Temperatur-Hub 20 K: Sinkt die Verflüssigungstemperatur auf 30 °C und kann gleichzeitig die Verdampfungstemperatur auf 10 °C erhöht werden, steigt die Kälteleistung des Verdichters auf 175 kW ($P1_{20K}$) und die Leistungszahl auf 6 ($P2_{20K}$).

Es ist daher wichtig, die Temperaturdifferenz zwischen Verflüssigung und Verdampfung möglichst klein und damit die Energieeffizienz der Anlage hochzuhalten. Dieses Prinzip gilt für alle Verdichterarten, weil es vom Kälteprozess bestimmt wird und nicht vom Verdichter (siehe auch Kapitel 3.3 Carnot-Prozess als idealer Vergleich).

Bild 5.8: Leistungsdiagramm eines Kolben-Verdichters in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur T_c und der Verflüssigungstemperatur T_0.



Regelmöglichkeiten von Verdichtern

Die Kälteleistung von allen Verdichtern kann mit einer Drehzahlregelung variiert werden. Diese zeichnet sich durch optimale Energieeffizienz und reduzierte Abnutzung (tiefere Servicekosten) aus. Dafür ist der Preis der Anlage höher.

Im Folgenden werden verschiedene zusätzliche Regelmöglichkeiten beschrieben, mit denen die Leistung der Maschine bei konstanter Drehzahl mechanisch verändert werden kann.

Zylinderabschaltung

Gilt nur für Hubkolbenkompressoren:

Bei dieser Regulierung wird das Saugventil bei einem oder mehreren Zylindern mechanisch offengehalten. Durch die Kolbenbewegung wird das Gas aus der Saugleitung angesaugt und anschliessend wieder zurückgedrückt. Dadurch wird der Zylinder inaktiv und die Leistung sinkt aufgrund des reduzierten Gesamtmassestroms. Gleichzeitig bleiben jedoch die mechanischen Verluste bestehen. Der Regelbereich je Verdichter ist von der Zylinderzahl und der Verdichterkonstruktion abhängig und liegt ca. zwischen 50 % und 100 %. Eine einfache, aber mässig effiziente Regelung.

Kurze Unterbrechung der Förderung (Digital-Scroll)

Bei einem «Digital-Verdichter» wird die Verdichtung vom gasförmigen Kältemittel durch kurze Unterbrechung der Förderung ausgesetzt. Dadurch wird die Leistung entsprechend reduziert. Bedingt durch die mechanischen Verluste ist diese Art der Regelung nicht sehr effizient und verur-

sacht Druckschwankungen auf der Druckseite.

Schieber-Bypass-Regelung
Bei Schrauben-Verdichtern wird die Leistung mit einer Schieber- oder einer Bypass-Regulierung an den Bedarf angepasst.
Mit dem Schieber wird die wirksame Verdichtungslänge verändert. Die Schieberregulierung mit Parallel- beziehungsweise Tandemschieber erfordert robuste Gehäuse, da diese mit dem Einbau des Schiebers geschwächt werden. Im Leistungsbereich zwischen 100 % und 50 % erreicht man mit dieser Regulierung eine gute Energieeffizienz. Im Teillastbetrieb (unter 50 % Last) nimmt die Energieeffizienz deutlich ab.
Bei Schrauben-Verdichtern, die mit einem Bypass reguliert werden, handelt es sich um eine preisgünstigere Lösung – allerdings auf Kosten der Energieeffizienz.

Saugdrosselregulierung
Bei Turbo-Verdichtern kann mit einer Drosselung des Kältemittelstroms die Verdichterleistung reduziert werden. Dazu werden am Verdichter-Eintritt die Vorleitschaufeln verstellt. Der Wirkungsgrad des Verdichters geht dabei stetig zurück. Eine optimale, energieeffiziente Regulierung wird durch Saugdrosselregulierung in Kombination mit Drehzahlregulierung erreicht.

Drehzahlregulierung bei Verdrängungsverdichtern
Eine Erhöhung der Drehzahl bewirkt, dass mehr Masse des Kältemittels in der Sekunde gefördert wird. Die Erhöhung des Kältemittelmassenstroms bewirkt eine Erhöhung der Kälteleistung (vgl. Kapitel Grundlagen). Eine Reduktion der Drehzahl reduziert entsprechend den Kältemittelmassenstrom. Der Austrittsdruck verändert sich nicht, da er von der Geometrie des Kompressionsraums abhängt.

Drehzahlregulierung bei Strömungs-Verdichtern
Eine Erhöhung der Drehzahl führt zu einer gleichzeitigen Erhöhung von Massenstrom und Austrittsdruck durch Verschiebung der Verdichterkennlinie. Eine Reduktion der Drehzahl reduziert entsprechend Druck und Massenstrom. Sowohl für die Erhöhung wie auch die Erniedrigung existieren Betriebsgrenzen für die Strömungsfunktion des Verdichters. Ausserhalb davon ist kein Betrieb möglich.

Bild 5.9: Regulierung mit Parallel- beziehungsweise Tandemschieber.

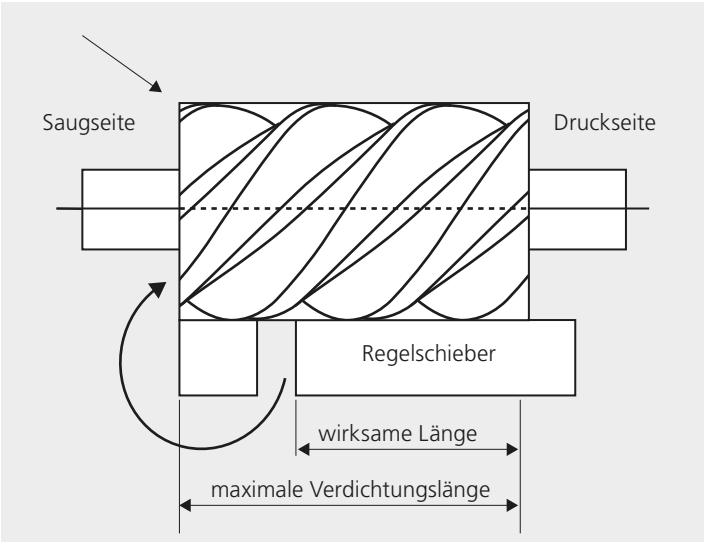
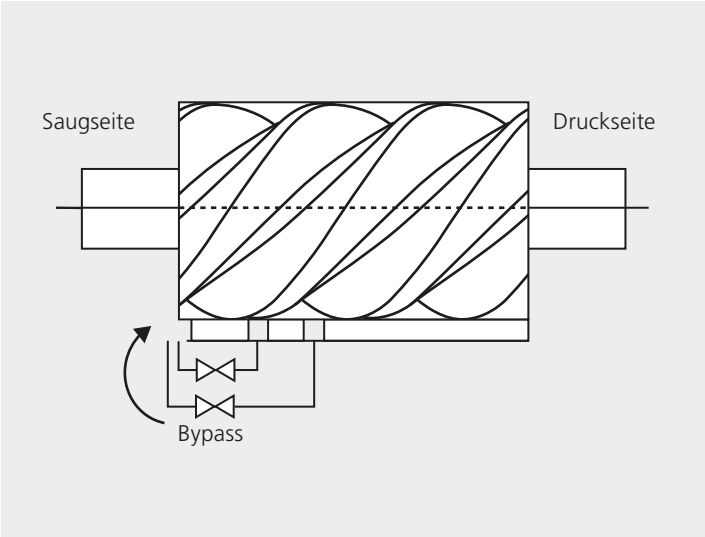


Bild 5.10: Schrauben-Verdichter mit Bypass-Regulierung.



5.4 Verdichterbauarten

Je nach Anwendung und unter Berücksichtigung der Kosten setzt man unterschiedliche Verdichterbauarten ein. Sie unterscheiden die Art, wie Verdichter und Antrieb zusammengebaut sind. Die Eigenschaften beziehungsweise die Vor- und Nachteile der verschiedenen Bauarten im Überblick:

Vollhermetischer Verdichter	Halbhermetischer Verdichter	Offener Verdichter
Bei vollhermetischen Maschinen bilden der Verdichter und der Elektromotor eine in sich geschlossene Einheit (dicht verschweisst). • Kein Kältemittelverlust • Motorkühlung durch Kältemittel, Anhebung der Verdampfungstemperatur nur begrenzt möglich • Kleiner Motor, da direktgekühlt • Kleine Einheiten, nicht reparierbar • Leistungsbereich hermetischer Verdichter: bis ca. 100 kW Kälteleistung	Bei halbhermetischen Maschinen sind der Verdichter und Motor zusammengebaut und zugänglich. Dadurch wird eine Reparatur möglich. • Kein Kältemittelverlust • Motorkühlung durch Kältemittel, die Abwärme wird direkt mit dem Kältemittel abgeführt • Hoher Motorwirkungsgrad, kleiner Motor, Anhebung der Verdampfungstemperatur nur begrenzt möglich • Kleinere bis mittelgrosse Einheiten • Eventuell hohe Kosten bei einem Motorschaden • Leistungsbereich halbhermetischer Verdichter: ca. 50 kW bis 500 kW Kälteleistung	Bei offenen Maschinen sind der Verdichter und Motor voneinander getrennt. Dieses System wird vor allem bei höheren Leistungen und bei Ammoniakanwendungen eingesetzt. (NH_3 würde die Kupferwicklungen angreifen). • Gefahr der Kältemittelverluste durch die Stopfbüchse des Kompressors • Diverse Antriebe einsetzbar • Motor gibt die Wärme an die Umgebung ab • Reparierbar • Gut geeignet für Industriekälte-Anwendungen

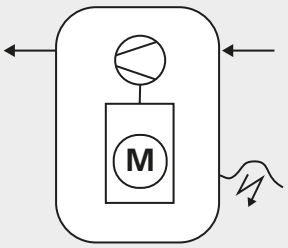
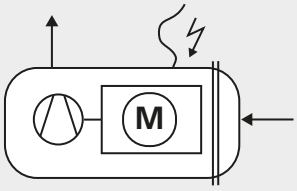
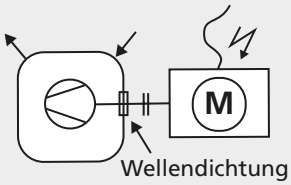

		

Bild 5.11: *Vollhermetischer Verdichter.*	*Bild 5.12:* *Halbhermetischer Verdichter.*	*Bild 5.13:* *Offener Verdichter.*

Aspekte der Stromversorgung
Bei Direktschaltung von Elektromotoren beträgt der Anlaufstrom ca. das Sechsfache des Nennstroms. Diese Stromspitze ist in Bezug auf das Netz unerwünscht. Je nach Elektrizitätswerk ist deshalb der Direktanlauf nur bei kleineren Motoren mit 3 kW – 5 kW Antriebsleistung zulässig.
Mit einem Frequenzumformer kann das Problem der hohen Anlaufströme gelöst werden. Leider sind nicht alle Investoren bereit, die Investitionen für einen Frequenzumformer zu tätigen.
Bei Kältemaschinen ohne Frequenzumformer beeinflussen die Rahmenbedingungen der elektrischen Seite die Wahl der Anlaufart, beziehungsweise das Funktionsprinzip des Verdichters.

Drehzahlregulierung
Bei der Drehzahlregulierung mit einem Frequenzumformer müssen speziell zwei Phänomene beachtet werden:

- **Die kritische Drehzahl:** Frequenzumformer lassen im Prinzip beliebige Drehzahlen zu. Aus maschinendynamischen Gründen müssen die Drehzahlen jedoch mit der angeschlossenen Maschine abgestimmt werden. Bei der Anwendung eines Frequenzumformers für den Antrieb des Verdichters schreibt der Verdichterlieferant darum vor, welche kritischen Drehzahlen für den Dauerbetrieb des Verdichters nicht zulässig sind. Diese können unerwünschte Vibrationen verursachen und am Ende zu Schäden am Verdichter führen.

Der Maschinenlieferant muss in der Steuerung der Maschine dafür sorgen, dass diese Drehzahlen ausgeblendet werden. Aus Verantwortlichkeitsgründen ist es ratsam, dass der Frequenzumformer in der Maschine integriert ist.

- **Die Oberwellen:** Die Anwendung eines Frequenzumformers kann im elektrischen Netz die Ausbreitung von Oberwellen verursachen. Diese müssen mit einem Filter oder mit Drosseln, geliefert mit der Maschine, herausgefiltert werden. Ansonsten können diese zu Störungen im Stromnetz führen.

Koordination mit Elektroplaner
In der Projektphase muss der zuständige Klimakälteplaner gemeinsam mit dem Kältemaschinenbauer und Elektroingenieur folgende elektrischen Aspekte klären:

- Anlaufart
- Anlaufstrom und Nennstrom
- Vorgaben des Elektrizitätswerks und
- Ansteuerung des Frequenzumformers (falls einer vorgesehen ist).

Anlaufart	Anlaufstrom	Kostenrahmen approximativ		Bemerkung
		20 kW elektrisch	100 kW elektrisch	
direkt	ca. 6-fach	keine	–	In der Regel nur für Verdichter mit einer Leistung bis 3 kW – 5 kW elektrisch möglich
Stern-Dreieck	ca. 2-fach	1000 Fr.	2000 Fr.	Bei Standardmaschinen ist der Stern-Dreieck-Schütz in der Schaltanlage enthalten. Ansonsten diesen durch Elektroplaner vorsehen lassen
Teilwicklung Start	2- bis 3-fach	1000 Fr. + Motor-Mehrpreis	2000 Fr. + Motor-Mehrpreis	Erfordert Spezialmotor. Schütz analog Stern-Dreieck-Schaltung
Frequenzumformer	kein höherer Anlaufstrom	3000 Fr.	7000 Fr.	FU wird in der Regel durch den Maschinenhersteller mit der Maschine mitgeliefert.

Bild 5.14: Anlaufarten von Verdichter-Motoren.

5.5 Allgemeines zu Wärmeübertragern

Wärmeübertrager werden in der Kältemaschine sowohl auf der Verdampfer- wie auch auf der Verflüssigerseite eingesetzt. Je nach System werden unterschiedliche Wärmeübertrager-Typen angewendet.

Wärmeübertrager = Wärmetauscher

Rohrbündel-Wärmeübertrager bestehen aus einem Rohrregister in einem Kesselmantel zur Wärmeübertragung von flüssigen und vereinzelt gasförmigen Medien. Sie zeichnen sich durch eine hohe Materialvielfalt und eine geringere Schmutzanfälligkeit aus.

Platten-Wärmeübertrager: Kompakte Konstruktion in gelöteter oder geschweisster Ausführung zur Wärmeübertragung von flüssigen und – in Spezialanwendungen – gasförmigen Medien. Sie haben den Vorteil von kleinen Inhalten, grossen Übertragungsflächen auf kleinstem Raum und einer hohen Modularität in der Herstellung. Sie sind jedoch nicht geeignet für verschmutzte Medien.

Bild 5.15: Rohrbündel-Wärmeübertrager. (Bild: Bitzer)

Bild 5.16: Platten-Wärmeübertrager. (Bild: BMS)

Koaxial-Wärmeübertrager bestehen aus einem wendelförmig gebogenen Doppelrohr, meist aus Kupfer gefertigt. Einsatz mehrheitlich bei kleinsten Anlagen.

Lamellen-Wärmeübertrager bestehen 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 der Lamellenabstand, da Verschmutzung, Vereisung etc. zu deutlichen Leistungseinbussen führen können.

Register-Wärmeübertrager bestehen aus Rohrschlangen oder Plattenpaketen in verschiedenen Materialqualitäten, die in offenen und geschlossenen Behältern eingebaut werden. Sie werden in der Klimakälte nur bei speziellen Anwendungen – vor allem bei stark verschmutzten Medien – eingesetzt. Register-Wärmeübertrager werden im Normalfall nur als Verdampfer verwendet.

Meldepflicht bei der SUVA
Druckgeräte (z. B. Wärmetauscher) mit einer gewissen Grösse müssen einer wiederkehrenden Überprüfung unterzogen werden. Sie müssen vor ihrer ersten Verwendung sowie bei wesentlichen Änderungen der SUVA gemeldet werden. Für die Anmeldung ist der Besitzer der Anlage verantwortlich. In der Regel delegiert dieser die Anmeldung dem Planer oder dem Lieferanten.
Der SVTI (Schweizer Verein für technische Inspektion) führt für die SUVA die Inspektionen durch. In der Druckgeräteverwendungsverordnung und der EKAS-Richtlinie[1] «Druckgeräte» sind alle wichtigen Informationen zur Nutzung der Druckgeräte beschrieben.
Diese Überprüfung durch den SVIT erhöht die Betriebskosten der Anlage, was bei der Gesamtkostenbetrachtung zu berücksichtigen ist.

1 EKAS: Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit

Anzustrebende Temperaturdifferenzen

Bei der Auslegung der Wärmeübertrager steht der Planer vor der Herausforderung, eine optimale Energieübertragung sicherzustellen, ohne dass der Mehrverbrauch bei den Nebenaggregaten wie Pumpen und Ventilatoren zu stark ins Gewicht fällt. Und die Investitionskosten gleichzeitig im Rahmen bleiben. Als Richtgrösse für die Dimensionierung kann man sich an den Temperaturdifferenzen für gängige Wärmeübertragertypen orientieren (Bild 5.17).

1 Verdampfer (Kühler)				
1.1 Luftkühler	**Temperaturdifferenz dT = T_{Luft}** (Eintritt Verdampfer) **– T_0** (Verdampfungstemperatur)			
	Wärmeübertrager	**Arbeitsweise**	**dT zulässig**	**dT anzustreben**
	Lamellen	trocken	≤ 10 K[1]	≤ 7 K[2]
	Lamellen	überflutet	≤ 8 K	≤ 5 K
1.2 Flüssigkeitskühler	**Temperaturdifferenz dT = T** Kälteträger (Austritt Verdampfer) **– T_0** (Verdampfungstemperatur)			
	Wärmeübertrager	**Arbeitsweise**	**dT zulässig**	**dT anzustreben**
	Platten	trocken	≤ 6 K	≤ 2 bis 4 K
	Rohrbündel	trocken oder überflutet	≤ 5 K	≤ 3 K
2 Verflüssiger (Kondensator)				
2.1 Trocken, Luft	**Temperaturdifferenz dT = T_{Luft}** (Eintritt Verflüssiger) **– T_C** (Verflüssigungstemperatur)			
	Wärmeübertrager	**Arbeitsweise**	**dT zulässig**	**dT anzustreben**
	Lamellen	trocken	≤ 13 K	≤ 8 K
2.2 Flüssigkeitsgekühlt	**Temperaturdifferenz dT = $T_{Wärmeträger}$** (Austritt Verflüssiger) **– T_C** (Verflüssigungstemperatur)			
	Wärmeübertrager	**Arbeitsweise**	**dT zulässig**	**dT anzustreben**
	Platten	flüssigkeitsgekühlt	≤ 5 K	≤ 1 bis 2 K
	Rohrbündel	flüssigkeitsgekühlt		≤ 2 K

[1] mit thermostatischem Expansionsventil [2] mit elektronischem Expansionsventil

Bild 5.17: Anzustrebende Temperaturdifferenzen bei Wärmeübertragern. (Quelle: Leitfaden mit Massnahmen zur Optimierung von Kälteanlagen, BFE 2012, basiert auf Angaben der VDMA 24247-8)

Verschmutzung und Alterung von Wärmeübertragern

Bei einem neuen Wärmeübertrager sind die Oberflächen sauber und der Wärmeübergang ist optimal. Im Laufe der Zeit verschmutzt jedoch der Wärmeübertrager, die Leistungsfähigkeit nimmt ab. Die Verschmutzung entsteht durch Ablagerungen von Schlamm beziehungsweise durch Biofilm. Bei offenen Systemen kommt der Schmutzeintrag von Aussen.

Das Beispiel eines Verflüssigers mit Ammoniak als Kältemittel zeigt, wie die Temperaturen durch Schmutz beeinflusst werden. So steigt die Verflüssigungstemperatur durch die Verschmutzung von 40 °C auf 45 °C. Der Verflüssigungsdruck steigt dadurch um 2,3 bar. Dieser Anstieg verursacht bei T_0 = 10 °C einen um ca. 15 % höheren Energieverbrauch!

Bei einer Kältemaschine mit verschmutzten Wärmeübertragern gehen gleichzeitig die Leistungszahl und die Kälteleistung zurück.

Bei der Anfrage für einen Kälteerzeuger muss der Planer dem Lieferanten unbedingt den sogenannten Verschmutzungsfaktor (Fouling Faktor FF) vorgeben. Dieser berücksichtigt den zusätzlichen Wärmeübertragungswiderstand infolge der erlaubten Verschmutzungen. Der Maschinenlieferant soll dem Planer bestätigen, dass die Wärmeübertrager (und damit die Kältemaschine) für eine zu erwartende Verschmutzung ausgelegt wurden und auch bei dieser betriebsfähig bleiben (Gefahr von Hochdruckstörung).

Unbedingt zu beachten

- Bei einem Vergleich verschiedener Angebote muss zwingend mit dem gleichen Verschmutzungsfaktor gerechnet werden.
- Die Norm SIA 382/1 (2014) geht bei der Berechnung der Standardbedingungen der energetischen Anforderungen an wassergekühlte Kälteanlagen von einem (theoretischen) Verschmutzungswert von 0 m^2 K/W aus.

Beispiele für die Festlegung des Verschmutzungsfaktors FF in Bild 5.19.

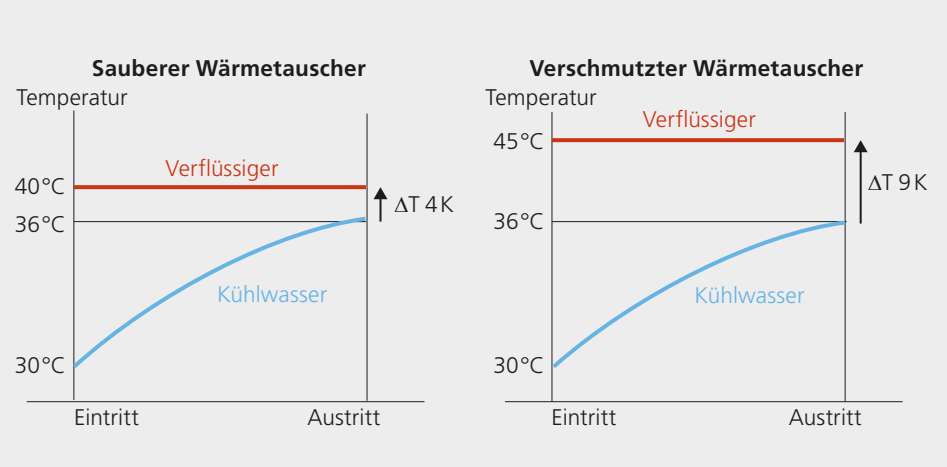


Bild 5.18: Einfluss der Verschmutzung auf die Energieeffizienz.

FF* m^2 K/kW	FF m^2 K/W	Beschreibung
0,01	0,00001	saubere Apparate
0,044	0,000044	leicht verschmutzt (geschlossene Kreisläufe)
0,088	0,000088	offene Kreisläufe, sauber
0,136	0,000136	offene Kreisläufe, verschmutzt
0,172	0,000172	offene Kreisläufe, stark verschmutzt (z. B. Algen, Ablagerungen)

* Verschmutzungsfaktor (Fouling Faktor FF)

Bild 5.19: Verschmutzung der Wärmeübertrager und Verschmutzungsfaktor.

5.6 Verdampfer

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

Rohrbündel-Verdampfer mit Trockenexpansion

Bei der Trockenexpansion wird das Kältemittel in die Wärmeübertrager so eingespritzt, dass es am Austritt dampfförmig (trocken) ist. Dafür muss eine Überhitzung von 5 K bis 7 K eingestellt werden.
Das Kältemittel wird über ein Expansionsventil dem Verdampfer zugeführt. Die Kältemittelmenge wird anhand der Differenz zwischen der Gas- und Sättigungstemperatur (Sauggasüberhitzung) geregelt. Am Verdampfer-Austritt ist das Kältemittelgas überhitzt und somit trocken.

Bei einem Rohrbündel-Verdampfer mit Trockenexpansion befindet sich das gekühlte Medium im Mantelraum. Die Wärmeübertragung wird durch die Strömungsumlenkung durch die quer liegenden Lamellen verbessert.
Sowohl der Rohrbündel- als auch der Platten-Trockenexpansions-Verdampfer dürfen nicht für stark verschmutzte Medien (wie z. B. offene Kreisläufe in der Industrie) verwendet werden. Eine mechanische Reinigung ist nicht möglich, der Apparat kann nur chemisch gereinigt werden.

Rohrbündel-Verdampfer überflutet

Im überfluteten Wärmeübertrager befindet sich das flüssige Kältemittel im unteren Bereich des Mantelraums (Eintritt). Das gasförmige Kältemittel wird im oberen Bereich abgesaugt. Mit der Schwerkraftabscheidung ist nur eine kleine Sauggasüberhitzung notwendig (0,5 K – 1,0 K). Dies wirkt sich positiv auf die Energieeffizienz der Anlage aus.

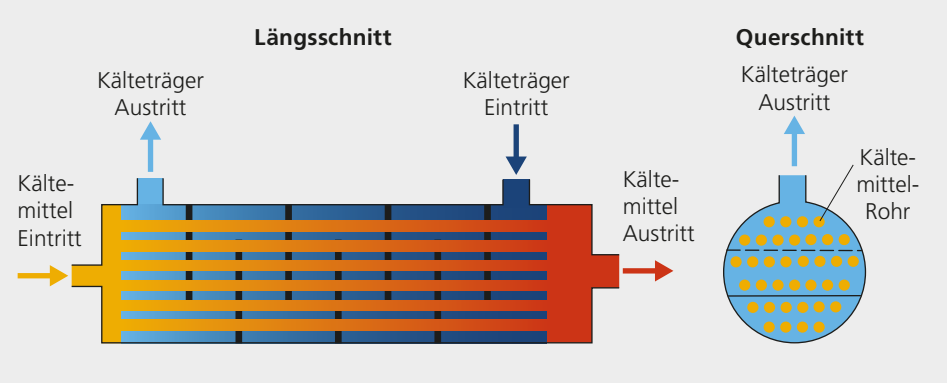


Bild 5.20: Rohrbündel-Trockenexpansions-Verdampfer. (Quelle: vpro)

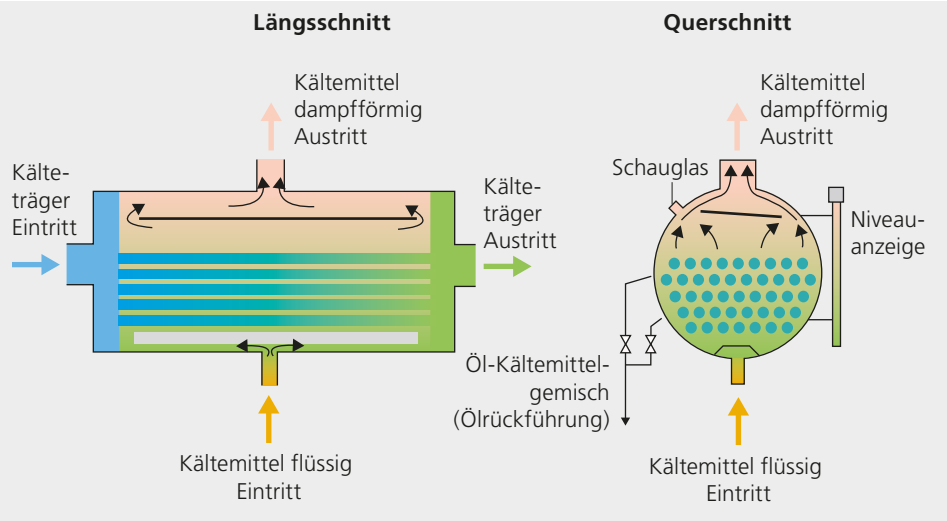


Bild 5.21: Überfluteter Rohrbündel-Verdampfer. (Quelle: vpro)

Nachteil dieser Lösung ist die grössere Kältemittelfüllung, die benötigt wird (zulässige Kältemittelmenge gemäss ChemRRV beachten). Bei der Anwendung von Plattenwärmeübertragern wird allerdings die Kältemittelmenge reduziert.
Das Kältemittel wird über eine Hoch- oder Niederdruck-Schwimmerregulierung von unten in den Mantelraum des Verdampfers geführt. Die Kältemittelmenge wird anhand des Flüssigkeitsspiegels auf der Hoch- oder Niederdruckseite geregelt. Am Verdampfer-Austritt (oben) ist das Kältemittelgas nur wenig überhitzt. Bei hohen Leistungen siedet das flüssige Kältemittel im Apparat sehr stark. Um zu verhindern, dass Tropfen des Kältemittels in die Verdichter-Saugleitung gelangen, wird in der Regel im oberen Bereich des Mantels ein Flüssigkeitsabscheider eingebaut.
Der wesentliche Vorteil des überfluteten Verdampfers liegt darin, dass bei genügender Wärmeübertragungsfläche kleine Temperaturdifferenzen zwischen Kältemittel- und Medium-Seite möglich sind, d. h. die Verdampfungstemperatur kann höher ausgelegt werden. Dies gilt insbesondere für den Teillastbereich. Die Folge ist ein besserer Wirkungsgrad und dadurch eine höhere Energieeffizienz des Gesamtsystems.
Beim abgebildeten Verdampfer handelt es sich um einen Einpass-Apparat (Medium fliesst durch einen Weg von links nach rechts).

Luftkühler (Direktverdampfer)
Für die Luftkühlung kann ein sogenannter direkter Luftverdampfer, z. B. in einem Lüftungsgerät, eingesetzt werden. Bei synthetischen Kältemitteln wird das Kältemittel durch Kupferrohre mit Aluminium-Lamellen geführt. Der Lammellenabstand beträgt bei sauberer Luft 1 bis 2 mm, bei verschmutzten Medien muss der Abstand bis auf 4 mm erhöht werden, damit die Lamellen gereinigt werden können.
Damit die Temperaturschichtung am Kühleraustritt möglichst klein bleibt, wird das Kältemittel-Flüssigkeit-Gasgemisch über eine Verteilspinne auf die einzelnen Rohrpässe mit einzelnen Kapillarröhrchen verteilt.
Je nach Einsatzbedingungen beziehungsweise Verschmutzungsgrad müssen die Lamellen regelmässig gereinigt werden.

Unterschied zwischen Trockenexpansion und überflutetem Verdampfer, dargestellt am Beispiel eines Kassetten-Wärmeübertragers.
Bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen der Eintrittstemperatur des Mediums und der Kältemittelaustrittstemperatur (=) liegt beim Trockenexpansions-Verdampfer die Verdampfungstemperatur mehrere K tiefer als beim überfluteten Verdampfer (Bild 5.23). Der Grund dafür ist die grössere notwendige Kältemittelüberhitzung. Dies wirkt sich negativ auf die Energieeffizienz der Anlage aus.

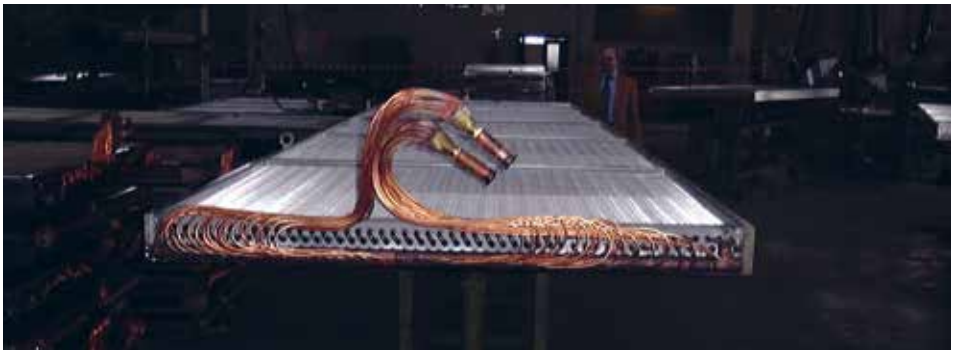


Bild 5.22: Lammellenwärmeübertrager als Verdampfer.

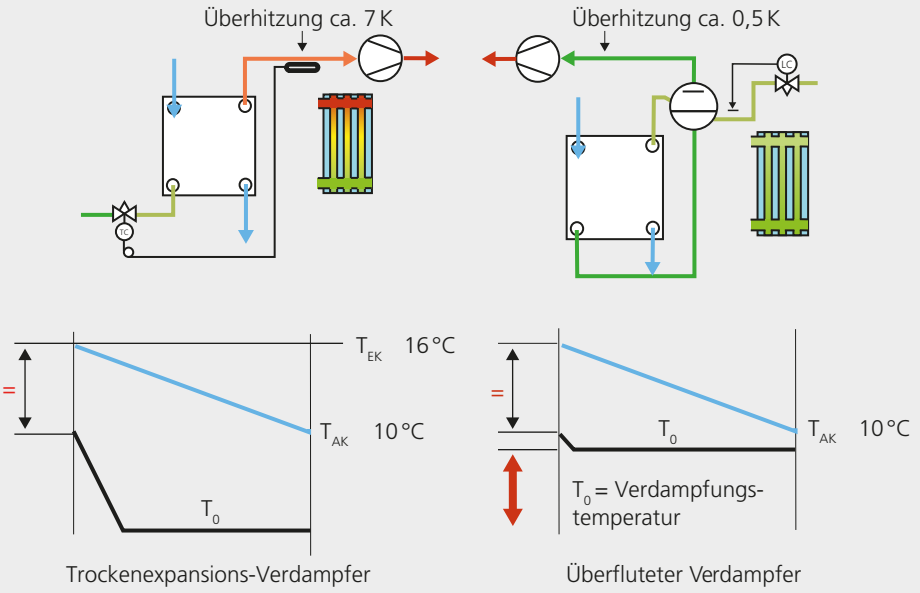
Gegenüberstellung der Verdampferarten am Beispiel eines Rohrbündelapparats		
Prinzip	**Trockenexpansion**	**Überfluteter Verdampfer**
Merkmale	• Das Kältemittel befindet sich in den Rohren. • Das Öl zirkuliert im Kreislauf mit (bei Teillast unter 50 % ist die Aufteilung auf mehrere Kreisläufe erforderlich).	• Das Kältemittel befindet sich im Mantelraum. • Bei Öl im Kältekreislauf (ölgeschmierte Verdichter) aufwendige Ölrückführung.
Vorteile	+ Kleinere Kältemittelfüllung + Öl wird zwangsläufig mitbefördert + Tieferer Preis der Kältemaschine	+ Höhere Leistungszahl + Kleine Sauggasüberhitzung (0,5 K – 1,0 K) + Gleichmässige Strömung in den Rohren bei geringem Druckabfall + Tiefere Austrittstemperaturen (bis 3 °C) + Variabler Volumenstrom in der Regel zulässig Bei Rohrbündel-Verdampfer: + Kann auf Mediumseite mechanisch gereinigt werden (ev. mit Rohrreinigungssystem). + Sichtbare Verdampfung, messbare Niveaumessung
Nachteile	– Tiefere Leistungszahl – Sauggasüberhitzung von ca. 5 K – 8 K erforderlich – Mechanische Reinigung nicht möglich – Erhöhte Betriebssicherheit bei Anlagen mit mehreren Kreisläufen – Einfriergefahr in den Ecken des Verdampfers (bei Verdampfung nahe 0 °C) – Minimale Austrittstemperaturen: • Kältemittel ohne Gleit 6 °C • Kältemittel mit Gleit 8 °C – Bei ungenügender Überhitzung Gefahr von Flüssigkeitsschlägen – Konstanter Volumenstrom erforderlich	– Grössere Kältemittelfüllung – Ölrückführung aufwendig (falls notwendig) – Höherer Preis der Kältemaschine – Grosse Wärmeübertragerfläche und Abscheideraum erforderlich (= teuer) – Nicht geeignet für Kältemittelgemische mit Gleit (zeotrope Kältemittel)
System-temperaturen am Beispiel eines Platten-Verdampfers		

Bild 5.23: Merkmale, Vor- und Nachteile von überfluteten und Trockenexpansions-Verdampfern.

5.7 Verflüssiger

Im Verflüssiger wird die im Verdampfer aufgenommene Wärme – plus die Energie für den Antrieb des Verdichters – wieder abgegeben.

Rohrbündel-Verflüssiger

Das vom Verdichter kommende Kältemittelgas wird im Mantelraum des Wärmeübertragers enthitzt, verflüssigt und abhängig von der Konstruktion auch noch unterkühlt.

Die Wärmeabgabe kann auch über mehrere Wärmeübertrager und damit auf unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgen. Diese Anwendung mit Enthitzer, Verflüssiger und Unterkühler trägt dazu bei, dass die Energieeffizienz der Anlage verbessert wird, siehe Bild 5.25.

Im obersten Teil wird die Enthitzungswärme genutzt, z. B. für Trinkwassererwärmung (TWW), im mittleren Teil wird die Verflüssigungswärme abgeführt. Im Unterkühler wird die Kältemittelflüssigkeit abgekühlt und dadurch der Prozess energetisch optimiert.

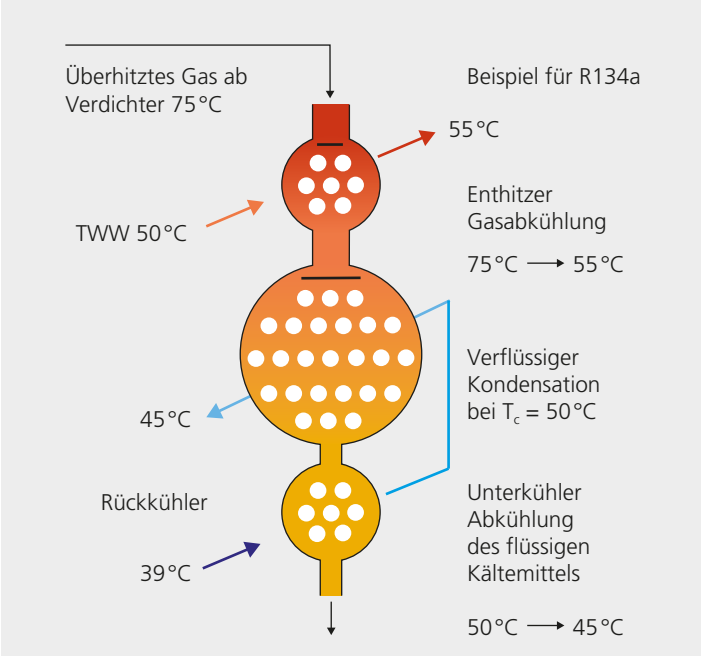
Soll z. B. ein Teil der Wärme auf der Druckseite genutzt werden, muss der Planer die Einbindung eines Enthitzers vorschreiben. Der Kältemaschinenlieferant gibt in seinen technischen Daten die Leistung bekannt.

Voraussetzungen für den Einsatz eines Enthitzers:

- Genügender Wärmebedarf vorhanden
- Erforderliches Temperaturniveau durch den Enthitzer auch bei der Teillast erreichbar
- Genügende Enthitzerleistung, insbesondere bei Teillast. Ist diese zu tief (unter 10 % $\dot{Q}_C$) ist die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben.

Hinweis: Vernachlässigt man die Druckverluste, ist der Druck auf der Kältemittelseite in allen Apparaten gleich. Dieser entspricht der Verflüssigungstemperatur.

Bild 5.25: Beispiel der Nutzungsmöglichkeiten der Wärme auf der Verflüssigerseite auf unterschiedlichem Temperaturniveau.



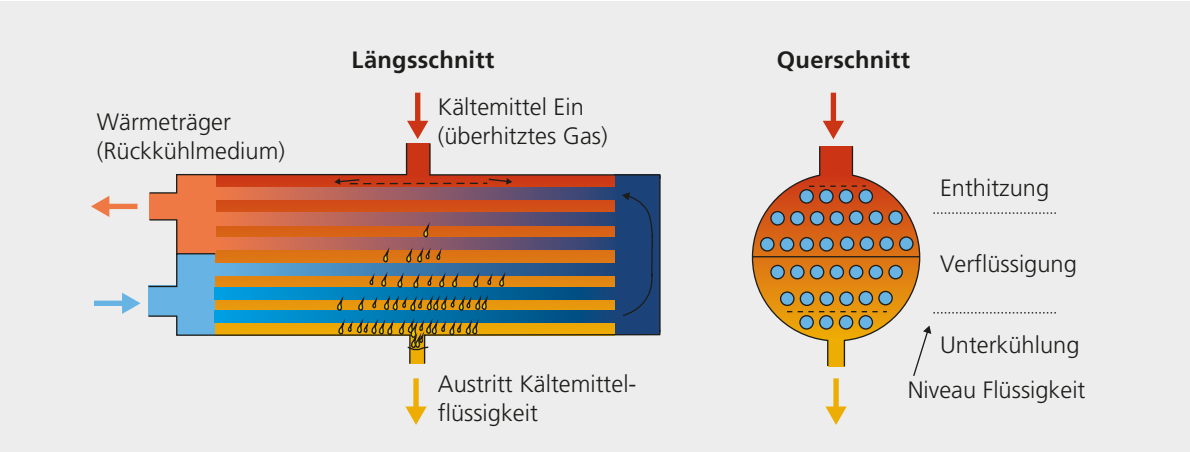


Bild 5.24: Rohrbündel-Verflüssiger in 2-Pass-Ausführung auf der Wärmeträgerseite.

Die Installation eines Unterkühlers liegt im Ermessen des Kältemaschinenbauers. Die Unterkühlung ist entscheidend bezüglich der Leistung und der Effizienz.
Der Planer und der Installateur müssen unbedingt darauf achten, dass die Rohrleitungsanschlüsse nach den Vorgaben des Kältemaschinenlieferanten erfolgen. Werden die Anschlüsse vertauscht, führt dies zu Leistungs- und Effizienzminderung der Kältemaschine. Eine andere Möglichkeit der Wärmenutzung ist in Bild 5.26 ersichtlich.
Bei dieser Lösung sind das Kältemittel und die Kältemittelfüllmenge zu beachten. In der Luft stabile Kältemittel halten mit dieser Lösung – aufgrund der notwendigen grossen Kältemittel-Füllmenge – in der Regel die von der ChemRRV geforderten maximal erlaubten Füllmengen nicht ein. Mit einem in der Luft stabilen Kältemittel sollte darum geprüft werden, ob ein Platten-Wärmeübertrager eingesetzt werden kann (siehe Bild 3.16 und 4.4).

Hinweis für Kältemittel der Klasse B (höhere Toxizität)
Die direkte Nutzung der Enthitzungs- und Verflüssigungswärme (zwischen Kältemittel und Trinkwarmwasser) ist bei «giftigen» Kältemitteln wie z. B. Ammoniak nicht erlaubt. Hierfür muss ein Zwischenkreislauf vorgesehen werden. Als Alternative gilt die Anwendung von doppelwandigen Wärmeübertragern. Massgebend sind hier die kantonalen Vorschriften.

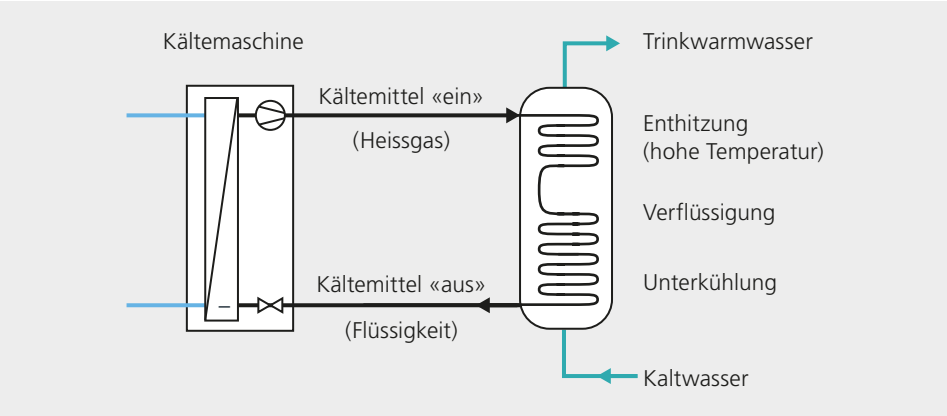


Bild 5.26: Wärmenutzung für die Erwärmung von Trinkwarmwasser.

Direktverflüssiger mit Lammellenwärmeübertrager
Die Anwendung eines Direktverflüssigers bei einem Split-System* bringt in Bezug auf die Investitionskosten und Energieeffizienz Vorteile. Der Nachteil ist die grössere Kältemittelfüllung.

Gemäss ChemRRV ist der Kältemittelinhalt einer Anlage so klein wie möglich zu halten. In der Vorschrift sind die maximalen Kältemittelmengen definiert.
Bei einer kompakten Kältemaschine (man spricht auch von Kältesatz) auf dem Dach des Gebäudes kann der Nachteil der grösseren Kältemittelfüllung etwas gemindert werden, weil der Verflüssiger direkt in der Kältemaschine integriert ist. Die langen Verbindungsleitungen fallen demzufolge weg.

*Kältemaschine mit Verdichter und Verdampfer befindet sich im Kältemaschinenraum, der Verflüssiger steht oben auf dem Dach, wie in Bild 5.27 abgebildet.

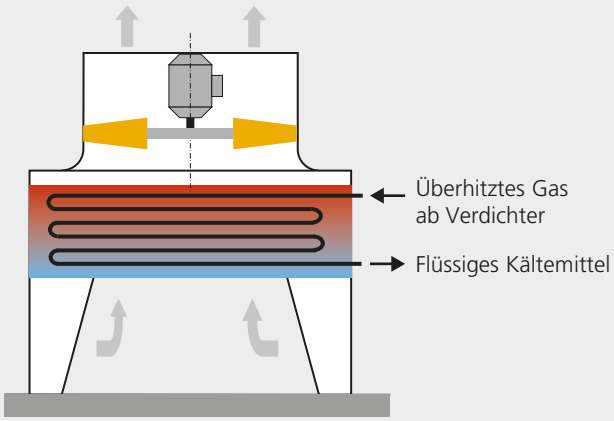


Bild 5.27: Direktverflüssiger-Prinzip als Installationsbeispiel.

5.8 Expansionsventil

Das Expansionsventil (Drosselorgan) entspannt das flüssige Kältemittel von der Hochdruck- zur Niederdruckseite des Kältemittel-Kreislaufs und reguliert den Kältemittelfluss zum Verdampfer. Es darf nur so viel Kältemittel «eingespritzt» werden, dass am Verdampfer-Austritt kein flüssiges Kältemittel vorkommt. Dadurch wird der Verdichter vor Flüssigkeitsschlägen geschützt.
Ein korrekt ausgelegtes Expansionsventil hat einen bedeutenden Einfluss auf die Effizienz und Leistung einer Kältemaschine.

Thermostatisches Expansionsventil
Das thermostatische Expansionsventil ist eine preisgünstige Lösung für die Expansion des Kältemittels. Die Regelgrössen sind dabei die Sauggastemperatur und der Verdampfungsdruck. Das korrekte Einstellen eines thermostatischen Ventils ist jedoch zeitaufwendig. Dabei stellt der Kältefachmann das Ventil in der Regel so ein, dass die Überhitzung 6 K bis 7 K beträgt. Dadurch stellt er sicher, dass nach dem Verdampfer das gesamte Kältemittel verdampft (gasförmig) ist und der Verdichter kein flüssiges Kältemittel ansaugt.
Um Flüssigkeitsschläge beim Start des Verdichters zu verhindern, muss zudem vor dem thermostatischen Expansionsventil noch ein Magnetventil mit einer Auf-Zu-Funktion eingebaut werden.

Elektronisches Expansionsventil (EEV)
Das elektronische Expansionsventil besteht aus einem Motorventil und dazugehörigem Regler. Für die Regelung des elektronischen Expansionsventils werden mehrere Parameter herangezogen. Neben der Sauggastemperatur (beziehungsweise dem Sauggasdruck) wird der Verflüssigungsdruck, die Unterkühlung und bei überfluteten Verdampfern das Flüssigkeitsniveau im Verflüssiger und andere Grössen herangezogen. Der Algorithmus ist in der Regel frei programmierbar und erlaubt demzufolge spezifische Lösungen. Der Vorteil des elektronischen Expansionsventils ist die einfache und exakte Einstellung der Überhitzung am Regler bei unterschiedlichen Bedingungen. In der Regel wird die Überhitzung bei Trockenexpansionsanlagen auf 4 K bis 5 K eingestellt. Sie ist 2 K bis 3 K tiefer als bei einem thermostatischen Expansionsventil. Dadurch kann die Energieeffizienz der Anlage um ca. 5 % verbessert werden. Aus den oben erwähnten Gründen ist der Einsatz des elektronischen Expansionsventils dem thermostatischen Ventil vorzuziehen.
Die Dimensionierung und die Einstellung des Expansionsventils liegen in der Verantwortung des Kältemaschinenbauers.

Bild 5.28: Thermostatisches Expansionsventil.

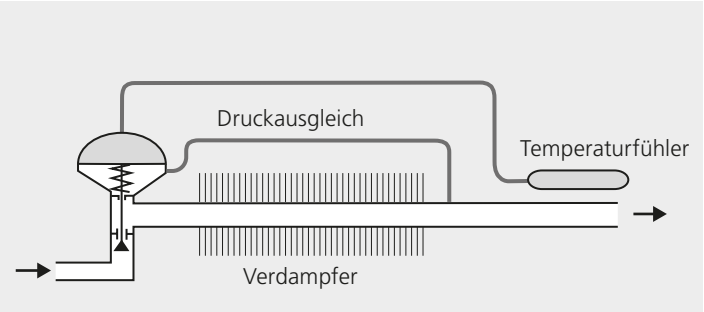
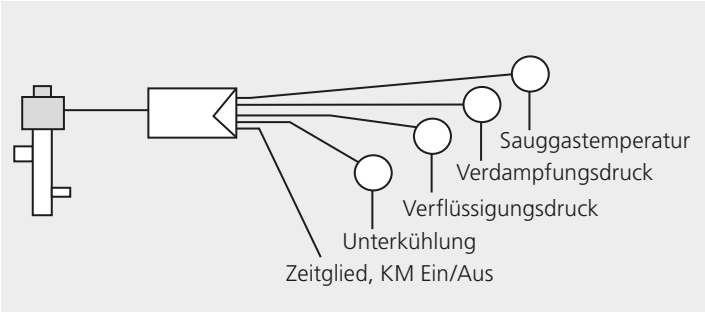


Bild 5.29: Für die Steuerung des elektronischen Expansionsventils können verschiedene Messgrössen beigezogen werden.



5.9 Weitere Komponenten

Filter-Trockner

Bei Anlagen mit synthetischen Kältemitteln kann in gewissen Fällen Wasser in den Kältemittel-Kreislauf gelangen: durch ungenügende Austrocknung der Neuinstallation, mit dem Kältemittel oder mit dem Öl. Wasser im Kältemittel kann zur Vereisung des Expansionsventils und zu Veränderungen der Betriebsstoffqualität führen. Bei hermetischen und halbhermetischen Verdichtern kann die Feuchtigkeit indirekt Wicklungsschäden am Elektromotor verursachen. Darum ist es wichtig, dass das Kältemittel immer «trocken» ist. Dies stellen die im Kältemittel-Kreislauf eingebauten Filter-Trockner sicher. Der Austausch der eingebauten Elemente liegt in der Verantwortung der Servicefirma.

Bei hermetisch geschlossenen Anlagen wird aus Kostengründen oft auf den Einbau des Filter-Trockners verzichtet.

Schauglas mit Feuchtigkeitsanzeige

Das Schauglas dient bei Anlagen mit synthetischen Kältemitteln zur visuellen Kontrolle der Systemfeuchtigkeit und Flashgasbildung (Gasbläschen) als Indiz für Kältemittelmangel, für den verschmutzten Filter-Trockner etc.

Das Schauglas erlaubt dem Kälte-Servicespezialist, die richtige Kältemittel-Füllmenge zu bestimmen.

Druckentlastungseinrichtungen

Kälteanlagen müssen durch Druckentlastungseinrichtungen (Sicherheitsventile) gegen zu hohen Druck geschützt werden (vgl. Norm SN EN 378-2).

Verdichter werden normalerweise mit Druckentlastungsventilen gegen zu hohen Druck geschützt. Dieser bläst auf die Saugseite ab.

Druckbehälter in Kälteanlagen müssen gegen zu hohen Druck mit Druckentlastungseinrichtungen geschützt werden. Das Ablassen des Kältemittels in die Atmosphäre über das Sicherheitsventil gilt als letzte Sicherheit zum Schutz des Behälters. Das Ablassen des Kältemittels erfolgt erst dann, wenn alle vorgelagerten Sicherheitsmassnahmen (wie etwa die Hochdruckabschaltung) den Druckanstieg nicht verhindern konnten. Bild 5.30 zeigt Beispiele von Druckentlastungseinrichtungen.

Die Sicherheitsventile müssen aufgrund der SVTI-Vorschriften in regelmässigen Zeitabständen geprüft werden.

Dies bedeutet, dass bei einem einfachen Sicherheitsventil bei einer Überprüfung der Behälter das Kältemittel aus dem entsprechenden Teil der Anlage abgesaugt werden muss, ein Ersatzventil eingebaut werden muss und das ursprüngliche Ventil zur Revision geschickt werden kann. Diese Arbeit ist sehr aufwendig. Die entsprechenden Kosten müssen beim Lieferanten angefragt werden, da sie sehr individuell sind.

Um diese Kosten zu reduzieren, lohnt es sich, bei Anlagen ab ca. 300 kW Kälteleistung und bei grösserem Kältemittelinhalt die Kältemaschine mit Doppelsicherheitsventilen ausrüsten zu lassen.

Das vorgelagerte Umstellventil sorgt dafür, dass nur ein Sicherheitsventil aktiv wird. Das inaktive Ventil kann deshalb demontiert und revidiert werden.

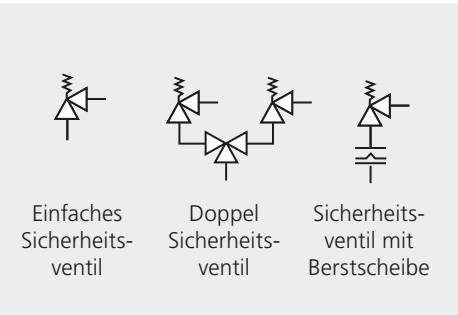


Bild 5.30: Arten der Druckentlastungseinrichtungen.

Bei den Druckentlastungeinrichtungen besteht jeweils die Gefahr, dass das Kältemittel durch Undichtheiten schleichend verloren geht. Um dies zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, Berstscheiben einzubauen (siehe Bild 5.30).
Aus Kostengründen kommt diese Variante allerdings nur bei Anlagen mit grossen Kältemittelfüllungen zur Anwendung.
Wenn die Druckentlastungsvorrichtung anspricht, dann wird das gasförmige Kältemittel abgeblasen. Durch das freigesetzte Kältemittel dürfen keine Personen und Sachen gefährdet werden (siehe SN EN 378). Bei kleinem Kältemittelinhalt der Maschine darf das Kältemittel nur dann in den Maschinenraum abgeblasen werden, wenn die Konzentration des Gases nicht den praktischen Grenzwert überschreitet. Hier ist die SN EN 378 zu befolgen.
Wird diese Bedingung nicht erfüllt, muss zwingend die sogenannte Abblasleitung ab Sicherheitsventil bis ins Freie installiert werden.

Diese ist nach EN 13136 zu berechnen. Für diese Berechnung ist der Planer auf die Unterstützung des Maschinenbauers angewiesen. Dabei spielen die Kältemittelart, der zulässige Gegendruck, der Druckverlust der Abblasleitung und die Ventilgrösse eine massgebende Rolle.
Bei der Installation ist darauf zu achten, dass die Kontrolle der Dichtheit der Einrichtung ohne grossen Aufwand immer möglich ist. Das Bild 5.32 zeigt eine mögliche Variante der Installation der Abblaseleitung mit Glycerin-Vorlage unter der Anwendung von synthetischen Kältemitteln.

Hinweis: Diese Lösung ist bei CO_2-Anlagen nicht erlaubt (gefährlich).

Bild 5.31: Eine mögliche Variante mit Glycerin-Vorlage und Schauglas, mit der die Dichtheit überprüft werden kann.

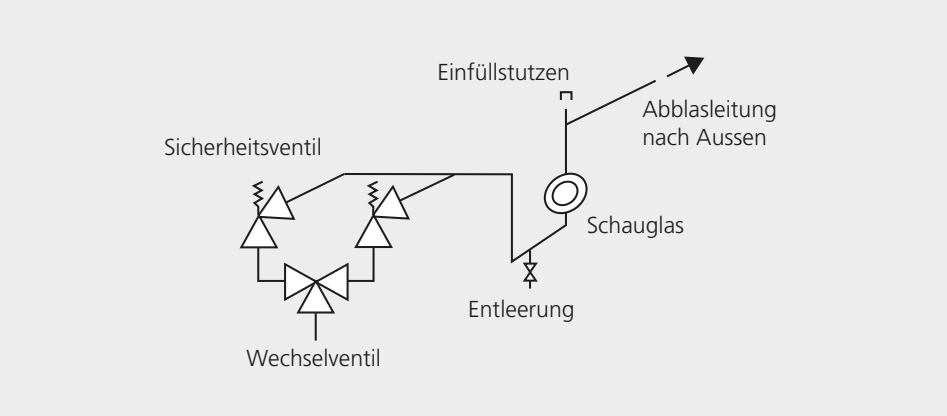


Bild 5.32: Einbau der Abblasleitung nach dem Sicherheitsventil.

5.10 Systemaufbau nach Verdampferart

Die Bauart einer Kältemaschine hat einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz und auf den Preis der Anlage. Entscheidend dabei ist die Verdampferart: die Trockenexpansion respektive der überflutete Verdampfer. Nachfolgend Beispiele basieren auf dem Rohrbündel-Wärmeübertrager.

System mit Trockenexpansion
Bei Trockenexpansion wird das Kältemittel im Verdampfer durch die Rohre geführt. Bei ölgeschmierten Verdichtern ist darauf zu achten, dass das Öl im Kreislauf mitzirkuliert. Um dies sicherzustellen, darf der Kältemittelvolumenstrom (entspricht der Kälteleistung) in der Regel nicht unter ca. 50 % reduziert werden. Bei Kältemaschinen, bei denen ein grösserer Regelbereich erforderlich ist, muss mit zwei getrennten Kreisläufen gearbeitet werden. Wird eine Kälteleistung von weniger als 50 % erforderlich, kann ein Kreis abgeschaltet werden.
Bei der Abschaltung eines Kreises wird die aktive Fläche der Wärmeübertrager – sowohl des Verdampfers, als auch des Verflüssigers – reduziert. Dies wirkt sich negativ auf die Energieeffizienz der Anlage aus.

Bild 5.33 zeigt eine Kältemaschine mit zwei getrennten Kreisläufen. Der Verdampfer ist auf der Kältemittelseite horizontal, der Verflüssiger ist hingegen vertikal geteilt. Es ist ebenfalls möglich, jeweils zwei separate Wärmeübertrager zu verwenden.

Wichtigste Vor- und Nachteile einer Kältemaschine mit getrennten Kreisläufen:
- Höhere Versorgungssicherheit: Beim Ausfall eines Kreises steht der zweite Kreis noch zur Verfügung (dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dies nicht bei einem Ausfall der Steuerung und Regulierung zutrifft).
- Billigere Lösung gegenüber Variante mit überflutetem Verdampfer
- Schlechtere Energieeffizienz bei Voll- und insbesondere bei Teillast

Weitere Details siehe auch die Gegenüberstellung der Verdampferarten.

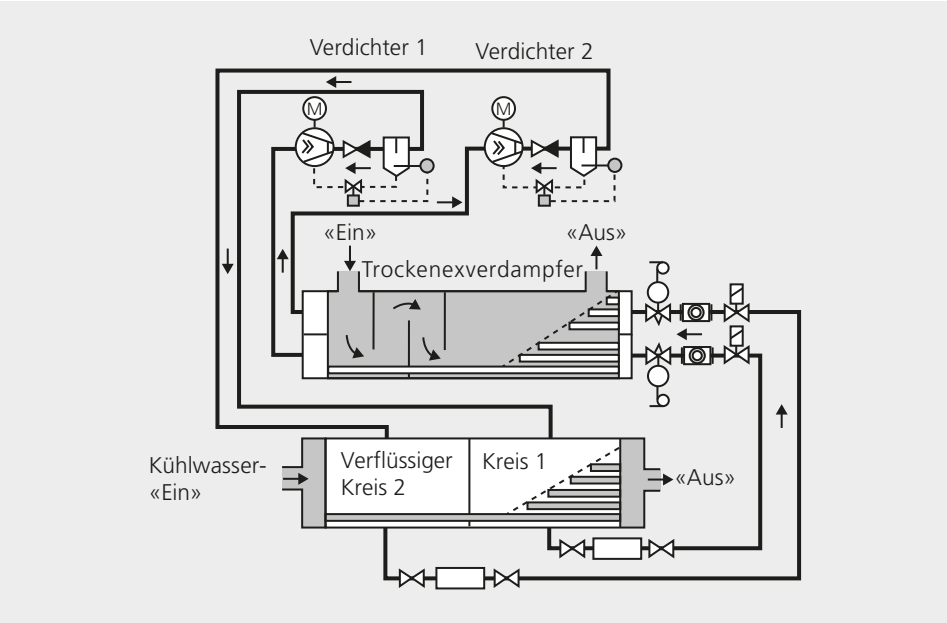


Bild 5.33: System mit Trockenexpansion mit zwei getrennten Kreisläufen.

System mit überflutetem Verdampfer
Bei überflutetem Verdampfer befindet sich das Kältemittel im Mantelraum des Wärmeübertragers. Bei ölgeschmierten Verdichtern ist über den ganzen Regelbereich sicherzustellen, dass das Öl im Kreislauf mitzirkuliert, d. h. es wird eine Ölrückführung aus dem Verdampfer benötigt. Der Verdampfer funktioniert nämlich wie ein Destillationsapparat, d. h. Kältemitteldampf wird oben abgesaugt und das Öl bleibt im Apparat zurück.
Bei reduzierter Last bleibt die volle Wärmeübertrager-Fläche aktiv. Dies führt zum Anstieg der Verdampfungstemperatur und zur Absenkung der Verflüssigungstemperatur. Der Verdichter muss dann eine kleinere Druckdifferenz überwinden, die Leistungszahl der Kältemaschine steigt entsprechend.

Bemerkung: Im Unterschied zu den synthetischen Kältemitteln mischt sich das flüssige Ammoniak nicht mit den üblichen Maschinenölen. Das Öl ist schwerer als NH_3. Im «Sumpf» des Abscheiders sammelt sich das Öl. Dieses wird mit einer Pumpe zum Verdichter zurückgeführt.

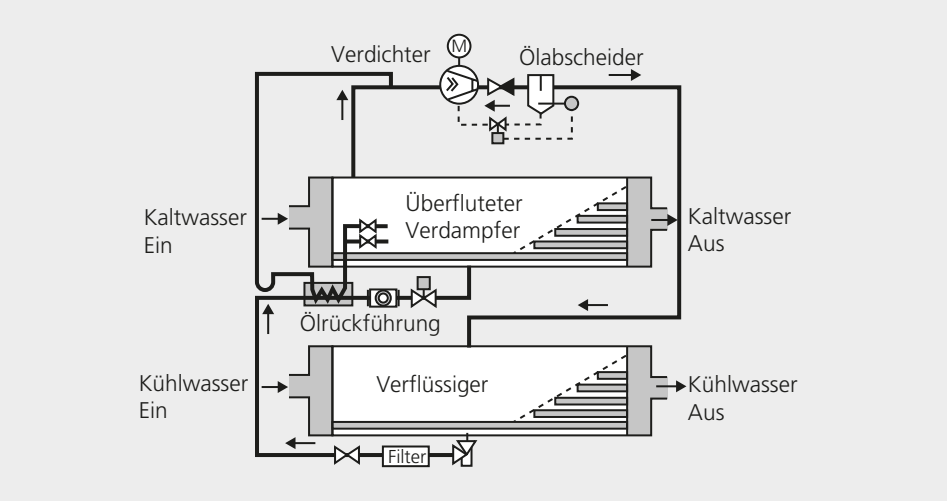


Bild 5.34:
System mit überflutetem Rohrbündel-Verdampfer mit synthetischen Kältemitteln.

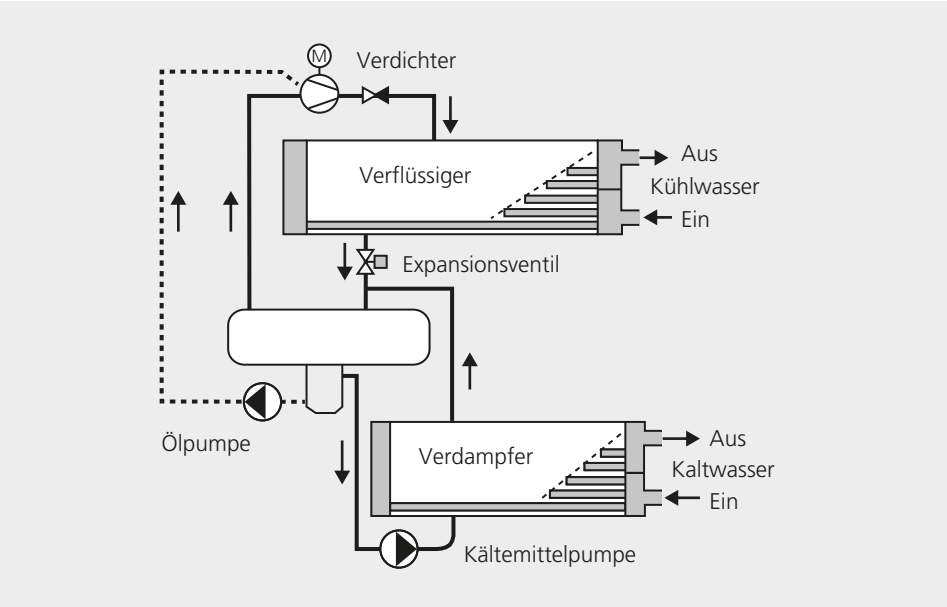


Bild 5.35:
System mit überflutetem Rohrbündel-Verdampfer mit Ammoniak als Kältemittel.

10 Merkpunkte zur Kälteerzeugung

1. Die wichtigsten Komponenten im Kältekreislauf sind Verdichter, Verflüssiger, Expansionsventil und Verdampfer.
2. Bei der Wahl der Kältemaschine sind die Gesamtkosten ausschlaggebend.
3. Der Regelbereich der Kältemaschine muss an die Betriebsbedingungen der Anlage angepasst werden.
4. Leistung und Effizienz des Verdichters sind von der Temperatur und der geforderten Last abhängig.
5. Drehzahlgeregelte Verdichter zeichnen sich durch optimale Energieeffizienz (Teillastverhalten) und reduzierte Abnutzung (tiefere Servicekosten) aus.
6. Die Kältemaschine muss gegen unzulässige Drücke geschützt werden.
7. Je nach Anwendung und unter der Berücksichtigung der Kosten setzt man unterschiedliche Bauarten ein. Man unterscheidet zwischen vollhermetischen, halbhermetischen und offenen Verdichtern.
8. Mit einem elektronischen Expansionsventil erreicht man eine höhere Energieeffizienz als mit einem thermostatischen, da die Temperaturen genauer eingestellt werden können.
9. Bei den Pumpen sollen – wenn zulässig – drehzahlgeregelte und damit effiziente Modelle eingesetzt werden.
10. Für die Garantien soll die Anlage bei Voll- und Teillastbetrieb überprüft werden.

Exkurs

Absorptionskältemaschine

Die mechanische Verdichtung der Kältemitteldämpfe wird in einer Absorptionskältemaschine durch eine «thermische Verdichtung» ersetzt. Weil die Anwendung eines «Absorbers» im Vergleich zur mechanischen Kälteerzeugung nicht sehr häufig zur Anwendung kommt, werden an dieser Stelle nur das Prinzip und die wichtigen Voraussetzungen für den sinnvollen Einsatz erläutert.

Die Arbeitsweise einer Absorptionskältemaschine (AKM) ähnelt insofern einer Kaltdampfkältemaschine, als sie ebenfalls einen Verdampfer, einen Verflüssiger und ein Expansionsorgan aufweist. Bei der Absorptionskältemaschine ersetzt jedoch ein Sorptionskreislauf mit einer Pumpe den mechanischen Verdichter.

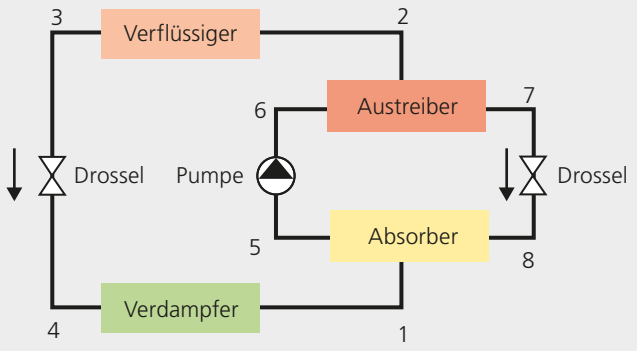
Der Absorber entspricht der «Saugseite» des Verdichters. In diesem Apparat absorbiert die Lösung, die reich an Absorptionsmitteln ist, den aus dem Verdampfer abgesaugten Kältemitteldampf. Dabei wird Wärme frei, welche abgeführt werden muss. Die Pumpe überwindet den Druckunterschied und fördert die Lösung vom Absorber zum Austreiber.

Im Austreiber wird die an Absorptionsmittel arme Lösung durch externe Wärmezufuhr erwärmt, wodurch der Kältemitteldampf ausgetrieben wird, um anschliessend im Verflüssiger verflüssigt zu werden. Der Austreiber entspricht somit der Druckseite des Verdichters. Die Lösung ist reich an Absorptionsmittel und fliesst über einen Lösungs-Regulierventil zum Absorber zurück. Die dem Austreiber zugeführte Wärmemenge entspricht der mechanischen Kompressionsarbeit. Der Leistungsbedarf der Druckerhöhungspumpe ist verhältnismässig klein.

Übliche Stoffpaare

- Ammoniak (Kältemittel) und Wasser (Sorptionsmittel)
- Wasser (Kältemittel) und Lithiumbromidlösung (Sorptionsmittel)

Eine Absorptionsmaschine erzeugt mit Wärme Kälte.



1–5 Absorption des Kältemittels im flüssigen Sorptionsmittel
5–6 Druckerhöhung
6–2 Im Austreiber dampft der grösste Teil des Kältemittels aus.
7–8 Das kältemittelarme Sorptionsmittel wird entspannt und zum Absorber zurückgeführt.
2–3 Verflüssigung des Kältemitteldampfes
3–4 Expansion
4–1 Verdampfung

Bild 5.36: Prinzip einer Absorptionskältemaschine.

Energetischer Vergleich von Absorptions- und Kompressionskälte

Die Energieeffizienz einer Absorptionskältemaschine wird durch die «Wärmezahl» beurteilt:

$$\varepsilon = \frac{Q_{Kälte}}{Q_{Austreiber}}$$

- Wärmezahlen für einstufige Prozess- respektive Heiztemperaturen zwischen 80 °C und 100 °C liegen im Bereich von 0,65 bis 0,75.
- Wärmezahlen für zweistufige Prozess- respektive Heiztemperaturen zwischen 150 °C und 180 °C liegen im Bereich von 1,10 bis 1,20.

Voraussetzungen für den sinnvollen Absorber-Einsatz

- Möglichst konstante Last (Grundlastabdeckung)
- Möglichst hohes Temperaturniveau für den Austreiber (ab 90 °C)
- Kombination mit Hochleistung-Sonnenkollektoren ist sehr sinnvoll, erfordert jedoch hohe Investitionskosten.
- Wärmeenergie zu einem günstigen Preis, vor allem Nutzung von Wärme aus KVA im Sommer, Wärme aus BHKW und andere Quellen. Die Beheizung direkt mit Öl oder Gas ist in der Regel nicht wirtschaftlich.

Als Faustregel gilt, dass die kWh Wärmeenergie ca. 6-mal günstiger sein muss als die kWh Strom.

Vorteile

- Kaum mechanischer Verschleiss
- Hohe Lebensdauer
- Minimale Wartungskosten
- Keine Schmierungsprobleme
- Kaum Geräuschentwicklung, sehr leise
- Verwertung von Abwärme, die mehr als 90 °C warm ist
- Einfache Regulierung

Nachteile

- Hohe Investitionskosten
- Grosser Kühlwasserverbrauch (grosser Rückkühler, Platzbedarf!)
- Arbeitsstoffgemisch H_2O/LiBr stark korrosiv, Betrieb im Vakuum
- Ammoniak ist stark giftig, teils explosiv.
- Gefahr von Kristallisation
- Schwer (hohes Gewicht)

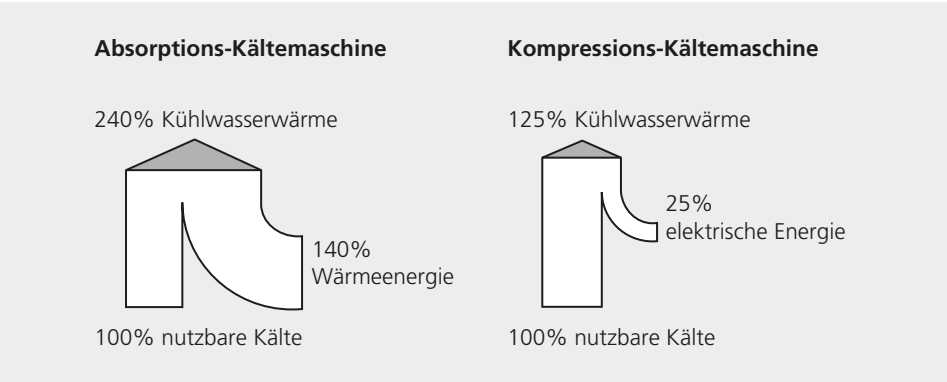


Bild 5.37: Energetischer Vergleich von Kompressions- und Absorptionskälte.

Kapitel 6

Wärmeaufnahme

Die Wärmeaufnahme ist effizient, wenn die Kühlung auf einem Temperaturniveau erfolgt, das nahe bei der angestrebten Raum- respektive Nutzungstemperatur liegt. Dabei hat die Planerin verschiedene Optionen für die unterschiedlichen Funktionen im Gebäude. Ausgangspunkt ist dabei stets die benötigte Temperatur.

6.1 Konzeptionelle Überlegungen

Für die Konzeption der Wärmeaufnahme müssen verschiedene Planungsvorgaben bekannt sein. Anhand eines Fragekatalogs können die wichtigsten Informationen zusammengestellt werden.

- Wofür wird die Kälte benötigt: Raumkühlung, Entfeuchtung, Teilentfeuchtung, Prozesskühlung etc.?
- Welche architektonischen und technischen Vorgaben gibt es?
- Welche (Kaltwasser-) Temperaturen werden benötigt?
- Was sind die optimalen Vor- und Rücklauftemperaturen auf die Verbraucher?
- Welchen Anteil haben die verschiedenen Temperaturen an der Gesamtkälteerzeugung?
- Gibt es natürliche Kühlquellen, die verwendet werden können?

Kaltwassertemperatur
=
Kältekreis-Vorlauftemperatur

Ausgangspunkt: Nutztemperatur
Die Nutztemperatur, die für bestimmte Funktionen oder Anwendungen benötigt wird, bestimmt die Kaltwassertemperatur. Die Nutz-Endtemperatur kann z. B. eine Raumtemperatur von 26 °C, eine Zulufttemperatur von 20 °C oder eine Taupunkt-Entfeuchtung sein.

Kaltwassertemperatur
Anhand der Nutz-Endtemperatur wird deutlich, dass es nicht eine, möglichst tiefe Kaltwassertemperatur für alle Funktionen geben soll, wie dies früher oft der Fall war. Vielmehr braucht es nutzerspezifische Kaltwassertemperaturen, die nahe an der jeweiligen Anwendung liegen sollten. Grundsätzlich gilt, dass hohe Kaltwassertemperaturen eine hohe Effizienz der Kälteproduktion ermöglichen.

Kühlquellen
Die Kälte stammt von einer Kältemaschine oder von natürlichen Kühlquellen wie Erdsonden, Luft, See- oder Grundwasser. Arbeitet das Kühlsystem mit hohen Kaltwassertemperaturen (Kälteträger-Temperaturen) können die natürlichen Kühlquellen mehr zur Kühlung beitragen oder diese ganz abdecken (Vollabdeckung).
In der ersten Phase des Konzepts werden alle «Kühlbedürfnisse» mit den entsprechenden Leistungsanforderungen definiert. Dazu gehören:

- Kühlung in Lüftungsanlagen (Luftkühler)
- Technische Kühlung von Apparaten
- Kühlung für spezielle Güter etc.
- Raumkühlung für Behaglichkeit

Ein weiterer Punkt wären noch die Prozess- und Industriekälteanwendungen, welche in diesem Fachbuch nicht behandelt werden.

Maximale Raumtemperaturen sind massgebend
Die für die Kühlung massgebende Anforderung ist die benötigte Raumtemperatur mit dem jeweiligen Höchstwert, der garantiert, d. h. nicht überschritten werden darf. Diese Temperatur wird meist durch technische Anlagen (Elektroräume, Serverräume, Labors etc.) oder durch spezielle Güter (Kulturgüter in Museen) vorgegeben.

Nutzer-Anforderungen an die Raumtemperatur, die für mehr Behaglichkeit sorgen, werden gemäss Energie- und Arbeitsgesetz als Komfortkühlungen definiert. Bei der Planung muss geklärt werden, ob die Kühlung auf Personen einwirkt oder nur technischer Natur ist. Sobald die Kühlung längere Zeit auf Personen wirkt (d. h. bei einem Aufenthalt während 6 bis 8 Stunden im Raum), sind die Behaglichkeitsanforderungen (siehe Bild 6.2) zwingend einzuhalten.

Folgende Systeme gelten nicht als eine Kühlung im Sinne des Energiegesetzes – obwohl sie auch zum Kühlen genutzt werden:

- Nutzung der kalten Seite bei einem Wärmepumpenbetrieb zu Heizzwecken, wenn 100 % der Wärme genutzt wird.
- Umweltkühlungen mit natürlichen Kühlquellen (Aussenluft, Erdreich, Grundwasser, Oberflächengewässer usw.)

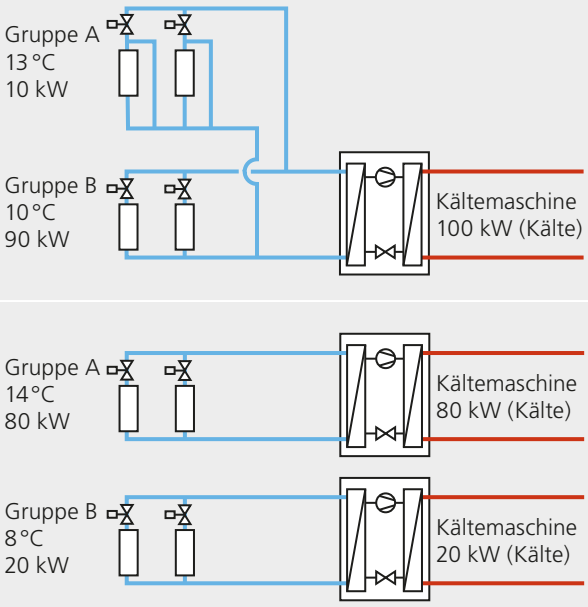
Kaltwassertemperaturen definieren

Aufgrund der diversen Kältebedürfnisse definiert die Planerin als Erstes die primäre Kaltwassertemperatur. Falls eine Kaltwassertemperatur für das ganze System aus energetischer Sicht nicht sinnvoll respektive nicht zulässig ist, werden die einzelnen Kaltwassertemperaturen aufgelistet. Gibt es Kaltwassertemperaturen, die mehr als 4 K auseinander liegen, sind zwei Kältemaschinen mit unterschiedlichen Temperatur-Niveaus nötig. Oder es werden zwei Kältespeicher mit entsprechenden Ladetemperaturen geplant. Dies vor dem Hintergrund, dass eine um 4 K höhere Temperatur einer Effizienzverbesserung von rund 11 % entspricht.

Temperatur-Unterscheidungen sollen für Gesamtleistungen über 100 kW Kälte angeschaut werden. Nebst der Temperaturdifferenz von 4 K ist auch der Anteil eines Kälteverbrauchers mit anderer Kaltwassertemperatur an der Gesamtleistung massgebend (Bild 6.1). Ist der Anteil an der Gesamtleistung gering, kann auf ein zweites Erzeuger-System mit einer zweiten Temperatur verzichtet werden.

Bild 6.1: Beispiel Verbrauchergruppen mit unterschiedlichen Kaltwassertemperaturen.

	Kaltwasser-temperatur	Anteil an der Leistung	Leistung $\dot{Q}_{Kälte}$
Fall A			
Gruppe A	13 °C	10 %	10 kW
Gruppe B	10 °C	90 %	90 kW
Total			100 kW
Lösung	1 Kältemaschine 100 kW mit 10 °C. Die Temperaturdifferenz beträgt nicht mehr als 4 K. Zudem haben die «wärmeren» Kälteverbraucher mit 10 % Anteil einen untergeordneten Anteil an der Gesamtleistung.		
Fall B			
Gruppe A	14 °C	80 %	80 kW
Gruppe B	8 °C	20 %	20 kW
Total			100 kW
Lösung	2 Kältemaschinen 20 kW und 80 kW. Die Temperaturdifferenz beträgt mehr als 4 K (6 K), eine zweite Kältemaschine ist notwendig. Zudem machen die «kälteren» Verbraucher mit 20 % Anteil einen wesentlichen Anteil an der Gesamtleistung.		



Regulierung der Kälte-Gruppen
Die Kälte-Gruppen sind mit Vorlauftemperatur-Regulierungen auszurüsten, damit immer entsprechend hohe Rücklauftemperaturen resultieren. Weiter sind die Verbraucher für ein effizientes Kaltwassernetz mit Mengenregulierungen (Durchgangsventile) auszurüsten.
Zu beachten: Umlenkventile sind eine schlechte Lösung, da sie im Kaltwassernetz «tiefe Rücklauftemperaturen» erzeugen, die Effizienz der Kälteerzeugung verschlechtern und zudem zu einer Kälteleistungsreduktion führen.

6.2 Wärmeaufnahme-Systeme

Kaltwassertemperaturen
Wärmeaufnahme-Systeme führen Raumlasten (Wärme) ab. Durch die im Raum freigesetzten Lasten lassen sich die möglichen und erreichbaren Raumtemperaturen ableiten.
Die Wärmeaufnahme-Systeme sind in der SIA 382/1 (2014) (Lüftungs- und Klimaanlagen) durch Kaltwassertemperaturen definiert. Die Kaltwassertemperaturen sind folgendermassen gegliedert:

Kühlen mit kontrollierter Entfeuchtung
Früher wurden alle Kälteanlagen mit 6 °C/12 °C (6 °C Kälteträger-Vorlauf und 12 °C Kälteträger-Rücklauf) auf die technisch tiefste Kaltwassertemperatur ausgelegt. Daher gibt es immer noch alte Kälteanlagen mit diesen Kaltwassertemperaturen für Bürogebäude und Komfortanforderungen.
Zu beachten ist: Bei Kaltwassertemperaturen von 10 °C muss der Luftkühler – je nach Luftfeuchtegehalt – für die Wasserausscheidung eine bis zu 30 % grössere Leistung erbringen.
Eine Kaltwassertemperatur ab 6 °C darf gemäss Energiegesetz nur noch für zwingend notwendige Entfeuchtungsprozesse eingesetzt werden und braucht eine entsprechende Bewilligung. Nötig ist dies etwa in Museen, in der Industrie (Papier, Pharma etc.) oder generell für Räume mit tiefen Raumtemperaturen (z. B. Kühlräume mit 15 °C bis 18 °C in der Lebensmittelverarbeitung, in Kühllabors etc.). Zu beachten ist, dass die Luftentfeuchtung nicht nur mit tiefen Kaltwassertemperaturen erreicht werden kann, sondern auch durch Anwendung von Absorbtions-Prozessen[1]. Zudem kann man durch Heizen die relative Feuchte reduzieren, da warme Luft mehr Feuchte aufnehmen kann und diese von der zu entfeuchtenden Luft übernimmt.[2]

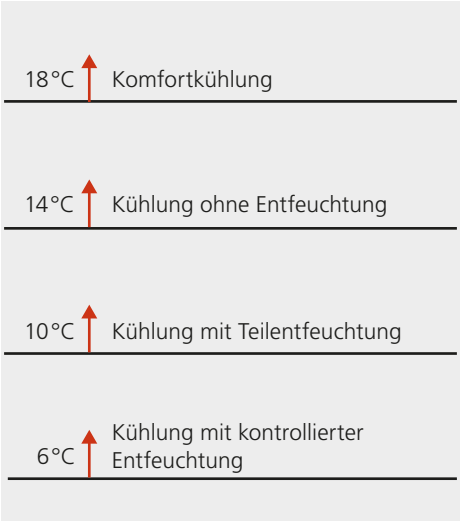


Bild 6.2: Für die aufgeführten Verwendungszwecke der Kälte dürfen die vom SIA vorgegebenen Kaltwassertemperaturen nicht unterschritten werden.

Kühlen mit Teilentfeuchtung
Bei Lüftungsanlagen, die mit Kaltwassertemperaturen ab 10 °C gekühlt werden, spricht man von nicht garantierter Teilentfeuchtung. Die Luft wird mit dem Kaltwasser auf die Zulufttemperatur von beispielsweise 18 °C gekühlt. Dabei findet am Kühler zeitweise eine Taupunktunterschreitung mit entsprechender Kondensation statt. Diese Teilentfeuchtung ist bei Raumkühlungen vorteilhaft, die nicht durch Kondensation abgeschaltet werden sollten (z. B. Kühldecken, Flächenkühlungen). Die Notwendigkeit des Einsatzes einer Kaltwassertemperatur von 10 °C für Raumkühlungen muss im Bewilligungsverfahren

1 Die Absorbtion erfolgt mit zwei Luftvolumenströmen. Dabei wird dem Zuluftstrom mit einem «Feuchterad» Feuchte entzogen und diese auf die Abluft (Regenerationsluft) übertragen.
2 Die Kühlung durch Trocknung und Verdunstung wird in der Fachsprache auch DCS (Desiccant Cooling Systems) oder DEC (Desiccative and Evaporative Cooling) bezeichnet.

nachgewiesen werden (Energiegesetz nach SIA 382/1 (2014) als Auflage). Sie ist zum Beispiel nötig für Prozesse oder Kühldecken für Raumkühlungen, die Raumtemperaturen von 20 °C oder weniger benötigen. Solche tiefen Raumtemperaturen können nie mit reinen Komfortbedingungen begründet werden, sondern nur mit technisch erhöhten Anforderungen.

Kühlen ohne Entfeuchtung

Eine Kaltwassertemperatur von 14 °C ist bei Lüftungsanlagen energetisch optimal, weil nahezu keine zusätzliche latente Leistung als Folge von Wasserausscheidungen am Luftkühler gebraucht wird. Der Nachteil einer Kaltwassertemperatur von 14 °C ist, dass bei Lüftungsanlagen die Zuluft eine höhere Luftfeuchtigkeit aufweist. Hohe Luftfeuchtigkeit von mehr als 65 % wird in den Räumen als nicht behaglich wahrgenommen, da die Raumlufttemperatur gesamthaft als «schwül» und zu warm empfunden wird.

Komfortkühlung

Alle Flächenkühlungen (Kühldecken, Bodenheizung, TABS usw.) werden mit Kaltwassertemperaturen ab 18 °C bis 22 °C betrieben. Mit dieser Vorlauftemperatur ist eine Oberflächen-Kondensation mit kontrollierter Lüftung vermeidbar. Ohne mechanische Lüftung kann es bei hoher Luftfeuchtigkeit (ohne Kondensat-Sicherung) zu Kondensationen an den Oberflächen kommen. Mit der Kaltwassertemperatur von 18 °C sind Raumtemperaturen um 24 °C nur bedingt zu erreichen – es werden damit Raumtemperaturen um 26 °C erreicht. Umluftkühler (vgl. weiter unten) können ebenfalls mit 18 °C betrieben werden, aber hier kann es bei hohen Feuchtelasten (z. B. Raumlufttemperatur von 25 °C und relative Feuchte von 50 %) im Raum trotzdem zu Kondensat-Ausscheidung kommen. In diesem Fall muss die Kaltwasser-Vorlauftemperatur erhöht werden, wodurch sich auch die Raumtemperatur erhöht.

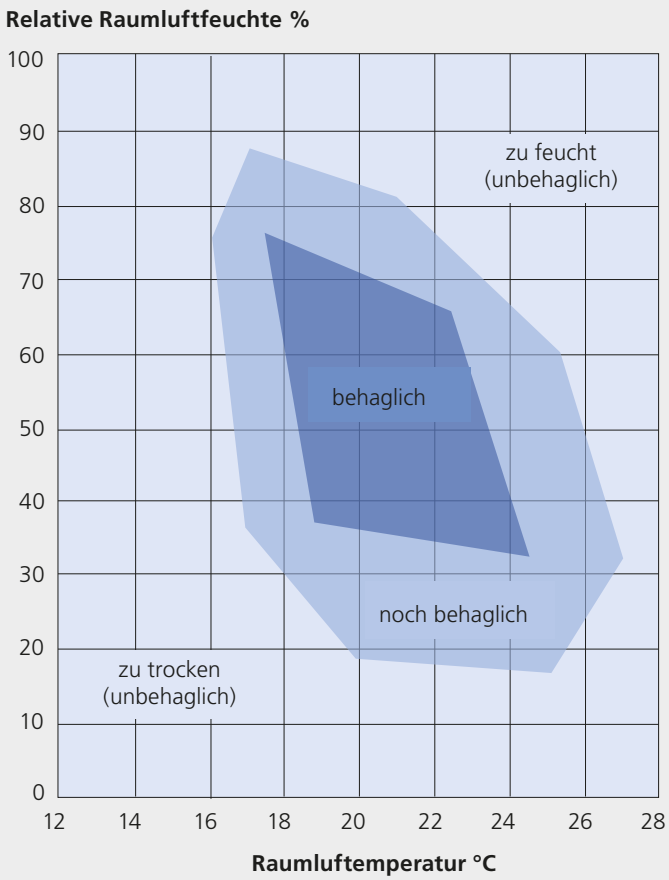


Bild 6.3: Die Behaglichkeit (Wohlfühltemperatur) ist abhängig von der Raumlufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit.

Klimakonvektoren

Bei bestehenden Bauten sieht man hie und da noch Klimakonvektoren. Diese wurden in den 1980er-Jahren in vielen Bürobauten eingesetzt. Entsprechend trifft man sie bei Sanierungen an. In Neubauten werden sie kaum noch eingesetzt.

Die Klimakonvektoren werden unter dem Fenster in die Brüstung installiert. Klimakonvektoren können lüften, heizen und kühlen und sind hoch effizient. Es sind folgende Themen zu beachten: Geräusche, Luftzug und Brandschutz. Klimakonvektoren gibt es in zwei Bauarten:

- mit integriertem Ventilator
- mit direkt über Düsen zugeführter Zuluft, welche Sekundärluft anzieht und diese durch den Wärmetauscher in den Raum ausbläst.

Bei Modellen mit integrierten Ventilatoren ist der Schall oft ein Problem. Der Vorteil ist, dass die Zuluft in den Raum vom Klimakonvektor entkoppelt ist. Es muss keine Lüftungsleitung auf den Konvektor geführt werden.

Modelle, bei denen die Zuluft in den Klimakonvektor geführt wird, sind sehr geräuscharm. Oft wird aus architektonischen Überlegungen die Zuluft vom unteren Geschoss in den Konvektor eingebracht. In diesem Fall muss dem Brandschutz grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden, da Luftkanäle Brandabschnitte durchdringen.

Bei beiden Bauarten wird die kühle oder warme Luft über die Brüstung am Fenster in den Raum eingebracht. Da die Brüstung ein beliebter «Ablageplatz» ist, finden sich hier oft Gegenstände wie Papierstapel oder Blumen. Dadurch kann die Luft nicht mehr frei zirkulieren und der Klimakonvektor funktioniert eingeschränkt oder gar nicht mehr.

Zudem wird im Sommer die Luft direkt am Konverter sehr stark abgekühlt und es entstehen Zugserscheinungen. Viele Nutzer empfinden dies als unangenehm und reklamieren.

Zu beachten ist zudem: Damit Klimakonvektoren mit einem Lüftungsanschluss kühlen können, muss zwingend die Lüftung in Betrieb sein.

Bild 6.4: Klimakonvektor, diskret im Boden eingelassen. (Quelle: Allco Allenspach AG)

Bild 6.5: Details eines im Boden eingelassenen Klimakonvektors mit Primärlufteinführung. (Quelle: Allco Allenspach AG)

Bild 6.6: Klimakonvektor ohne Ventilatoren (Induktionsgeräte) arbeiten geräuscharm. (Quelle: Swegon)

Umluftkühler

Die Umluftkühler sind die kosteneffizientesten Raumkühler. Sie werden in Räumen ohne Behaglichkeitsanforderung eingesetzt. Da Umluftkühler mit grossen Luftvolumenströmen und tiefen Zulufttemperaturen arbeiten, sind sie sehr «kompakt».

Bei Umluftkühlern an Innenwänden und Brüstungen sowie bei Deckengeräten muss darauf geachtet werden, dass anfallendes Kondensat abgeführt werden kann. Dies geschieht am besten in einem Entwässerungsstrang mit Gefälle. Alternativ können kleine Kondensatpumpen eingesetzt werden; doch diese sind anfällig. Es muss sichergestellt werden, dass sie für Wartung, Instandstellung und Ersatz gut zugänglich sind. Denn bei einem Ausfall der Kondensatpumpe wird der Umluftkühler gesperrt.

Flächenkühlsysteme
In Bezug auf die Behaglichkeit haben sich die Flächenkühlsysteme in den letzten Jahren durchgesetzt. Sie werden als sanfte und angenehme Kühlung wahrgenommen, da die Raumluft nicht aktiv bewegt wird. Die Kühlung beruht primär auf der Oberflächenstrahlung. Die Temperatur wird dabei um bis zu 2 K tiefer empfunden, als sie effektiv ist.
Bei Flächenkühlsystemen kann somit mit hohen Kaltwassertemperaturen (18 °C, 20 °C oder 22 °C) eine Oberflächentemperatur erbracht werden, die nahe an der gewünschten Raumtemperatur liegt.

Kühldecken
Kühldecken sind eine effiziente, schnell reagierende Kühllösung. Allerdings müssen die nutzbare Fläche und besonders die Kondensatbildung beachtet werden.
Damit an der Kühldecke kein Kondensat entsteht, gibt es verschiedene Hebel:

- Einbau einer kontrollierten Raum-Lüftung mit Teilentfeuchtung der Zuluft.
- Zwingender Einbau eines Kondensatwächters, der die Kühldecke «abschaltet», sobald die Luftfeuchtigkeit einen kritischen Wert überschreitet.
- Ansteuerung und bei Bedarf Anhebung der Vorlauftemperatur der Gruppe «Kühldecke» über die Taupunkttemperatur. Die Anhebung führt gleichzeitig zu einer höheren Temperatur in den Räumen.

Bei der Auslegung von Kühldecken sind Doppelnutzungen und Deckeneinbauten zu beachten, wie etwa Beleuchtungskörper, Bewegungs- und Brandmelder, Beamer oder Lautsprecher. Sie können die effektiv nutzbare Kühlfläche erheblich reduzieren.
Die Kühlleistungen von Kühldecken betragen 50 W/m^2 – 80 W/m^2. Mit konvektiven «Hochleistungssystemen» können sogar Spitzenleistungen von bis zu 130 W/m^2 erreicht werden. Bei solch hoch getrimmten Systemen empfiehlt es sich, die Situation mit dem Lieferanten genau anzuschauen, ob die sehr hohe Kühlleistung erreicht wird.

TABS und selbstregulierende Bodenkühlungen
Thermoaktive Bauteilsystemen (TABS) oder selbstregulierende Bodenkühlungen werden mit Vorlauf-Temperaturen von ca. 21 °C betrieben. Mit diesen Systemen können Sollwerte der Raumtemperaturen nicht garantiert werden.
Der Ganztagesbetrieb ermöglicht, dass Leistungsspitzen (z. B. über Mittag) durch eine konstante und dadurch geringere Dauerleistung reduziert werden können. Dieser Lastausgleich führt jedoch zu stark variierenden Raumtemperaturen (z. B. am Morgen 23 °C und am Abend 26 °C).
TABS und selbstregulierende Bodenkühlungen zählen zu den energetisch effizientesten Wärmeaufnahme-Systemen. Zudem ist mit diesen Systemen in der Übergangszeit eine Energieverschiebung innerhalb des Gebäudes von Raum zu Raum und vom Tag in die Nacht möglich.

6.3 Übersicht Kühlsysteme

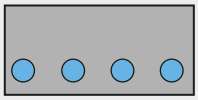
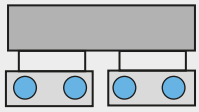
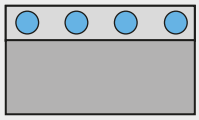
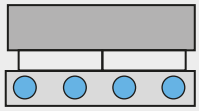
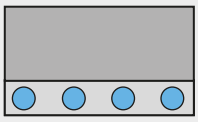
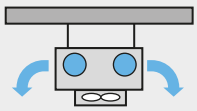
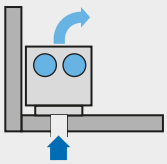
Wärme-Entzug mit Kaltwasser	Funktion	Skizze	Vorteile	Nachteile
Bauteilkühlung				
Thermoaktive Bauteilsysteme TABS	Bauteilkühlung mit Masseaktivierung		kostengünstige, stille Kühlung nach oben und nach unten, bis 30 W/m²	teilweise unkontrollierte Kühlung; Integration im Betonbauteil. Die freie Decke kann bezüglich Schall problematisch sein.
Kühlbalken; Kühlbaffel	Kühlpanel mit oder ohne Primärluft		grössere Leistung auf kleinstem Raum; nur teilweise Deckenbelegung und dadurch Aktivierung der Decke als dämpfenden Speicher	partiell geringere lichte Raumhöhe; Zugserscheinungen bei Systemen mit Primärluft möglich
Fussbodenheizung	Die Fussbodenheizung wird im Sommer zur Kühlung genutzt (nur «Temperierung»)		kostengünstige, stille Kühlung, platzsparend, im Raum kaum sichtbar	geringe Leistung, Taupunkt der Raumluft darf nie unterschritten werden (Schäden z. B. an Holzböden)
Kühldecken				
Kühldecke unterhalb der Decke	offen, mit Bauteilaktivierung, konvektive Decke		stille Kühlung; teilweise Aktivierung der Speichermasse je nach freiem Querschnitt (> 50 %)	schwierige Reinigung; geringere lichte Raumhöhe
Kühldecke, mit der Decke verbunden	geschlossen, minimale Masseaktivierung. Bei Doppeldecken keine Masseaktivierung		kostengünstige, stille Kühlung; platzsparend, im Raum kaum sichtbar	direkte Masseaktivierung möglich
Umluftkühler				
Umluftkühler	Ventilator mit Kühlregister		mit Kondensatablauf: grosse Leistung, kostengünstige Lösung	Schallemission im Raum; Trockenkühlung mit begrenzter Leistung; Servicekosten, grosse Luftbewegungen (Zugserscheinungen)
Anlagen aus dem Bestand (nur bei Sanierungen)				
Brüstungsgerät	Induktionsgerät mit Primärluft oder Ventilator		grössere Leistung auf kleinstem Raum; ein Element für Beheizung, Kühlung und mit Primärluft Lüftung	teilweise Zugserscheinungen, Schallemission, energetisch aufwendiger; Brüstung muss geplant werden, Servicekosten

Bild 6.7: Verschiedene Kälteabgabesysteme. (In Anlehnung an die Tabelle im Fachbuch Gebäudetechnik; von Euw, Alimpic, Hildebrand, 2012)

6.4 Hydraulische Einbindung

Bei der hydraulischen Einbindung der Wärmeaufnahme-Systeme (Verbraucher) ist Folgendes zu beachten:

- Die Vorlauftemperatur jedes Verbrauchers muss auf die definierte Temperatur reguliert werden.
- Je höher die Rücklauftemperatur, desto besser.
- Die Leistung sollte möglichst durch eine Mengensteuerung (Durchgangsventile) reguliert werden.

Wichtig: Die Leistungsregulierung sollte nie mit Umlenkventilen erfolgen, weil sie einen konstanten Volumenstrom aufweisen. Dies führt zu tiefen Rücklauftemperaturen und verschlechtert damit die Effizienz der Kältemaschine, da die Kälteleistung nicht mehr (optimal) abgegeben werden kann.

Hinweis: In vielen Umluftkühlgeräten ab Stange sind standardmässig Umlenkventile eingebaut. Bei diesen Modellen empfiehlt es sich, das Umlenkventil auszubauen und durch ein Durchgangsventil zu ersetzen.

Um Verbraucher mit variablen Volumenströmen optimal zu betreiben, braucht es eine hydraulische Entkopplung zwischen Verbraucher und Kältemaschine.

Wichtig: Kältemaschinen benötigen im Betrieb immer einen minimalen Volumenstrom. Dies gilt auch bei leistungsvariablen Kältemaschinen. Ändern sich die Volumenströme über die Kältemaschine sehr schnell (variable Verbrauchervolumenströme) kommen auch leistungsvariable Kältemaschinen an ihre Grenzen.

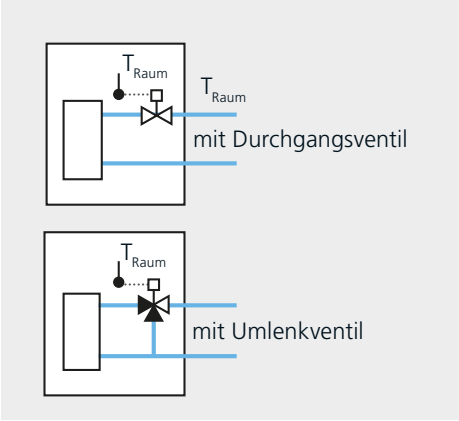


Bild 6.8: Umluftkühlgerät mit Durchgangsventil und mit Umlenkventil. Das Ventil wird durch Raumfühler (T_{Raum}) angesteuert.

Einbindung Kühlsysteme

Verbraucher benötigen immer eine Vorlauftemperatur-Regulierung. Sie stellt sicher, dass es im Verbrauchernetz nicht zu grossen Temperatur-Schwankungen bei den Vor- und Rücklauftemperaturen mit entsprechenden Volumenstrom-Schwankungen kommt. Mit der Vorlauftemperatur-Regulierung an den Kälte-Gruppen (Einspritzschaltung) wird die Rücklauftemperatur «hochgehalten», woraus eine bessere Effizienz der Kältemaschine resultiert. Auch bei Systemen mit nur einem Verbraucher sollte aus Kostengründen nicht auf die Vorlauftemperatur-Regulierung verzichtet werden. Auf eine Vorlauftemperatur-Regulierung kann ausnahmsweise verzichtet werden, wenn nur Kühler einer Lüftungsanlage angeschlossen werden, die für eine Teilentfeuchtung der Luft sorgen. Denn die Austrittstemperatur aus der Kältemaschine kann trotz variabler Leistungsregulierung zu wenig genau reguliert werden.

Einbindung Trockenkühler (Luftregister)

Verbraucher für «Trockenkühlung» benötigen zwingend eine Vorlauftemperatur-Regulierung. Sie stellt sicher, dass es nicht zu einer Kondensation (Wasserausscheidung) an den Verbrauchern kommt.

Auslegungstemperaturen
Die Kältemaschinen werden meist mit einer Temperaturspreizung (Vor- und Rücklauftemperatur) von 6 K ausgelegt. Haben die Verbraucher geringere Temperaturdifferenzen, muss im Verdampfer-Kreislauf mit höheren Volumenströmen gearbeitet werden, damit die Kälteleistung transportiert werden kann. Die grösseren Verbraucher-Volumenströme führen sonst zu einem unerwünschten «Hochmischen» der Kaltwassertemperatur nach der Kältemaschine. Das ist ein hydraulisches Problem und kein Leistungsproblem der Kältemaschine.
Die Temperaturdifferenzen zwischen der Vor- und Rücklauftemperatur der Verbraucher sind je nach Anwendung unterschiedlich. Bei Systemen mit einer Vorlauftemperatur

- von mehr als 20 °C arbeitet man mit Temperaturdifferenzen von 3 K
- von weniger als 14 °C arbeitet man mit Temperaturdifferenzen von 6 K
- zwischen 14 °C und 20 °C liegen die Temperaturdifferenzen im Bereich von 3 bis 6 K

Zu beachten: Hohe Rücklauftemperaturen können nebst der Verbesserung der Effizienz auch zu Problemen führen. Zu hohe Eintrittstemperaturen in die Kältemaschine führen zu Störungen (Hochdruckstörung). Damit dies nicht geschieht, muss die maximal zulässige Eintrittstemperatur in die Kältemaschine begrenzt werden. Dies kann hydraulisch einfach mit einer Eintrittsregulierung gelöst werden (vgl. dazu Kapitel «Hydraulische Systeme»).

6.5 Alternative Kühlsysteme

Natürliche Kühlquellen schneiden bezüglich Energieeffizienz am besten ab. Die wichtigsten Quellen:

- Geo-Cooling (Erdreichkühlung, Grundwasser)
- Aqua-Cooling (Seewasser und Flusswasser)
- Free-Cooling (Luftkühlung)

Bei natürlichen «Kühlquellen» spielt die Dynamik der Jahreszeiten mit den verschiedenen Temperaturen eine wichtige Rolle für Konzeption und Planung.
Alle natürlichen Kühl- und Wärmequellen können sowohl im Sommer zum Kühlen wie auch im Winter zum Heizen genutzt werden (Nutzung als Energiequelle im Wärmepumpenbetrieb).

Kühlen über das Erdreich (Geo-Cooling)

Für die Nutzung des Erdreichs zur Kühlung werden bis zu 250 Meter lange Erdsonden in die Tiefe getrieben. Über die Erdsonden wird im Sommer Wasser abgekühlt. Zu beachten ist, dass pro 100 Meter Tiefe die Erdtemperatur um rund 3 K zunimmt.
Das Erdreich um die Sonden herum wirkt wie ein träger Saison-Speicher. Die Temperaturen verändern sich dabei übers Jahr. In der Regel ist das Erdreich um die Sonden im April am kühlsten (z. B. 4 °C). Im Sommer, wenn das Erdreich zur Kühlung genutzt wird, erwärmt es sich (z. B. auf 18 °C im August). Wichtig ist, dass im Winter die gleich grosse Energiemenge, wie im Sommer eingelagert wurde, wieder entzogen wird. Um sichere Aussagen machen zu können, ist eine Erdsonden-Simulation notwendig.
Die Kühlleistung einer Erdsonde ist somit beschränkt. Benötigt man eine konstante Kaltwassertemperatur über das ganze Jahr (z. B. max. 14 °C), muss die Kühlung ab einer gewissen Sondentemperatur von einer Kältemaschine übernommen werden.

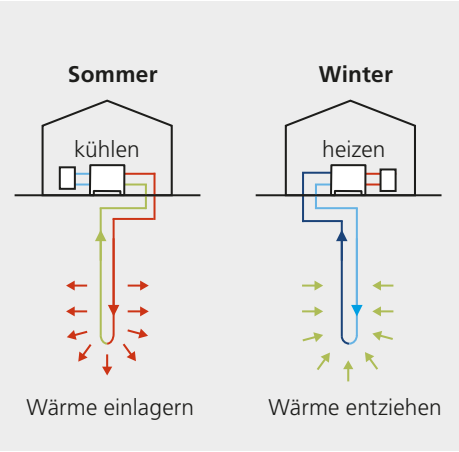


Bild 6.9: Kühlung über die Erdsonde im Sommer (Wärmeeintrag) und Heizen im Winter (Wärmeentzug).

Kühlen mit Seewasser

Verwendet man Seewasser für Kühlzwecke, wird das Wasser in einer Tiefe von rund 30 Meter gefasst. Die effektiv notwendige Tiefe hängt von den lokalen Bedingungen und vom Temperatur-Jahresgang des Sees ab. Folgende Punkte müssen beachtet werden:

- Die Nutzung ist konzessions- und bewilligungspflichtig.
- Seewasser in 30 Meter Tiefe, das im März eine Temperatur von 4 °C aufweist, kann sich je nach Situation bis Ende Sommer auf über 10 °C erwärmen.
- Allenfalls gibt es eine maximale Temperatur für das nach der Kühlung zurückgeleitete Wasser (z. B. max. 30 °C).
- Es müssen Vorkehrungen zum Schutz der Fische getroffen werden (max. Maschenweite der Wasserfassungen, Strömungsgeschwindigkeit etc.).
- Oft wird ein Nachweis verlangt, dass die Wärme nicht genutzt werden kann.

Hinweis: Bei der Nutzung von Seewasser muss darauf geachtet werden, dass Wandermuscheln respektive ihre Larven nicht über die Ansaugleitung in die Wärmeübertrager wandern. Muscheln in den Wärmeübertragern führen zu Störungen und erhöhen den Wartungsaufwand. Für eine Seewasserfassung müssen daher rückspülbare Spezialfilter, Reinigungsvorrichtungen und ein genügend grosser Plattenabstand im Wärmetauscher geplant werden.

Kühlen mit Grundwasser
Grundwasser hat sehr konstante Wassertemperaturen. Das Grundwasser ist damit eine sehr gute und direkt nutzbare Kaltwasserquelle. Das Grundwasser wird je nach Kanton mit zum Teil sehr unterschiedlichen Auflagen geschützt:

- Keine Kühlnutzung möglich
- Kühlung mit maximaler Temperatur-Spreizung von 3 bis 4 K
- Vorgängiger Nachweis der Leistungs-Ergiebigkeit durch Pumpversuche
- Hydrologischer Nachweis von thermischem Grundwasser-Strömungsverhalten
- In der Regel sind Grundwasser- und Seewassersysteme meist ab einer Kühlleistung von 400 kW zugelassen (Bewilligungsauflagen).

Die effizienteste freie Kühlung ist, wenn in der Nacht über die Lüftungsanlage kühle Luft ins Gebäude eingeblasen wird (ohne das Kaltwassernetz zu nutzen).

Wann lohnt sich ein Free-Cooling?
Eine Studie der ZHAW zum Thema Free-Cooling in der Klimakälte hat das Potenzial des indirekten Free-Coolings untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorlauftemperatur des Kühlmediums entscheidend ist, ob sich ein Free-Cooling rechnet oder nicht. Werden Verbrauchertemperaturen unter 14 °C benötigt, fällt das Free-Cooling-Potenzial auf einige wenige Prozente der gesamten Kühlenergie für Klimakälte (Sommerkühlung T_{Aussen} > 20 °C) zusammen.

Fazit: Nur weil Free-Cooling ein positiv belegter Begriff ist, heisst das nicht, dass der Einbau eines indirekten Free-Coolings in jedem Fall wirtschaftlich und energetisch sinnvoll ist.

Quelle: Free Cooling in der Klimakälte, Stefan Rohrer, Martin König und Frank Tillenkamp ZHAW, 2018 (im Auftrag des BFE)

Kühlen direkt mit Aussenluft (Free-Cooling)
Über die Lüftungsanlage wird direkt kühle Aussenluft in das Gebäude eingeblasen und die überschüssige Wärme über die Abluft abgeführt. Diese natürliche Kühlung mit Aussenluft in der Nacht ist eine wertvolle Vorkühlung. Sie reicht jedoch oft nicht aus, um die gesamte Wärme des Tages abzuführen (vgl. dazu Kapitel 7.5 Freie Kühlung).

Kühlen indirekt mit Aussenluft (Free-Cooling)
Beim indirekten Kühlen mit Aussenluft erfolgt der Energietransport über das Kälteträgersystem. Dabei ist die Kältemaschine nicht oder nur unterstützend in Betrieb.

- **Einfriergefahr:** Wird die freie Kühlung mit kalter Aussenluft von unter 1 °C betrieben, muss sichergestellt werden, dass kein System einfriert. Dies geschieht durch eine entsprechende hydraulische Schaltung und Regulierung.
- **Kleine Temperaturspreizungen:** Um die freie Kühlung optimal zu nutzen, wird sie mit kleinen Temperaturspreizungen von 3 bis 4 K ausgelegt. Dies bedingt jedoch grosse Volumenströme mit entsprechenden Rohrquerschnitten.
- **Wärmeumformer:** Wärmeumformer sind mit Temperaturspreizungen von der Primär- zur Sekundärseite mit weniger als 2 Kelvin und einer Druckdifferenz von maximal 20 kPa zu bemessen.

Hydraulische Einbindung der freien Kühlung
Die hydraulische Einbindung der freien Kühlung mit einer Kältemaschine kann parallel wie ein Kälteerzeuger oder seriell als «Vorkühler» erfolgen (siehe Kapitel 8: Hydraulische Systeme). So oder so ist dies hydraulisch und regelungstechnisch anspruchsvoll, da die Kältemaschine sehr sensibel auf starke Temperatur-Veränderungen oder Schwankungen reagiert.

10 Merkpunkte zur Wärmeaufnahme

1. Bei der Konzeption des Wärmeaufnahmesystems geht man von den Nutztemperaturen (z. B. Raumtemperaturen) aus.
2. Für eine kontrollierte Entfeuchtung der Luft ist eine Kaltwasser-Vorlauftemperatur von 6 °C bis 10 °C notwendig. Nur wenige spezielle Nutzungen brauchen eine kontrollierte Entfeuchtung (Museen, Labors etc.).
3. Mit Kaltwassertemperaturen von 10 °C und mehr kann die Luft teilweise entfeuchtet werden (Teilentfeuchtung bei der Lüftung).
4. Für Lüftungsanlagen sind Kaltwassertemperaturen von 14 °C in der Regel ideal (Kühlen ohne Entfeuchtung).
5. Bei Kältesystemen mit mehr als 20 °C Vorlauftemperatur arbeitet man mit Temperaturdifferenzen von 3 K zwischen Vor- und Rücklauftemperatur.
6. Werden unterschiedliche Kaltwassertemperaturen benötigt, entscheidet die Temperaturdifferenz (ab 4 K) und der Anteil an der Gesamtleistung (erheblicher Anteil), ob für die «wärmeren» Gruppen ein eigenes, wärmeres Kaltwasser-Netz gebaut werden muss.
7. Flächenkühlsysteme werden als angenehme Kühlung empfunden, da die Raumluft nicht aktiv bewegt wird.
8. Umluftkühler sind zwar kostengünstige und leistungsstarke Kühlsysteme, es müssen jedoch die Schallemissionen und die Service-Kosten genau angeschaut werden.
9. Will man See- oder Grundwasser zum Kühlen nutzen, benötigt man eine Bewilligung.
10. Ein indirektes Free-Cooling lohnt sich in der Regel erst bei Komfortklima-Kältesystemen mit einer Kaltwassertemperatur von mehr als 14 °C.

Kapitel 7

Wärmeabgabe

Zu jeder Planung einer Klimakälteanlage gehört die sorgfältige Abklärung, ob und wie die Wärme des Kälteprozesses – eine eigentliche «Gratisenergie» – im Gebäude oder im Areal verwendet werden kann. Wenn es keine Nutzer für die Wärme gibt, muss sie effizient und wirtschaftlich abgeführt werden.

7.1 Konzeptionelle Überlegungen

Es ist unbestritten, dass die Wärme, die eine Kältemaschine abgibt, nach Möglichkeit im Gebäude genutzt werden soll. Das schreibt auch das Energiegesetz vor, sofern die Wärmenutzung wirtschaftlich ist. Bei Neubauten kann immer zumindest ein Teil der Wärme genutzt werden.
Von dieser (gesetzlichen) Forderung ausgenommen sind nur Gebäude, die während des Kältebetriebs gar keinen Wärmebedarf aufweisen oder solche die eine Vorlauftemperatur von mehr als 65 °C benötigen (Altbauten).
In der ganzheitlichen Energiebetrachtung des Gebäudes sollte es keinen Kälteprozess mit einem «Überhang» an Wärme geben, wenn im selben Gebäude gleichzeitig eine fossile Heizung betrieben wird. Besonders Gebäude mit Mischnutzungen (Wohnungen, Büro, Gewerbe) bergen immer ein nutzbares Potenzial, um einen Teil oder die gesamte Wärme des Kälteprozesses zu nutzen.

Pyramide der Wärmenutzungen

Je nach Anwendung werden unterschiedliche Temperaturen benötigt. Je geringer die Anforderungen der Wärmeverbraucher an die Temperatur, desto besser für den Kälteprozess und die Energieeffizienz der Kälteanlage.

Hinweise

Die gemäss Energiegesetz künftig noch erlaubten maximalen Temperaturen von Raumheizungen in Neubauten dürften sich in absehbarer Zeit auf 40 °C reduzieren. Für Bodenheizungen gilt schon heute eine Obergrenze von 35 °C.
Wenn das Trinkwarmwasser nur vorerwärmt wird, genügen dazu tiefere Temperaturen (z. B. 30 °C). Solche Systeme sind jedoch bezüglich Hygiene (Stichwort Legionellen) und Wirtschaftlichkeit (Speicher notwendig) genau zu prüfen.

Der sinnvolle Umgang mit Wärme aus der Kältemaschine leitet sich konzeptionell stets aus Sicht des Wärmebedarfs des Gebäudes ab. Zu klären sind:

- Temperaturen der Wärmeverbraucher
- Notwendige Wärmemengen
- Zeitpunkt des Wärmebedarfs (Gleichzeitigkeit)

Falls die Wärme nicht am selben Tag genutzt werden kann, muss eine saisonale Speicherung zum Beispiel mit Erdsonden geprüft werden. Erst dann stellt sich die Frage, wie die abgegebene Wärme der Kältemaschinen effizient vernichtet, sprich abgeführt werden kann.
Die wichtigste Voraussetzung für die Nutzung der Kältemaschinen-Wärme ist, dass die Nutzer und ihre Wärmeverbraucher innerhalb eines Gebäudes bekannt sind. Aufgrund dieser Informationen erfolgt eine Wärme-Kälte-Gegenüberstel-

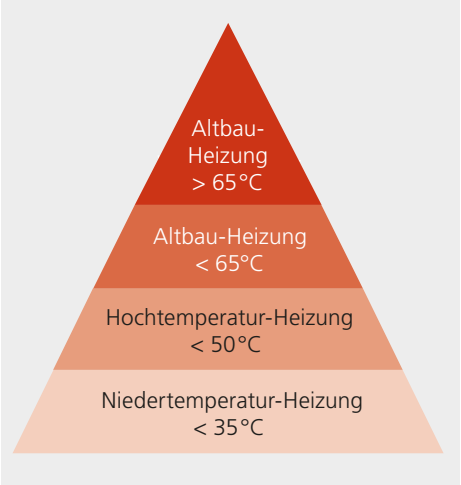


Bild 7.1: Pyramide der unterschiedlichen Temperaturanforderungen verschiedener Wärmesysteme. Je höher in der Pyramide, desto anspruchsvoller die Wärmeerzeugung mit der Kälte-Wärme-Maschine.

lung – die Verbraucher von Kälte und Wärme werden in einer 24-Stunden-Bilanz erfasst und verglichen. So können Leistungs- und Energieflüsse bilanziert und die Anlagenkomponenten definiert werden. Diese inhaltliche Gegenüberstellung wird im Kapitel 7.3 näher erläutert.
Die konzeptionellen Überlegungen zur Nutzung der Wärme der Kältemaschinen basieren auf Bild 7.2.

Einfluss der Verflüssigungstemperatur auf die Wirtschaftlichkeit
Wenn für die Wärmenutzung die Verflüssigungstemperatur nicht erhöht werden muss, ist die Verflüssigungswärme der Kältemaschine gratis. In der Praxis trifft man diese Situation besonders in Gebäuden mit einer Mischnutzung an.
Muss die Verflüssigungstemperatur der Kälteanlage für die Wärmenutzung erhöht werden, braucht dies Energie. Pro Grad Temperaturhebung steigt der Stromverbrauch um rund 2,5 % an.

Beispiel: Wird Wärme auf einem Temperaturniveau benötigt, das 10 K über dem effektiven Verflüssigungsniveau liegt, steigt der Energieverbrauch der Kälteanlage für diese Temperaturanhebung um 25 %. Wenn die Wärme damit vollständig genutzt wird, dann entspricht die zusätzliche Elektroenergie einer «Leistungszahl» von 4. Die Wärme ist in diesem Fall nicht kostenlos, aber viel wirtschaftlicher (d. h. preiswerter) und umweltfreundlicher als Wärme aus einer fossilen Heizung.

Eine Verschlechterung der Kühleffizienz durch Anheben der Verflüssigungstemperatur kann die Gesamteffizienz des Gebäudes verbessern.

«Lohnender» Effizienzverlust
Ein weiteres Beispiel: Der Heizleistungsbedarf eines Gebäudes beträgt im Winter 60 kW. Die Kältemaschine erzeugt im Teillastbetrieb 20 kW Kälte (5 $kW_{Elektro}$). Die Rücklauftemperatur der Heizung beträgt 30 °C. Und die Rückkühlung der Kälte arbeitet bei 28 °C (Verflüssigungstemperatur).

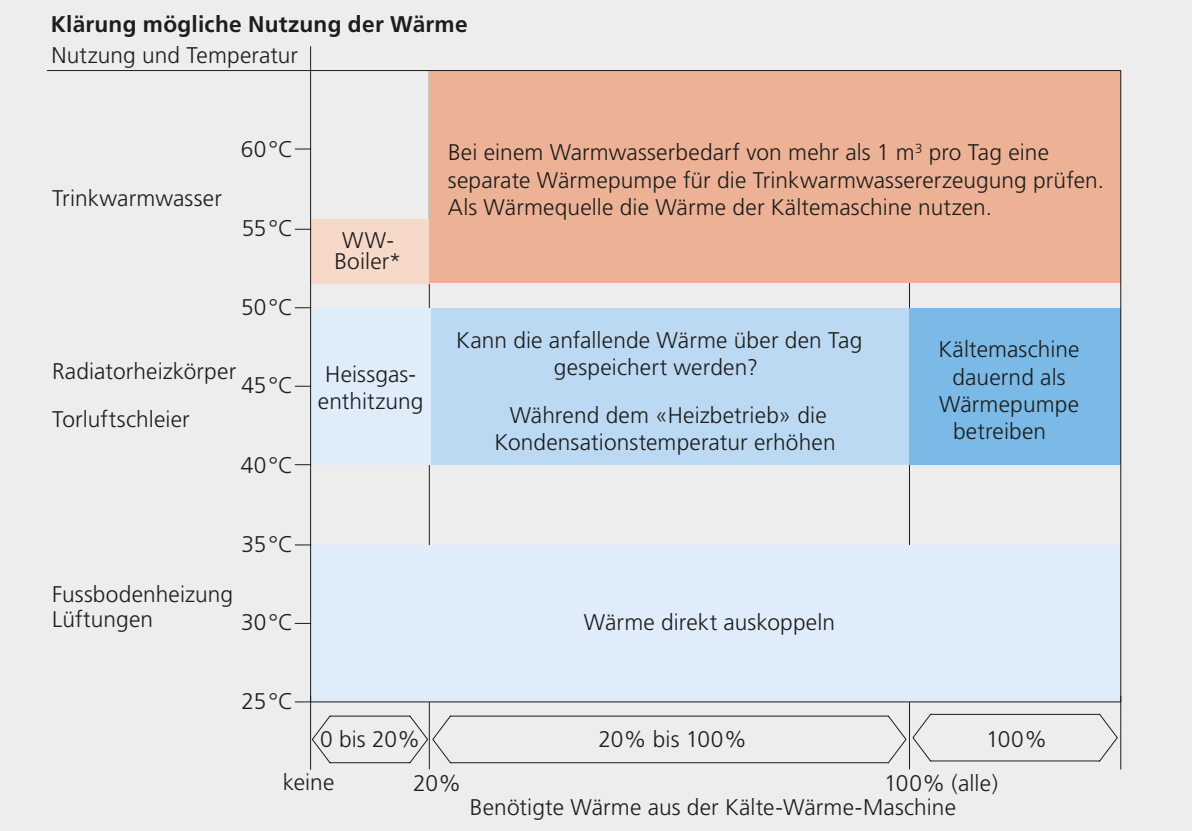


Bild 7.2: Überblick der verschiedenen Möglichkeiten, wie die Wärme aus der Kälte-Wärme-Maschine für unterschiedliche Nutzungen verwendet werden kann.

** Bei einem Trinkwarmwasser-Verbrauch von weniger als 1000 Liter pro Tag einen WP-Boiler prüfen.*

Variante A: Konventionelle Lösung
Es wird ein Gaskessel für die Heizung und eine Kältemaschine für die Kühlung eingebaut.

	Wärme	Strom	Kälte
Gaskessel	60 kW		
Kältemaschine		5 kW	20 kW
Total	**60 kW**	**5 kW**	**20 kW**

Wird der Strom gemäss Minergie mit dem Faktor 2 gewichtet, ergibt das eine Gesamtinput-Leistung von 70 kW (60 kW + 2-mal 5 kW). Ohne Gewichtung beträgt die Gesamtinput-Leistung 65 kW (60 kW + 5 kW).

Variante B: Kombination mit Anhebung Verflüssigungstemperatur
Es wird ein Gaskessel eingebaut und die Wärme der Kältemaschine genutzt. Die Verflüssigungstemperatur der Kältemaschine muss um 8 K auf 36 °C (anstelle von 28 °C) erhöht werden. Dadurch verschlechtert sich die Effizienz der Kältemaschine – sie benötigt rund 20 % mehr Elektroleistung (8-mal 2,5 % = 20 %).
Damit braucht die Kältemaschine statt 5 kW neu 6 kW Elektroleistung (Kälteleistung 20 kW) und erbringt 26 kW nutzbare Wärmeleistung (20 kW + 6 kW).

	Wärme	Strom	Kälte
Gaskessel	34 kW		
Kältemaschine	26 kW	6 kW	20 kW
Total	**60 kW**	**6 kW**	**20 kW**

Wird der Strom mit dem Faktor 2 gewichtet (gemäss Minergie) ergibt das eine Gesamtinput-Leistung von 46 kW (34 kW + 2-mal 6 kW). Ohne Gewichtung beträgt die Gesamtinput-Leistung 40 kW (34 kW + 6 kW).
Die Bilanzierung zeigt: Die Einbindung der Wärme aus der Kältemaschine führt – trotz des Effizienzverlustes durch das Anheben der Verflüssigungstemperatur – zu 38 % tieferen Energieaufwendungen (ohne Gewichtung, mit Gewichtung sind es 33 % weniger).

Betrachtet man die Variante B nur aus Sicht der Kälte, so verschlechtert sich der COP der Kältemaschine von 4,0 auf 3,3.

$$\text{Variante A: } COP_{Kälte} = \frac{(20\ kW_{Kälte})}{(5\ kW_{Elektro})} = 4{,}0$$

$$\text{Variante B: } COP_{Kälte} = \frac{(20\ kW_{Kälte})}{(6\ kW_{Elektro})} = 3{,}3$$

Allerdings werden bei der Variante B zusätzlich 26 kW nutzbare Wärme bereitgestellt. Wird der ganze Stromverbrauch (6 kW) der Variante B zwischen der Kälte (5 kW) und der Heizung (1 kW) aufgeteilt, zeigt sich folgendes Bild:

$$\text{Variante B: } COP_{Kälte} = \frac{(20\ kW_{Kälte})}{(5\ kW_{Elektro})} = 4{,}0$$

$$\text{Variante B: } COP_{Wärme} = \frac{(26\ kW_{Wärme})}{(1\ kW_{Elektro})} = 26$$

Mit der Anhebung der Verflüssigungstemperatur erreicht man somit den selben $COP_{Kälte}$ von 4,0 und gleichzeitig einen $COP_{Wärme}$ von 26 (das heisst: 26 kW Wärme mit 1 kW Strom erzeugt).
Betrachtet man das Gesamtsystem Kälte und Wärme resultiert ein sehr guter COP Kälte + Wärme von 7,7.

$$COP_{Kälte+Wärme} = \frac{(46\ kW_{Kälte+Wärme})}{(6\ kW_{Elektro})} = 7{,}7$$

Noch höhere Anhebung der Verflüssigungstemperatur

Wie hoch die Verflüssigungstemperatur angehoben werden kann, ist einerseits vom Kältemittel abhängig (siehe Kapitel 3 Grundlagen, Punkt 3.8). Andererseits sind auch betriebswirtschaftliche Punkte zu beachten.

Wird im obigen Beispiele eine Verflüssigungstemperatur von 60 °C verlangt, muss die Kältemaschine eine Temperaturüberhöhung von stolzen 32 K (60 °C – 28 °C) leisten. Dies entspricht einer zusätzlichen Elektroleistung von rund 80 % (32 K mal 2,5 %).

	Wärme	Strom	Kälte
Gaskessel	31 kW		
Kälte-maschine	29 kW	9 kW	20 kW
Total	**60 kW**	**9 kW**	**20 kW**

Wird der Strom mit dem Faktor 2 gewichtet (gemäss Minergie) ergibt das eine Gesamtinput-Leistung von 49 kW (31 kW + 2-mal 9 kW). Ohne Gewichtung beträgt die Gesamtinput-Leistung 40 kW (31 kW + 9 kW). Auch in diesem Fall weist die Bilanz eine Effizienzverbesserung von 30 % gegenüber einer Lösung ohne Wärmenutzung auf.

Wichtig

- Die Erhöhung der Gesamteffizienz ist in den aufgeführten Beispielen nur bei vollständiger Nutzung der Wärme aus der Kältemaschine gegeben.
- Die Kältemaschine muss über eine Steuerung verfügen, die sicherstellt, dass die Verflüssigungstemperatur nur hochgefahren wird, wenn ein Wärmebedarf besteht.
- Die Heiztemperaturen sind so tief wie möglich zu definieren.

Nutzung der Wärme für das Trinkwarmwasser

Trinkwarmwasser wird nahezu in jedem Gebäude benötigt. Bei Bürogebäuden ist der Warmwasserbedarf meist so gering, dass sich der Einbau einer Wärmenutzung nicht rechnet. Sobald der Trinkwarmwasser-Bedarf jedoch über 1 m^3 pro Tag steigt, sollte zumindest eine Heissgas-Enthitzung für die Vorwärmung des Trinkwarmwassers in Betracht gezogen werden (siehe Bild 7.9 Heissgas-Enthitzung).

Falls es nur einen kleinen Bedarf für Trinkwarmwasser gibt, kann eine Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (WP) eingesetzt werden. Sie sorgt für zwei positive Effekte. Zum einen kühlt sie die Kältezentrale, indem sie dem Raum Wärme entzieht. Zum andern müssen Trinkwarmwasser-Bedarf und Wärmanfall zeitlich nicht übereinstimmen.

Die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) führt eine Liste mit Wärmepumpenboiler (Warmwasser-Wärmepumpen) mit FWS-Zertifikat. Für die Aufnahme in die Liste müssen die Produkte die technischen Anforderungen der FWS erfüllen (www.fws.ch).

Wärmeabgabe an die Heizung und den Rückkühler

Die Regulierung der Kältemaschine umfasst nebst der Kältespeicher-Ladung auch die Ladung des Heizungsspeichers. Sie erfolgt, wenn effektiv eine Wärmeanforderung ansteht.

Damit die Kältemaschine die Funktionen sicherstellen kann, muss die Speicherbewirtschaftung (Kälte und Wärme) durch die Kältemaschine gesteuert werden. Sie selbst wird dann nur noch mit Wärme- und Heizungs-Temperaturanforderungen der Heizung angesteuert.

Um die Kältemaschinen-Wärme immer vollständig zu nutzen, sollte die Wärmeabgabe direkt in den Heizungsspeicher erfolgen. Ist der Wärmespeicher geladen, wird die überschüssige Wärme über den Rückkühler abgeführt. Die Rückkühlung wird in diesem Falle wie ein «Wärmeverbraucher» hinzugeschaltet.

Im Rückkühlbetrieb sollte die Rückkühl-Temperatur in die Kältemaschine (Eintrittstemperatur Verflüssiger) stets möglichst tief sein. Die Regelung muss sicherstellen, dass die Temperaturen der Aussentemperatur folgen.

Bild 7.3: Die Trinkwarmwasser-Wärmepumpe entzieht dem Raum Wärme und erhitzt damit das Trinkwarmwasser. (Quelle: CTA)

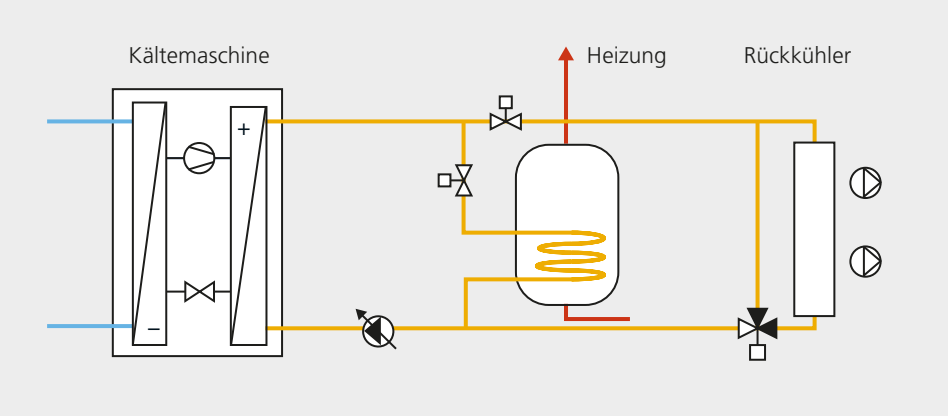


Bild 7.4: Indirekte Einbindung der Heizung über einen Wärmespeicher und mit einem Wasser-Glykol-Kreislauf. Achtung: Der innenliegende Rohrbündel-Wärmeumformer kann nur bis Leistungen von ca. 20 kW eingesetzt werden. Zudem sind seine Wärmeübertragungswerte eher schlecht (ΔT 5 bis 10 K).

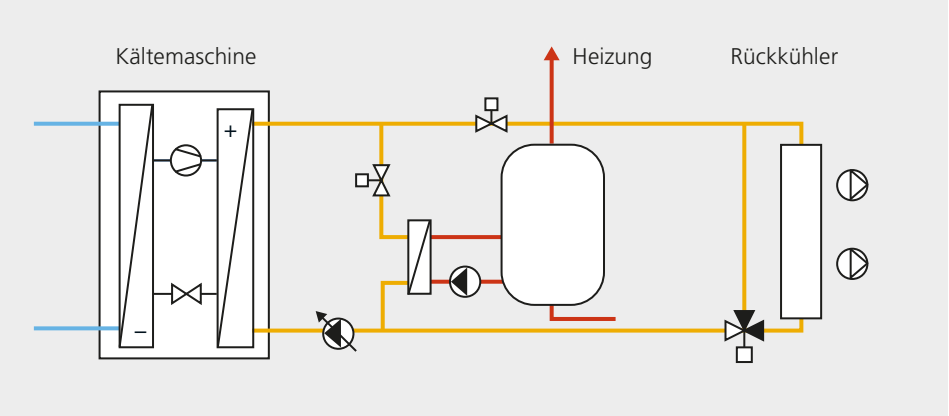


Bild 7.5: Indirekte Einbindung der Heizung über einen Wärmespeicher und mit einem Wasser-Glykol-Kreislauf. Der aussenliegende Platten-Wärmeumformer benötigt eine zusätzliche Pumpe. Dafür kann er für beliebige Leistungen eingesetzt werden und hat gute Wärmeübertragungswerte (ΔT 2 K).

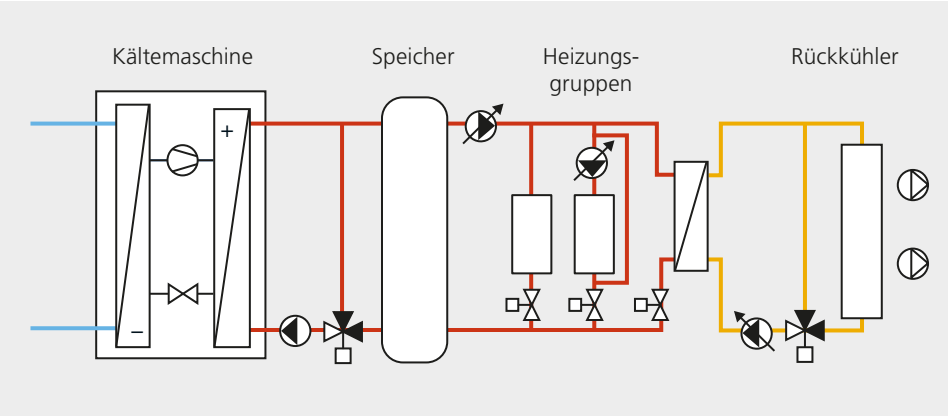


Bild 7.6: Direkte Einbindung der Heizung über einen Wärmespeicher. Der Rückkühler ist mit einem Wärmeübertrager wie eine Heizungsgruppe eingebunden. Der Rückkühl-Kreislauf ist mit Wasser-Glykol gefüllt, damit das Wasser im Winter nicht einfriert.

Dachaufgestellte Kompakt-Kälteerzeuger

Die dachaufgestellte Kompakt-Kälteerzeugung (sogenannte Units, Roof-Top-Anlagen) hat einen wesentlichen Vorteil: dank der kompakten Bauart brauchen sie nur wenig Raum, da die Rückkühlung und die Steuerung integriert sind.

Zu beachten ist dabei, dass Kaltwasser- und Heizungsanschlüsse in den Aussenbereich führen und entsprechend vor dem Einfrieren geschützt werden müssen. Der Frostschutz wird sinnvollerweise mit Wasser-Glykol-Gemischen und nicht mit elektrischen Heizbändern sichergestellt.

Im Gebäude soll das Leitungssystem mit dem Wasser-Glykol-Gemisch möglichst kurz sein (Leckagen, Eingriffe usw.). Darum platziert man den Wärmeübertrager (Trennung des Wassersystems und des Wasser-Glykol-Systems) im warmen Bereich idealerweise unmittelbar beim Eintritt der Leitungen ins Gebäude.

Aus wirtschaftlichen Gründen lohnt sich Wärmenutzung bei Kompakt-Kälteerzeugern häufig nicht. Denn die Heizzentralen befinden sich mehrheitlich im Untergeschoss und nicht im Dachbereich. Zudem müssen die Kompaktmaschinen – ebenso wie die Rückkühler – die vorgegebenen Schallwerte einhalten. Kompaktanlagen sind immer lauter als Rückkühler allein, da der Schall der Kompressoren hinzukommt.

Vorteile

- Kompakt auf dem Dach (Direktverflüssigung mit Regulierung)
- Kälteerzeugung und Direktverflüssigung haben sehr tiefe Investitionskosten.
- Tiefe Betriebs- und Wartungskosten
- Flächeneinsparung im Gebäude
- Zeitgemässe Modelle haben bereits eine Free-Cooling-Schaltung eingebaut.

Nachteile

- Wärmenutzung häufig nicht wirtschaftlich
- Wasseranschlüsse vor dem Einfrieren schützen
- Höhere Lärmwerte als reine Rückkühler
- Beim Kälteerzeugungs-Aufstellungsort und der entsprechenden Gebäudeerschliessung sind bauliche Investitionen zu beachten.

Bild 7.7: Kompakter Kälteerzeuger direkt auf dem Dach aufgestellt. (Bild: Wolf Schweiz AG)

7.2 Wärme direkt nutzen

Wenn der Planer im Konzept entschieden hat, die Wärme der Kältemaschine zu nutzen, müssen in der projektspezifischen Planung die Voraussetzungen dafür erarbeitet werden. Es muss besonders darauf geachtet werden, dass die Kältemaschinen-Wärme und die Wärmeverbraucher technisch nahe beieinander liegen und sich die Systeme ergänzen. Die technische Nähe durch eine einfache Leitungsverbindung erfüllt das Kriterium der Wirtschaftlichkeit und damit eine der wichtigsten Planungsvorgaben.

Verschiedene Temperatur-Niveaus

Wenn ein Gebäude verschiedene Temperaturniveaus benötigt, dann müssen die unterschiedlichen Niveaus hydraulisch aufgeteilt werden. Die Aufteilung erfolgt durch eigenständige Verbrauchergruppen und eine entsprechende Versorgung ab den jeweiligen Temperatur-Speichern.

Wärmenutzung aus der Heissgas-Enthitzung

Die Heissgas-Enthitzung ist – wie es der Name sagt – das höchste vorhandene, auskoppelbare Temperatur-Niveau des Kälteprozesses. Bei der Auskoppelung aus dem Kälteprozess wird nur der sensible Wärmeinhalt im gasförmigen Kältemittel genutzt. Die nutzbare Heissgas-Temperatur ist vom Kältemittel, der Verdampfungs- und der Verflüssigungsemperatur sowie der Leistung der Kältemaschine abhängig. Zu beachten ist: Im Teillastbetrieb sinkt die Heissgastemperatur.

Das Heissgas hat – je nach Kältemittel – Temperaturen zwischen 40 °C und 100 °C. Die Heissgas-Temperatur ist immer höher als die Verflüssigungstemperatur und erreicht sehr hohe Werte bei hoher Verflüssigungstemperatur und grossem Druckhub des Verdichters.

Als Richtwert kann man von einer minimalen Heissgas-Temperatur ausgehen, die 10

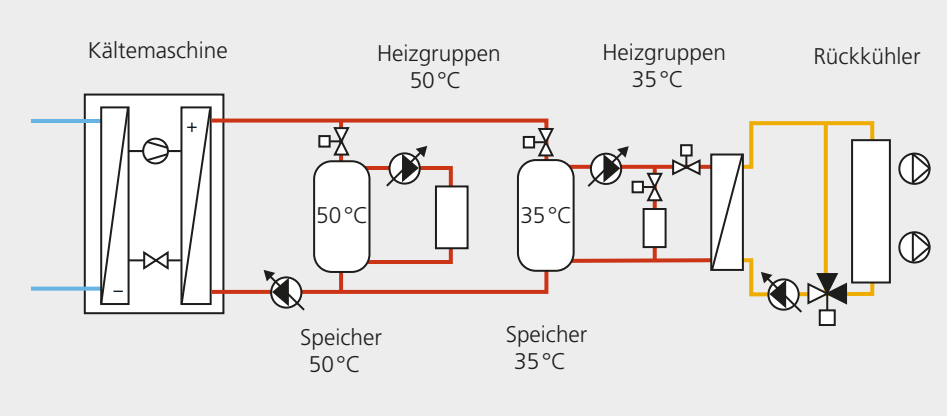


Bild 7.8: Die Kältemaschine lädt einen Wärmespeicher mit 50 °C und einen anderen mit 35 °C. Meldet ein Wärmespeicher einen Bedarf, wird die Verflüssigungstemperatur auf der Kältemaschine auf das entsprechende Temperatur-Niveau angehoben. Damit wird immer eine maximale Effizienz erreicht. Die verschiedenen Verbraucher oder Verbrauchergruppen beziehen die Wärme je nach Temperaturanforderung vom jeweiligen Speicher.

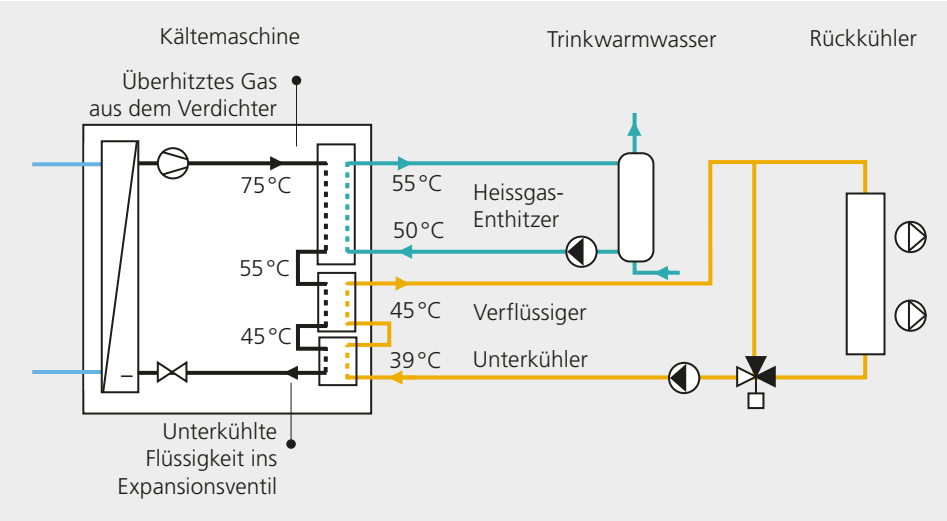


Bild 7.9: Von der Verflüssigerleistung können 10 % bis 20 % über das Heissgas entzogen werden. Dieses hat eine höhere Nutztemperatur und ist dadurch eine interessante Wärmequelle für die Trinkwasser-Erwärmung.

bis 15 K über der Verflüssigungstemperatur liegt. Mit einem Heissgasenthitzer kann eine Leistung von 10 % bis 20 % der Verflüssiger-Leistung entzogen werden.
Die Heissgas-Enthitzung ist aus Sicht des Kälteprozesses eine gutmütige Nutzung. Der Prozess funktioniert auch, wenn das Heissgas nicht genutzt wird. In diesem Fall wird die Wärme einfach über den Verflüssiger abgeführt.
Die relativ hohen Wärmetemperaturen bei der Heissgas-Enthitzung können genutzt werden, ohne dass dies einen negativen Einfluss auf die Effizienz des Kälteprozesses respektive die Energieeffizienz der Kältemaschine hat. Wird die Wärme genutzt, dann muss sie nicht mit einem anderen Energieerzeuger (z. B. Ölheizung) bereitgestellt werden. Das verbessert die Gesamteffizienz des Gebäudes.

Entkopplung der Systeme

Es gibt Fälle, in denen eine indirekte Nutzung der Wärme aus der Kältemaschine zu prüfen ist. Dies ist der Fall, wenn die Wärme aus der Kältemaschine zeitlich verschoben zum Wärmebedarf des Gebäudes anfällt. Oder wenn nur ein Bruchteil der Wärme für die Heizung genutzt werden kann.
In diesen Fällen kann mit einer kleinen Wärmepumpe – welche die Wärme der Kältemaschine als Quelle nutzt – eine kostengünstige und effiziente Lösung gefunden werden (siehe auch Bild 7.3 Trinkwarmwasser-Wärmepumpe). Eine zeitliche Verschiebung kann mit einem Wärmespeicher überbrückt werden (siehe Kapitel Speicher).

Hinweis: In Bild 7.10 ist der Wärmeträger ein Glykol-Netz, damit der Wärmeträger im Winter im Rückkühler nicht einfriert. Frostschutzmittel haben auch ihren Preis und eine Füllung kostet schnell mal einige Tausend Franken. Insofern ist immer zu prüfen, ob der Rückkühler nicht mit einer zusätzlichen Systemtrennung (Platten-Wärmeübertrager) eingebunden wird und so das Volumen des Glykolkreislaufs reduziert werden kann. Allenfalls sind die Einsparungen beim Glykol grösser als die Mehrkosten für den Platten-Wärmeübertrager.
Eine Alternative ist es, eine kleine Kältemaschine (KM_{klein}), die als Wärmepumpe die Wärme abgibt, in die Kälteproduktion einzubinden – auch wenn damit allein keine gesicherte Wärmeproduktion gewährleistet werden kann (Bild 7.11). Die kleine, Kälte produzierende Wärmepumpe ist aber bezüglich Betrieb und Einbindung hocheffizient und bewahrt die grosse Kältemaschine (KM_{gross}) besonders im tiefen Leistungsbereich vor vielen Ein- und Ausschaltungen. Damit erhöht die kleine Kältemaschine mit ihren geringen Betriebskosten nicht zuletzt auch die Lebensdauer der Haupt-Kältemaschine. Diese technisch gute Lösung verursacht jedoch etwas höhere Investitionskosten.

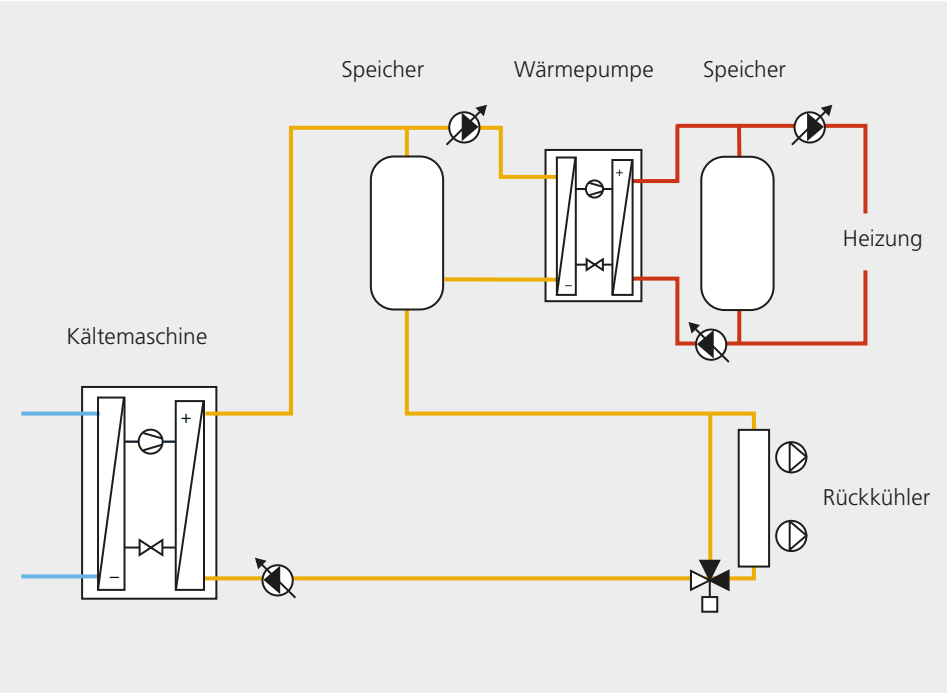


Bild 7.10: Wird nur ein kleiner Teil der Wärme der Kältemaschine für die Heizung benötigt, lohnt es sich oft nicht, die Kältemaschine auf eine höhere Verflüssigungstemperatur hochzufahren, da so kurzzeitig viel zu viel Wärme ansteht. In diesem Fall kann über eine kleine Wärmepumpe die Wärme sehr effizient bereitgestellt werden.

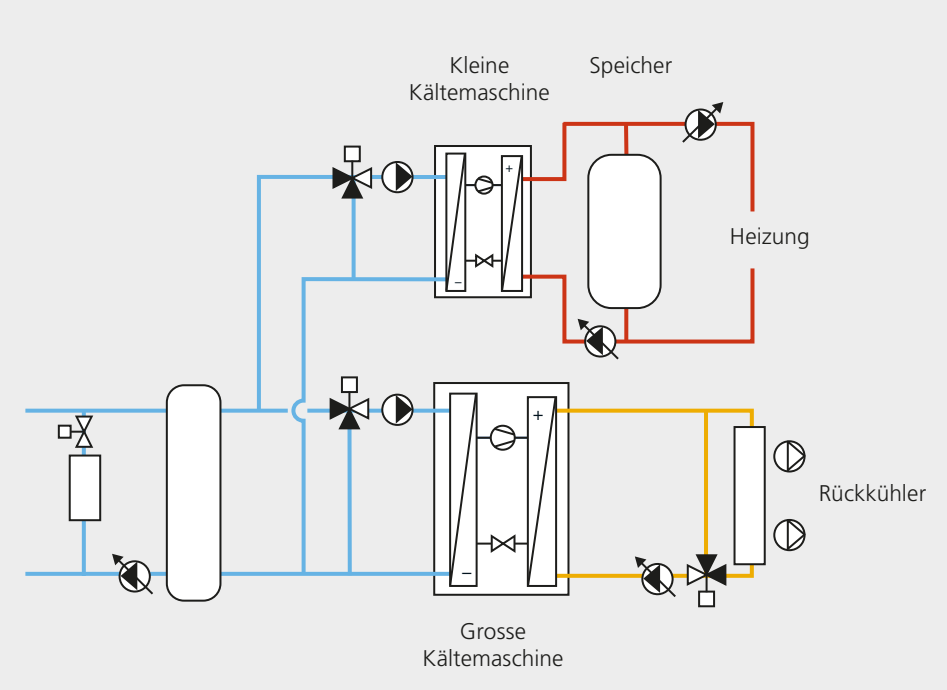


Bild 7.11: Eine kleine Kältemaschine übernimmt die Wärmeproduktion. Zusätzlich entlastet sie die grosse Kältemaschine bei kleinem Kältebedarf.

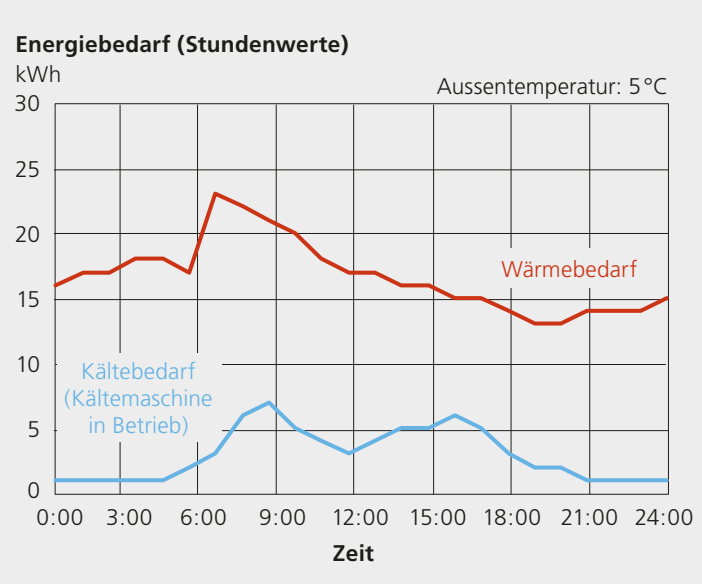
7.3 Kurzzeitige (Tag-Nacht-) Wärmespeicher

Für die detaillierte Speicherauslegung mit Wasser bietet die Richtlinie «SWKI 2002-1 Wasser-Wärmespeicher» eine sehr gute Grundlage; es wird empfohlen, sie beizuziehen.
Ein Speicher sollte auf der Kälte- und auf der Wärmeseite mindestens ein Bereitstellungsvolumen von 40 Litern pro kW Kälteleistung aufweisen. Und der Wärmespeicher sollte mindestens das 1,5-fache Volumen des Kältespeichers umfassen.
Falls mit dem Wärmespeicher eine Verschiebung der Energienutzung von den Tages- in die Nachtstunden erreicht werden soll, muss der Speicher möglichst gross sein.

Gebäude als Massespeicher nutzen

Die Energiespeicherung mit Wasser mit geringer Temperaturspreizung – wie es beim Kälteprozess üblich ist – braucht grosse Speichervolumen. Müssen grosse Energiemengen gespeichert werden, kann das Gebäude als Massenspeicher dienen. In diesem Fall wird die Vorlauftemperatur der Wärmeabgabesysteme ohne Mengenregulierungen (z. B. TABS, selbstregulierende Bodenheizungen) in den Tagesstunden etwas höher betrieben. In den Nachtstunden kühlt sich das Gebäude wieder natürlich ab.

Bild 7.12: Stundenwerte des Wärme- und Kältebetriebes eines Gebäudes und einer Kältemaschine über den Tag.



Für dieses Vorgehen braucht es thermoaktive Bauteile (TABS oder selbstregulierte Bodenheizungen). Diese kühlen, respektive erwärmen eine grosse Masse (Betondecke). Diese grosse Masse wirkt dämpfend und ermöglicht eine zeitverzögerte Wärmeabgabe. Der Effekt ist vor allem in den Übergangszeiten – Heizen am Morgen, Kühlen am Nachmittag – entscheidend. Für diese Energieverschiebung benötigt man zudem ein Gebäudeleitsystem, das die Temperaturen entsprechend vorgibt.

Tagesbilanzierung

Bei Kältemaschinen, die das ganze Jahr in Betrieb sind, nimmt man eine gegenüberstellende Tagesbilanzierung vor. Damit werden über den ganzen Tag hinweg der Wärmebedarf und die Kälteanforderung verglichen. Daraus ersieht man die stündlichen Leistungen und die Energien. Das Resultat ist eine bildliche Darstellung des Heiz- und Kühlbedarfs.
Diese einfache statische Betrachtung sollte für die beiden Betriebszustände (Wärme- und Kältebedarf) bei drei verschiedenen Aussentemperaturen (12 °C, 22 °C und 32 °C) gemacht werden.

Teillastverhalten

Anhand der Stunden, in denen die Kältemaschine nicht 100 % ausgelastet ist, kann ein Teillastprofil abgeleitet werden. Wenn eine Kältemaschine mit zwei Leistungsstufen (50 % oder 100 %) im Einsatz ist, kennt man die Zeiten, in denen die Maschine ein- und ausschaltet.
Diese Betrachtung zeigt, dass für eine optimale Energieproduktion und Energieabgabe die Kältemaschinen idealerweise mit einer stetigen Leistungsregulierung von 20 % bis 100 % ausgerüstet sein sollte.

7.4 Wärme saisonal speichern

Das Erdreich ist für grosse Wärmeenergiemengen und für die saisonale Überbrückung der beste Speicherort. Dem Erdreich kann nicht nur Wärme entzogen werden, sondern es kann auch direkt zum Kühlen genutzt werden. Zudem kann überschüssige Wärmeenergie vom Sommer zwischengespeichert und im Winter entnommen werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass dieser Speicher im Gebäude keinen (teuren) Raum benötigt.

Erdreich-Regeneration ist notwendig

Das Erdreich wird mit Erdsonden erschlossen. Wenn man ihnen Wärme zuführt spricht man von einer Erdreich-Regeneration. Sie bringt doppelten Ertrag, da der Wärmeentzug für den WP-Betrieb auf einer höheren Austrittstemperatur startet. Den Erdspeicher mit Erdsonden-Kühlung zu betreiben hat nebst der ganzjährigen Nutzung auch für den Heizbetrieb einen optimalen Nutzen. Im Vordergrund steht die Senkung der Betriebskosten, denn mit der Erdsondenkühlung kann die Kältemaschine die «Kälteenergie» mit weniger Betriebsstunden bereitstellen. Eine zusätzliche Effizienzverbesserung erfolgt durch den besseren COP (Coefficient of Performance, Leistungszahl) von Kältemaschine und WP-Betrieb.

Dank einer Regeneration können kleinere Erdsonden (respektive Erdsonden-Felder) gebaut werden. Mit einer Simulation des Betriebes über 50 Jahre muss nachgewiesen werden, dass bei Wärmeentzug und Wärmeeintrag die Erdtemperatur von –1,5 °C gemittelt nicht unterschritten wird (siehe SIA 384/6).

Es ist zu beachten, dass die Erdsonden nicht mit beliebig hohen Eintrittstemperaturen betrieben werden können. Für den Rückkühlbetrieb sind die Temperaturvorgaben der Kantone, der Gemeinde und der Angaben des Erdsonden-Lieferanten bezüglich der Materialeigenschaften zu beachten.

Um Erdsonden zu schonen und das Austrocknen des Erdreiches zu verhindern, sollten diese mit höchstens 40 °C betrieben werden. Die Bewilligung für die Nutzung des Erdreiches kann eine tiefere Eintrittstemperatur vorschreiben. Dies ist abhängig vom jeweiligen Vorkommen von Grundwasser.

Erdreich-Regeneration bei hohen Temperaturen

Temperaturen, die wesentlich über 12 °C liegen, eignen sich zur Regeneration (Energie wird ins Erdreich abgeben). Der Unterschied zu einem herkömmlichen Speicher ist, dass die Wärme auf einem bedeutend tieferen Temperatur-Niveau entzogen wird, als sie ursprünglich eingelagert wurde. Lagert man Wärme bei 25 °C ein, wird die Rückgabetemperatur bei noch etwa 15 °C liegen. Daher kann die Energie aus dem Erdspeicher nicht direkt zum Heizen genutzt werden. Für die Nutzung ist eine Wärmepumpe notwendig.

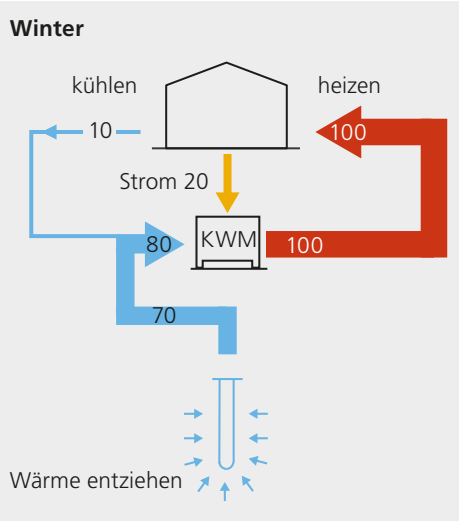


Bild 7.13: Winter-Betrieb. 70 Einheiten Energie werden aus dem Erdreich entzogen, 10 kommen aus der Gebäudekühlung. Mit der Kälte-Wärme-Maschine werden daraus 100 Einheiten Heizenergie erzeugt.

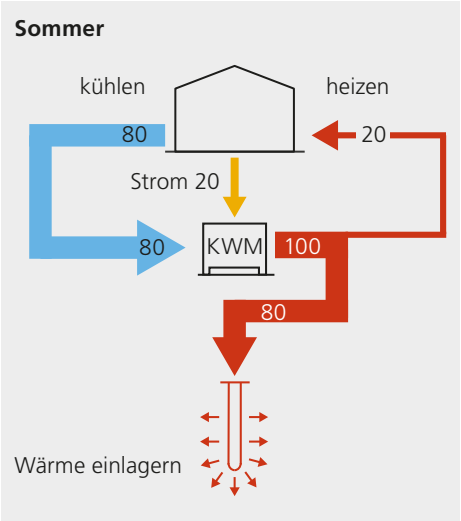


Bild 7.14: Sommer-Betrieb. 80 Einheiten Energie werden aus dem Gebäude entzogen (Gebäudekühlung). Aus der Kälte-Wärme-Maschine werden daraus 80 Einheiten Wärme ins Erdreich eingelagert und 20 Einheiten für Heizung und Warmwasser benötigt.

7.5 Wärme direkt abführen

Systeme, die Wärmelasten direkt und ohne Kältemaschine abführen, werden unter dem Begriff «freie Kühlung» zusammengefasst.

- **Free-Cooling:** Kühlung mit Aussenluft
- **Geo-Cooling:** Kühlung durch Nutzung des Erdreichs, zum Beispiel mit Erdsonden oder Grundwasser
- **Aqua-Cooling:** Kühlen mit natürlichem Oberflächenwasser wie Seewasser oder Flusswasser

Free-Cooling

Free-Cooling mit Aussenluft kann in den kühleren Nachtstunden (Temperaturen unter 18 °C in der Regel zwischen 24.00 Uhr und 6.00 Uhr) einen Beitrag zur Raumkühlung leisten. Dabei werden folgende Systeme unterschieden:

- Fensterkühlung (offene Fenster)
- Mechanische Lüftung (mit der Lüftungsanlage wird kalte Luft eingeblasen)
- Kühlung mit Kühlwasser ohne Kältemaschine (das Kühlwasser wird im Rückkühler gekühlt und direkt – ohne Kältemaschine – in die Räume geführt).

Das Gebäude sollte im Sommer in der Nacht immer natürlich – sprich mit Free-Cooling – gekühlt werden. Die Nachtauskühlung kann in der kurzen nutzbaren Zeit aber nicht den ganzen Wärmeeintrag des Tages abführen. In den Nachtstunden wirkt die Massenträgheit zusammen mit den geringen Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Aussen «zu langsam», so dass nur mit grossen Luftvolumenströmen und «kalter Luft» die Tagesvorkühlung erreicht werden könnte. Zudem gibt es immer wieder Tropennächte mit Aussentemperaturen von über 20 °C, die wie im Sommer 2003, 2015 und 2018 über mehrere Tage bis Wochen auftreten können.

Die besten Einbindungen von freier Kühlung sind Verbraucher mit hohen Kühlwasser-Vorlauftemperaturen von über 18 °C und direkter Einbindung der freien Kühlung.

Jede Lüftungsanlage ermöglicht in der kalten Jahreszeit bei Aussentemperaturen unter 18 °C ein «Free-Cooling», da immer «kühle Zuluft» in die Räume eingeblasen werden kann. Free-Cooling hat aber auch (ökonomische) Grenzen. Gemäss einer Studie der zhaw Zücher Hochschule für Angewandte Wissenschaften[1] aus dem Jahr 2018 ist freie Kühlung mit Luft nur für Verbraucher-Vorlauftemperaturen über 18 °C und oder bei ganzjährig sehr hohen Wärmelasten wie z. B. Serverräume sinnvoll und wirtschaftlich (siehe auch Kapitel 8.8).

1 «Free Cooling in der Klimakälte – Untersuchung Potential in der Schweiz», 2018

7.6 Rückkühlung: Wärme indirekt abführen

Auslegungswert und Aufstellungsort
Wenn die Wärme aus der Kältemaschine nicht genutzt werden kann, muss sie abgeführt werden. Wird die Wärme an die Aussenluft abgegeben, spricht man von einer Rückkühlung.
Die Rückkühlung wird gemäss den Klimadaten der SIA 2028 bemessen. Rückkühler im Schweizer Mittelland werden typischerweise auf eine Aussentemperatur von 32,6 °C ausgelegt (entspricht Zürich Kloten). Bei dieser Auslegungstemperatur muss der Rückkühler die vom Hersteller garantierte Leistung erbringen.

Wichtig: Die Auslegungstemperatur ist nicht die maximal auftretende Temperatur, sondern die Temperatur, bei der die Rückkühlleistung garantiert werden muss.

Rückkühler werden somit nicht für Spitzentemperaturen dimensioniert, die nur wenige Stunden im Jahr auftreten. Für den Rückkühler ausschlaggebend ist zudem nicht die Aussentemperatur, sondern die effektive Luftansaugtemperatur. Sie ist abhängig vom Aufstellungsort des Rückkühlers. Denn verschiedene Faktoren können die Umgebungstemperatur erhöhen:

- Direkte Sonneneinstrahlung
- Dunkle Oberflächen in der Umgebung (Boden, Wände)
- Wärmestau in windgeschützten Nischen

Problematisch sind darüber hinaus ungewollte Luftrezirkulationen oder Luftkurzschlüsse («Hotspot») beim Rückkühler. Dabei strömt die warm ausgeblasene Luft nicht ab, sondern wird wieder angesaugt. Dies führt zu massiven Leistungseinbussen, da die Luftansaugtemperatur zu hoch ist.
Oft werden Rezirkulationen erst dann entdeckt, wenn die Kälteanlage im Sommer die Leistung nicht erbringt, weil die Rückkühltemperaturen auch bei «kühlen» Aussentemperaturen zu hoch sind.

Hitzesommer 2003 zeigt Defizite
Im Sommer des Jahres 2003 erreichten die Aussentemperaturen mehrere Wochen lang über 35 °C, teilweise sogar über 40 °C. Bei dieser Gelegenheit zeigte sich, dass die Planer bei vielen Rückkühlern die Standorteinflüsse zu wenig beachtet hatten. Aufgrund einer «unglücklichen» Standortwahl wurden Ansaugtemperaturen von bis zu 50 °C gemessen. Da bei vielen Kältemaschinen die Verflüssigungstemperatur auf maximal 45 °C bis 50 °C limitiert ist, wurden diese Kältemaschinen automatisch gesperrt.
Mit dem Abschalten der Klimakälteanlagen kam es zu einem «Totalausfall» der Gebäudekühlung. Ein eindrücklicher Beleg, wie eine zu hohe Ansaugtemperatur nicht nur die Leistung der Kälteanlage vermindern, sondern sie sogar ganz ausser Gefecht setzen kann.

Bild 7.16: Hybrider Trockenkühler. (Quelle: Jaeggi Hybridtechnologie AG)

Bild 7.15: Trockenrückkühler auf dem Dach. (Quelle: CTA)

Bild 7.17: Hybridrückkühler. (Quelle: Jaeggi Hybridtechnologie AG)

Rückkühlerbauarten
Bei den Rückkühlern unterscheidet man «trockene» Ausführungen, die «nassen» Verdunstungsrückkühler sowie eine Kombination davon, die sogenannten Hybridkühler. Die ausführlichen Auslegungen der verschiedenen Rückkühler finden sich in der Richtlinie «SWKI 2003-3 Rückkühlung».

Trockenrückkühler
Beim Trockenrückkühler wird die Wärme mit Ventilatoren und über Wärmeübertrager direkt an die Umgebung abgegeben. Der Kühlvorgang benötigt kein Wasser und die Austrittstemperatur ist von der Ansaugtemperatur abhängig.
Je schneller Luft durch den Rückkühler strömt, desto lauter ist er. Übersteigt der Schall die zulässigen Grenzwerte, muss die Rückkühlfläche vergrössert werden. Damit sinken Luftdurchsatz und Luftgeschwindigkeit und damit der Geräuschpegel.
Der Trockenrückkühler weist eine hohe Betriebssicherheit auf, weil er nur mit Ventilatoren arbeitet. Entsprechend kostengünstig ist er auch bezüglich Unterhalt und Wartung.
Für die Nacht sollte der Rückkühler über die Funktion «Flüsterbetrieb» verfügen. Bei dieser Funktion kann er bei Bedarf mit tieferen Ventilator-Drehzahlen betrieben werden.

Verdunstungsrückkühler (Nasskühlturm)
Verdunstungsrückkühler werden auch als «Nasskühltürme» bezeichnet. Bei der offenen Bauart wird das Rückkühlwasser aus der Kältemaschine direkt in den Luftstrom des Rückkühlers eingespritzt. Es entsteht ein Luft-Wasser-Gemisch (Befeuchtung). Das Gemisch wird einerseits durch den Luftstrom gekühlt. Andererseits ermöglicht die Befeuchtung mit Wasser eine adiabatische Kühlung, bei der ein Teil des Wassers verdunstet. Dies entzieht dem Wasser Wärmeenergie, und die befeuchtete Luft kann unter die Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Gleichzeitig ist die Luft, die aus dem Verdunstungsrückkühler ausgeblasen wird, zu 100 % befeuchtet (gesättigt). Dabei werden mit dem Wasser die Schmutzteile aus der Luft gewaschen («Luftwäsche»). Zurück bleibt verschmutztes Wasser.

Rückkühlleistung
Die Rückkühlleistung eines Verdunstungsrückkühlers ist somit von der Ansaugtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit der Aussenluft abhängig. Bei hoher Luftfeuchtigkeit nimmt die Leistung ab und die Rückkühltemperatur steigt an. In unseren Breitengraden ist dies nur vor einem Gewitter der Fall.

Sehr effizient
Die offenen Verdunstungsrückkühler gelten als «Hochleistungs-Rückkühlungen». Die Rückkühltemperaturen sind um einige Kelvin tiefer, als die eines Trockenkühlers und arbeiten auch bei sehr hohen Temperaturen zuverlässig. Dadurch ermöglichen sie einen sehr effizienten Betrieb. Zudem weisen sie eine bis zu zehn Mal höhere Leistungsdichte auf als Trockenrückkühler. Dadurch beanspruchen sie weniger Fläche.

Aufwendig und komplex
Für die Verdunstung wird allerdings viel Wasser benötigt, was man exemplarisch an den Dampfwolken bei Kühltürmen von Kernkraftwerken sieht. Um die Kosten für die Wasseraufbereitung tief zu halten, wird in den Verdunstungsrückkühlern mit Umlaufwasser gearbeitet – das Wasser, das nicht verdunstet, wird wieder in den Kreislauf eingespeist.

Im Winter möglichst ohne Wasser
Vorzugsweise sollte ein Verdunstungsrückkühler nicht im Winter betrieben werden. Das Wasser erzeugt Nebelschwaden, die zu Reklamationen führen können. Zudem muss bei Aussentemperaturen unter 1 °C das Wasser in der Auffangwanne (elektrisch!) beheizt werden, damit es nicht einfriert.

Kostenintensive Wasseraufbereitung
Der Verdunstungsrückkühler braucht sehr viel Wasser, das aufwendig aufbereitet werden muss. Diese Aufbereitung und die

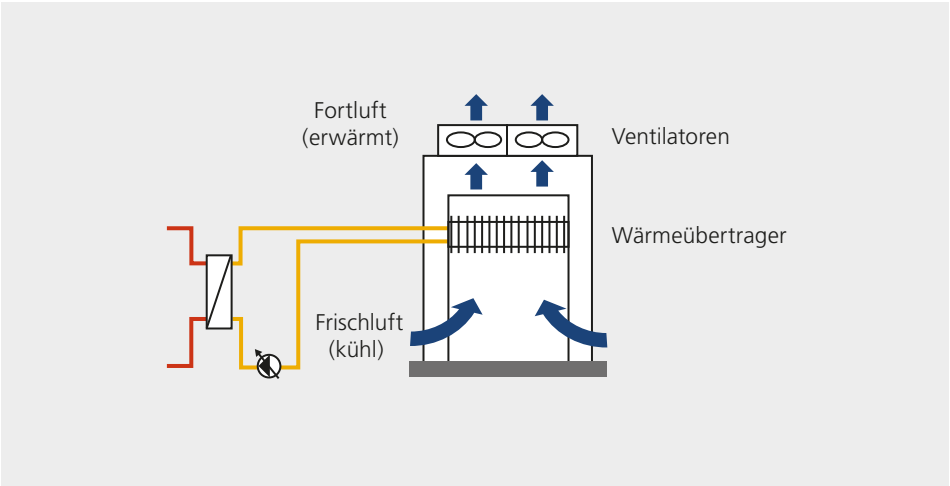


Bild 7.18: Trockenrückkühler.

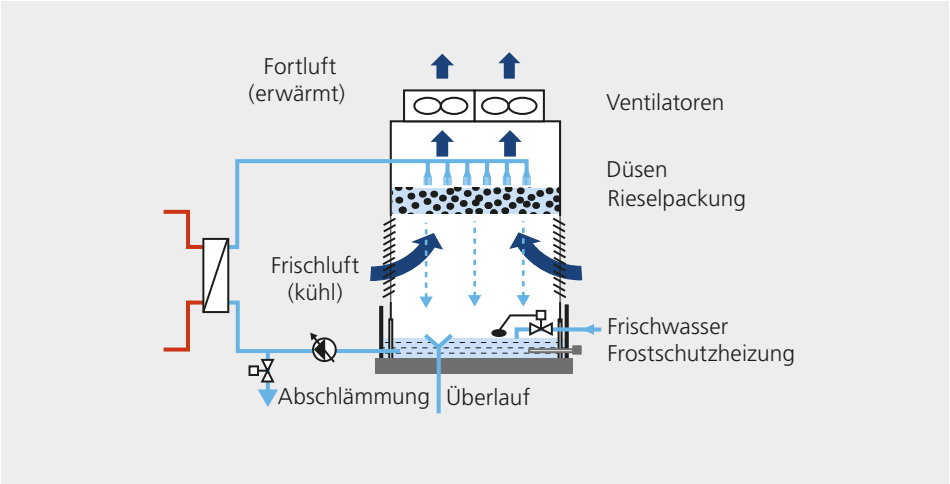


Bild 7.19: Offener Verdunstungsrückkühler mit Rieselpackung.

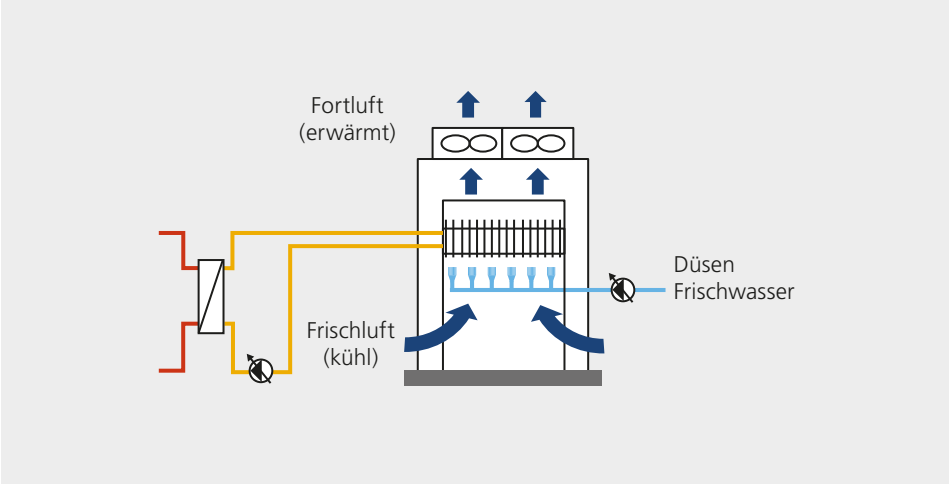


Bild 7.20: Geschlossener Verdunstungsrückkühler mit Besprühung von unten.

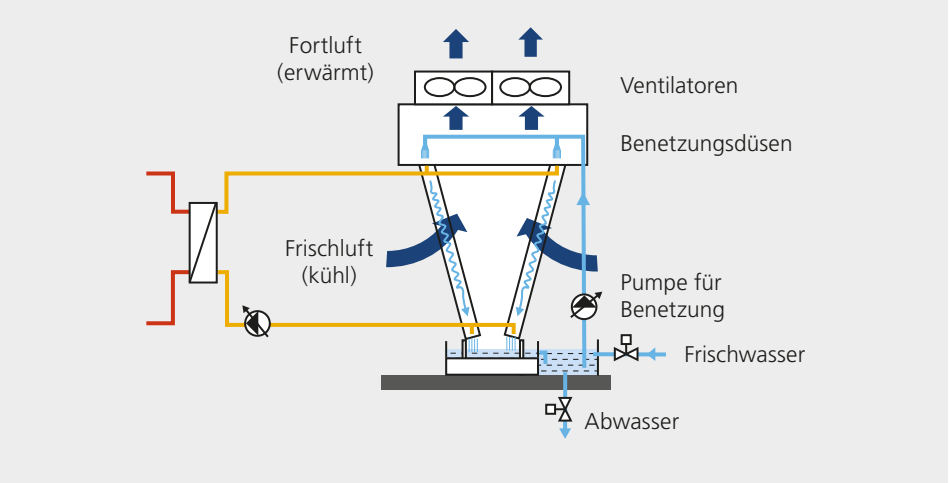


Bild 7.21: Hybrider Trockenrückkühler mit benetzten Wärmeübertragern (benetzt).

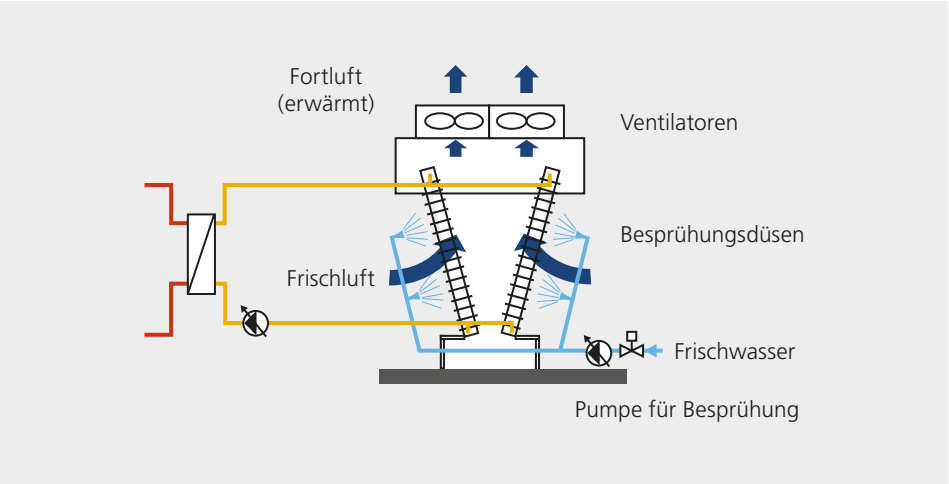


Bild 7.22: Hybrider Trockenrückkühler mit besprühten Wärmeübertragern (besprüht).

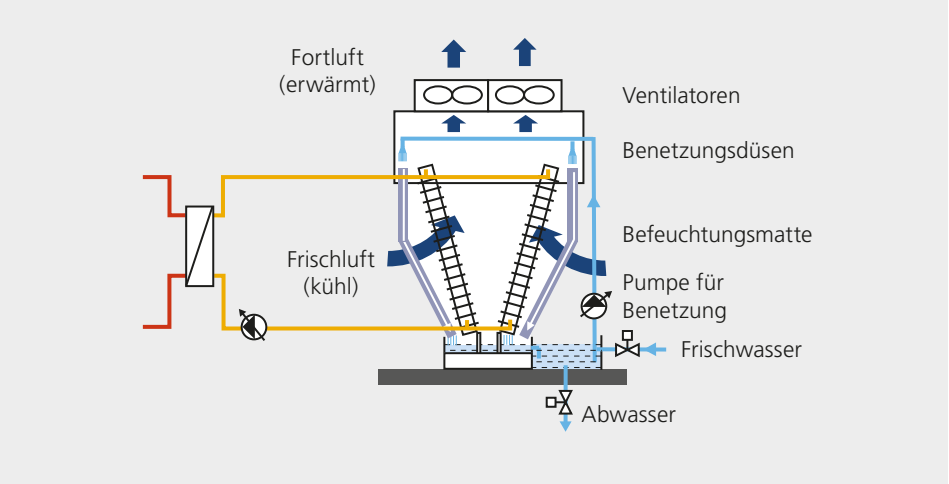


Bild 7.23: Hybrider Trockenrückkühler mit Befeuchtungsmatten (adiabat).

Die Abbildungen 7-17 bis 7-23 wurden in Anlehnung an Bilder der SWKI-Richtlinie Rückkühler und Bilder von Jäggi Hybridtechnologie AG abgeleitet.

grossen Wassermengen führen dazu, dass der Betrieb nicht günstig ist.
Zu beachten ist, dass rund um die Verdunstungsrückkühler hohe Feuchtigkeit und Temperaturen herrschen. Das kann zu Korrosionsschäden an den Stahlelementen in der näheren Umgebung führen.

Hohe Anforderungen an die Hygiene

Verdunstungsrückkühler sind eine Art «grosse Luftwäscher», die viel Material (Staub, Pollen, Keime, Bakterien, Sporen usw.) aus der Luft auswaschen. Dieses Material sammelt sich in der Auffangwanne. Sie muss daher regelmässig abgeschlämmt werden, was zu einem rund dreifach höheren Wasserverbrauch führt.
Bei mangelhafter Wartung entwickelt sich das Umlaufwasser zu einer hygienisch problematischen Flüssigkeit. Keime, Bakterien (Legionellen), Sporen lagern sich ab und können zu erheblichen Gesundheitsrisiken führen (siehe Kasten).

Regelmässige Wartung unerlässlich

Der Betrieb, die Wartung und der Unterhalt von Verdunstungsrückkühlern (speziell solche mit Umlaufwasser) ist aufwendig und kostenintensiv.
Besonders beim Umlaufwasser müssen organisatorische und technische Massnahmen beachtet werden:

- Keine Stagnation
- Qualität überwachen (wasserchemisch und mikrobiologisch)
- Periodische Reinigung (Arbeitsschutz beachten)

Legionellen-Ausbruch in Warstein
Im Spätsommer 2013 erkrankten 165 Personen in Warstein (Deutschland) an Legionellose. Die Legionellen stammten vermutlich aus einem Rückkühlwerk eines Industriebetriebes.

Hybride Trockenrückkühler

Hybride Rückkühler sind Trockenkühler, die bei höheren Umgebungstemperaturen zusätzlich mit Wasser benetzt, befeuchtet oder besprüht werden. Das verdunstete Wasser kühlt die Luft und die Oberflächen. Das Restwasser sollte aus hygienischen Gründen direkt ins Abwasser abgeleitet werden. Bei Systemen mit Umlaufwasser ist die Hygiene zu beachten. Um Ablagerungen auf den Wärmeübertragern zu verhindern sollte mindestens enthärtetes Wasser verwendet werden, bei Kühlern mit Befeuchtungsmatten ist das nicht erforderlich.

Etwas weniger effizient …

Die Wirkung der Verdunstung beim Hybrid-Kühler ist nicht ganz so hoch wie beim Verdunstungsrückkühler; entsprechend ist auch die Energieeffizienz etwas tiefer, da nicht die gleich tiefe Rückkühltemperatur erreicht wird.
Beim Hybrid-Kühler erreicht man in der Regel einen energetisch und wirtschaftlich optimalen Betrieb, wenn er bis zu einer Aussentemperatur im Bereich von 20° bis 25 °C (abhängig von der individuellen Situation) als Trockenrückkühler betrieben und erst darüber die «Bewässerung» dazu geschaltet wird.

… dafür einfacher im Unterhalt

Die kombinierten Rückkühler verbinden die Vorteile der Trocken- und Verdunstungskühlung, ohne sich die Nachteile des Verdunstungsrückkühlers einzuhandeln. Da Frischwasser eingesetzt wird, können die hygienetechnischen Vorgaben eingehalten werden. Durch die geschlossenen Wärmeübertrager findet auch keine Verschmutzung des Rückkühlmediums statt. Der wesentliche Vorteil zum Verdunstungskühler sind die viel geringeren Betriebskosten, denn der hybride Kühler wird mehrheitlich trocken betrieben und braucht dadurch viel weniger Wasser.

Wichtig: Das Wassersystem muss durch eine Fachperson geplant und ausgeführt werden.

Übersicht Rückkühler			
Art	**Trockenrückkühler**	**Hybride Trockenrückkühler**	**Verdunstungsrückkühler**
Kühlleistung	10 (bis 30) kW/m²	(10 bis) 30 kW/m²	ca. 300 kW/m²
Temperatur	5 K bis 9 K über der Ansaugtemperatur	3 K bis 5 K **unter** der Ansaugtemperatur	3 K bis 5 K **unter** der Ansaugtemperatur
Vorteile	• Geringe Betriebskosten • Geringe Wartungs- und Unterhaltskosten • Keine Wasserdampf-schwaden	• Leistungsspitzen und Temperaturen werden reduziert • Keine Wasserdampf-schwaden • Höhere Kühlleistung als Trockenrückkühler • Adiabat	• Kleiner Flächenbedarf
Nachteile	• Grosser Flächenbedarf	• Flächenbedarf • Wasseraufbereitung je nach Typ erforderlich • Mittlere Betriebskosten • Mittlere Wartung und Unterhaltskosten • Benötigen einen Wasser-anschluss • Reinigung der Matten	• Wasseraufbereitung erforderlich • Sehr hohe Betriebskosten • Grosse Wartungs- und Unterhaltskosten • Kritisch betreffend Hygiene • «Wintersicherung» • Hohe Umgebungsfeuchte und Korrosion

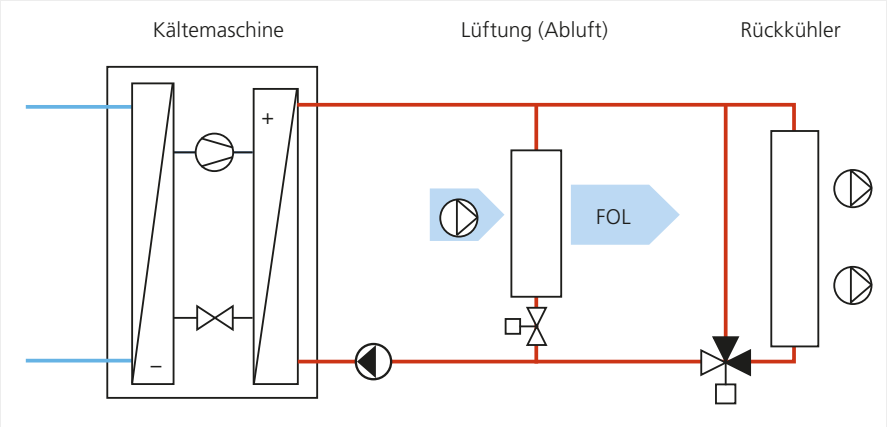
Bild 7.24: Die verschiedenen Rückkühler mit den wichtigsten Kenn-grössen und die Vor- und Nachteile der Systeme.

Die Lüftungsanlage nutzen, um die Wärme abzuführen
(für Gebäude mit Lüftungsanlagen, die mehr als 10 000 m³/h fördern)

Bei Gebäuden mit grossen Lüftungsanlagen kann die Wärme der Kältemaschine auch an die Abluft abgegeben werden. Diese führt die Wärme mit dem Lüftungsbetrieb ab.
Die Abgabe der Wärme an die Abluft erfolgt über ein Wärmeträger-Netz. Die Wärme wird über einen Wärmeübertrager an die Fortluft abgegeben (sogenannte Kreislauf-Verbund-Wärmerückgewinnungen, KVS-WRG).

Vorteile
- Mit geringem Platzbedarf kann die Wärme effizient abgeführt werden.
- Es wird nahezu keine zusätzliche Förderenergie benötigt.

Voraussetzungen
- Damit sich die Investition lohnt, muss die Lüftungsanlage ein Luftvolumen von mindestens 10 000 m³/h aufweisen.
- Die Abluft der Lüftungsanlage darf nicht wärmer als 26 °C sein.
- Die Lüftungsanlage und die Rückkühlung müssen nah beieinander liegen. Ansonsten muss die Wärmeabgabe über das bestehende Heizungsnetz erfolgen.



10 Merkpunkte zur Wärmeabgabe

1. Die anfallende Wärme aus der Kältemaschine soll möglichst genutzt werden.
2. Wenn ein genügend grosser Wärmebedarf besteht, kann eine Verschlechterung der Kühleffizienz durch das Anheben der Verflüssigungstemperatur die Gesamteffizienz des Systems (Heizen und Kühlen) dennoch verbessern.
3. Die Steuerung der Kältemaschine muss sicherstellen, dass die Verflüssigungstemperatur nur dann hochgefahren wird, wenn die Wärme auf höherem Temperaturniveau auch genutzt werden kann.
4. In Gebäuden mit einem kleinen Trinkwarmwasserverbrauch (z. B. Dienstleistung oder Detailhandel) kann das Trinkwarmwasser mit der Wärme aus der Heissgas-Enthitzung sehr effizient auf 40 °C bis 60 °C vorerwärmt werden.
5. Eine Verschiebung der Wärme vom Tag in die Nachtstunden kann mit einem Wärmespeicher erfolgen.
6. Indem die Gebäudemasse als Speichervolumen genutzt wird (z. B. mit TABS), können gerade in der Übergangszeit der Heizbedarf am Morgen und der Kühlbedarf am Nachmittag verringert werden.
7. Das Erdreich (Erdsonden) ermöglicht eine saisonale Speicherung der Wärme. Dabei ist zu beachten, dass im Sommer nicht mehr Energie eingelagert wird als im Winter entzogen wird.
8. Trockenrückkühler haben geringe Wartungs- und Betriebskosten, benötigen jedoch mehr Aufstellfläche.
9. Der reine Verdunstungsrückkühler ist leistungsstark und benötigt wenig Fläche. Dafür ist er in Unterhalt und Wartung teurer und muss bezüglich Hygiene (Gefahr von Legionellen) gut unterhalten werden.
10. Bei Rückkühlern muss ein besonderes Augenmerk auf den Lärm gelegt werden – besonders in der Nacht.

Kapitel 8

Hydraulische Systeme

Das hydraulische System verbindet die verschiedenen Komponenten der Kälte-Wärme-Maschine zu einem Gesamtsystem und dieses mit der übrigen Gebäudetechnik. Verschiedene Kreisläufe respektive hydraulische Schaltungen werden so miteinander verbunden, dass die Wärme nahtlos vom Kälteverbraucher zum Wärmeverbraucher transportiert wird. Die korrekte Ausgestaltung des hydraulischen Systems ist wesentlich verantwortlich für den effizienten Betrieb des Gesamtsystems.

8.1 Allgemeines

Das hydraulische System ermöglicht den Kälte- oder Wärmetransport an den Ort, wo die Energie (Wärme) aufgenommen beziehungsweise abgegeben wird.

Merkmale von Heizungs- und Kälteanlagen

Heizungskreise verhalten sich träge. Temperaturschwankungen in einem konventionellen Heizungssystem führen selten zu Störungen. Die Differenz zwischen der Betriebstemperatur und dem Wert, bei dem die Anlage aus Sicherheitsgründen abgeschaltet wird, sind in der Regel mit ca. 10 K eher gross.

Anders ist es bei Kälteanlagen; hier liegen die Temperaturen eng zusammen bei rund 5 K Unterschied. Die maximale Mediumtemperatur (sie wird durch die Konstruktion der Wärmeübertrager vorgegeben) ist nach oben begrenzt. Zudem verändern sich im Kälteprozess die Betriebstemperaturen sehr schnell. Sie folgen dabei dem Verdampfungs- und Verflüssigungsdruck.

Aus diesem Grund müssen Regelventile mit schnell laufenden Antrieben eingesetzt werden. Dadurch wird verhindert, dass die Verflüssigungstemperatur überrespektive die Verdampfungstemperatur unterschwingt (siehe Kapitel 9).

Hydraulische Schaltungen für Kälte- und Wärmeanlagen bestehen aus dem Zusammenschluss von vielen Teilkreisen. Diese müssen sorgfältig hydraulisch voneinander entkoppelt und gleichzeitig aber auch miteinander verbunden sein.

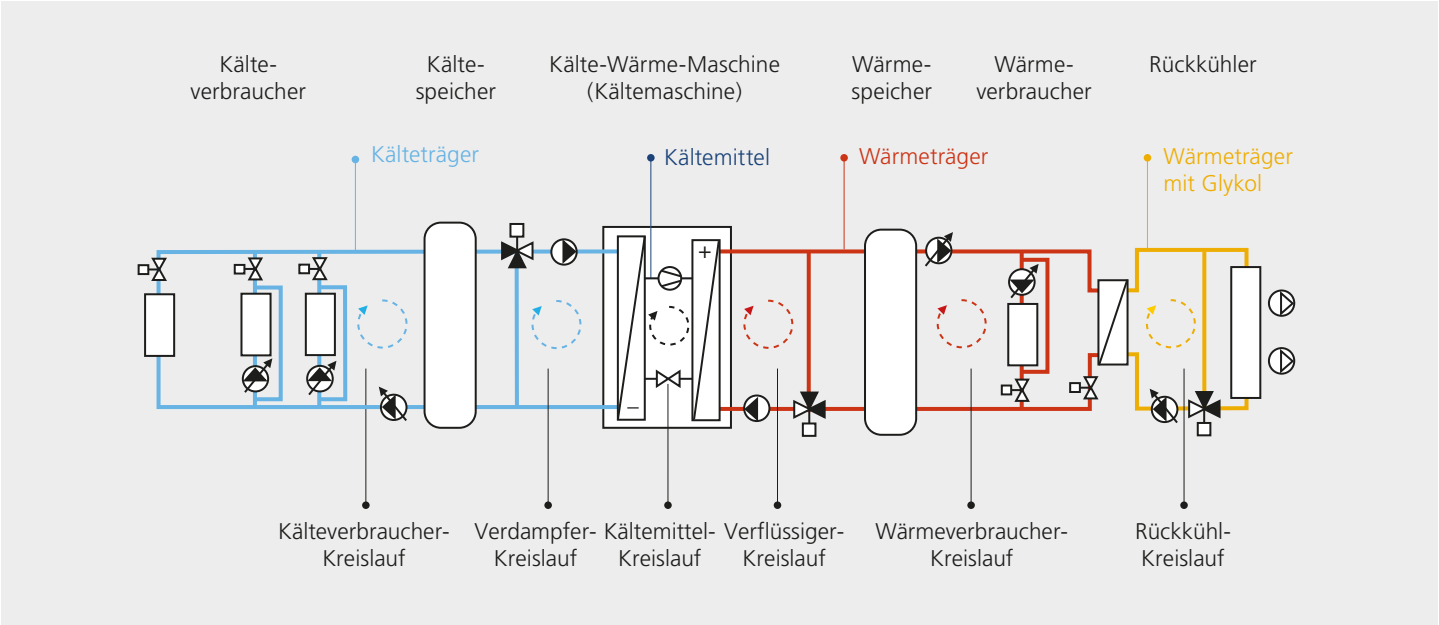


Bild 8.1: Vereinfachte Darstellung einer hydraulischen Schaltung mit den verschiedenen Kreisläufen.

8.2 Elemente der Hydraulik

Die Hydraulik beinhaltet die folgenden Elemente:

- Pumpen
- Ventile
  - Regelorgane (Drosselventile, Dreiwegventile)
  - Stellorgane (Einstellventile)
  - Regelhahnen
- Rohrleitungsnetz
- Speicher
- Kältemaschine, Kälte-Wärme-Maschine
- Kälteverbraucher (Luftregister, Kühldecken etc.)
- Wärmeverbraucher (Raumheizung, Rückkühler etc.)

Pumpen

In hydraulischen Systemen der Kälteanlagen werden in den meisten Fällen Kreiselpumpen installiert. Um die Energieeffizienz der Anlagen möglichst hoch zu halten werden heute drehzahlregulierte Pumpen mit einem Frequenzumformer eingesetzt. Die Leistungsaufnahme der Pumpe ist proportional zur dritten Potenz der Drehzahl. Kann die Drehzahl der Pumpe im Teillastbetrieb auf 70 % reduziert werden (minus 30 %), sinkt deren Energieverbrauch auf 34 % (minus 66 %), (siehe Anhang 11.4 Vertiefung 2: Pumpencharakteristik), Die effektive Einsparung liegt infolge der Frequenzumformer- und Wirkungsgradverluste der Pumpe und des Elektromotors etwas tiefer (ca. 15 % bis 20 %).

Bauarten der Pumpen

Je nach Einsatzgebiet und Grösse werden in der Kältetechnik unterschiedliche Pumpenarten genutzt (Bild 8.2).

Pumpenart	Volumenstrom m³/h	Druckdifferenz bar	Elektro-Anschluss V	Schutzart IP	Bemerkungen
Nassläufer	bis 50 m³/h	bis 1,2 bar	1 x 230 V	IP44	• Für kleinere Leistungen • Kleinere Förderhöhen • Motorenwärme wird durch das Medium abgeführt. • Abgesetzter FU
Trockenläufer (Inline-Pumpe)	bis 160 m³/h Ausnahmen: bis 300 m³/h	bis 2,5 bar	3 x 400 V	IP55	• Für mittlere Leistungen • Robust • Rund 15 % der Motorabwärme gehen in den Raum. • Rund 85 % der Motorabwärme gehen in den Wärmeträger und müssen berücksichtigt werden. • Dichtigkeit Stopfbuchsen
Norm-Sockelpumpen	ab 20 m³/h	bis 10 bar	3 x 400 V	IP55	• Für grössere Leistungen • Aufwendigere Installation • Rund 15 % der Motorabwärme gehen in den Raum. • Rund 85 % der Motorabwärme gehen in den Wärmeträger und müssen berücksichtigt werden • Dichtigkeit Stopfbuchsen • Spezielle Anwendungen

Bild 8.2: Die wichtigsten Pumpenbauarten und ihre Eigenschaften.

Regelventile

Bei den Ventilen im Kälteträger-Kreislauf – ob Regel- oder Drosselventil – sind folgende Punkte zu beachten:

- Wenn möglich werden die Ventile im Verdampferkreis auf der warmen Seite angeordnet. Hier sind sie weniger anfällig auf Korrosionsschäden, die durch Kondensat verursacht werden.
- Schnell schliessende und öffnende Antriebe verwenden. In der Regel werden Antriebe mit einem Elektromotor eingesetzt; in Ausnahmefällen auch mit Magnetantrieben oder mit pneumatischen Antrieben.
- Mischventile dürfen nicht als Trennventile eingesetzt werden. Der falsche Einbau des Ventils kann zu Schlägen und Vibrationen des Ventilkegels führen. Eine nachträgliche Versetzung des Ventils ist aufwendig. Die Einbauvorgaben des Herstellers sind unbedingt zu beachten.
- Nicht alle Dreiwegventile eignen sich für stetige Stellfunktion. Es gibt Modelle, die nur für eine reine Umstellfunktion zulässig sind.
- Bei grösseren Leitungsdimensionen können anstelle eines Mischventils zwei Durchgangsventile eingesetzt werden.

Die Punkte gelten weitgehend auch für den Wärmeträger-Kreislauf.

Hydraulischer Abgleich

Der hydraulische Abgleich – also das Einregulieren der Durchflussmengen im Verdampfer- und Verflüssiger-Kreislauf – muss immer vorgenommen werden. Mit dem hydraulischen Abgleich wird auch der definierte Volumenstrom über die Maschine sichergestellt. Die Volumenstromüberprüfung mit entsprechenden Messungen erfolgt zusammen mit der Pumpeninbetriebnahme vor der Inbetriebnahme der Kältemaschine und wird entsprechend dokumentiert.

Bei der Inbetriebnahme ist es oft schwierig, die Hydraulik fachgerecht abzugleichen. Denn meist fallen zu diesem Zeitpunkt nicht die gesamten Kältelasten an und nicht alle Leitungen werden «durchflossen». Um Messungen unter «Voll-Durchfluss» durchführen zu können, müssen jedoch alle Verbraucher angeschlossen und in Betrieb sein. Die verlässliche hydraulische Überprüfung von Erzeugung und Verbrauch kann daher nur im Sommer bei Aussentemperaturen über 25 °C erfolgen (Vollast-Bedingungen).

Für eine hydraulische Überprüfung mit entsprechenden Volumenstrommessungen braucht es:

- Klappe mit Volumenstrombegrenzer bei Anlagen mit variablem Volumenstrom
- STA-Ventile bei Anlagen mit konstantem Volumenstrom
- Wärmezähler
- Ventile mit Messblenden usw.

Die heute eingesetzten Pumpen können auch den Volumenstrom messen und anzeigen. Liefert jedoch diese interne Messung falsche Werte, läuft die Pumpe auch im falschen Bereich. Darum ist es sinnvoll, die Angaben der Pumpe mit einer unabhängigen Messung (z. B. mit einem Wärmezähler oder mit Messeinrichtungen wie einem STA-Ventil) zu überprüfen.

Werden die Verbraucher mit einem grösseren Volumenstrom versorgt, als erforderlich ist, führt dies zu einer geringeren Temperaturdifferenz. Die Temperaturdifferenz wiederum beeinflusst die Rücklauftemperatur und somit auch die Leistung der Kältemaschine. Möglicherweise wird so die Auslegungsleistung nicht mehr erreicht.

8.3 Einbindung Kältemaschine

Einbindung von Kältemaschinen ohne Temperaturbegrenzungen

Bei der Kältemaschine müssen die Ein- und Austrittstemperaturen auf der Verdampfer- und auf der Verflüssigerseite in einem bestimmten Temperaturbereich liegen. Beispielsweise führen zu hohe Eintrittstemperaturen im Verflüssiger dazu, dass die Kältemaschine über den Hochdruck abgeschaltet werden muss. Oder die Kältemaschine kann nicht starten, weil die Austrittstemperaturen aus dem Verdampfer zu tief ist.

Hinzu kommt, dass bei der hydraulischen Schaltung mit Speicher die Austrittstemperaturen beim Verflüssiger und beim Verdampfer genau auf den Sollwert geregelt werden müssen, damit die Temperatur im Speicher einen konstanten Wert aufweist.

Damit die Kältemaschine starten kann, benötigt sie:

- Durchfluss über dem Verflüssiger und
- Durchfluss über dem Verdampfer und
- Die Einhaltung gewisser Temperatur-Grenzwerte.

Beispiel

Verdampfer-Eintritt:	min.	8 °C
	max.	16 °C
Verflüssiger-Eintritt:	min.	25 °C
	max.	32 °C

Liegt beispielsweise die effektive Verdampfer-Eintrittstemperatur bei 21 °C und der Hersteller gibt eine maximale Temperatur von 16 °C vor, kann die Kältemaschine nicht starten, weil die Freigabekonditionen nicht erfüllt sind.

Einbindung von Kältemaschinen mit Temperaturbegrenzungen

Mit einer Beimisch-Schaltung können die zulässigen Temperaturgrenzwerte sowohl auf der

- Verdampfer-Seite (maximale Eintrittstemperatur) als auch auf der
- Verflüssigerseite (minimale Eintrittstemperatur)

eingehalten und Störungen vermieden werden. Diese hydraulische Schaltungen sind darum zu bevorzugen.

Konstante und variable Durchflussmenge

Früher hat man in der Kältetechnik mehrheitlich hydraulische Schaltungen mit konstanter Durchflussmenge gebaut. Bei diesen Systemen werden der Erzeuger und die (Kälte-)Verbraucher immer mit voller Durchflussmenge durchströmt. Dabei wird viel Wasser bewegt, was zwangsweise zu einem hohen Energieverbrauch der Pumpen führt.

Heute wird die Hydraulik so gebaut, dass bei leistungsregulierten Kälteerzeugern (20 % bis 100 %) im Verdampfer- und im Verflüssigerkreis mit variablem Volumenströmen gearbeitet wird.

Bild 8.3: Einbindung einer Kältemaschine ohne Eintrittstemperatur-Regulierung.

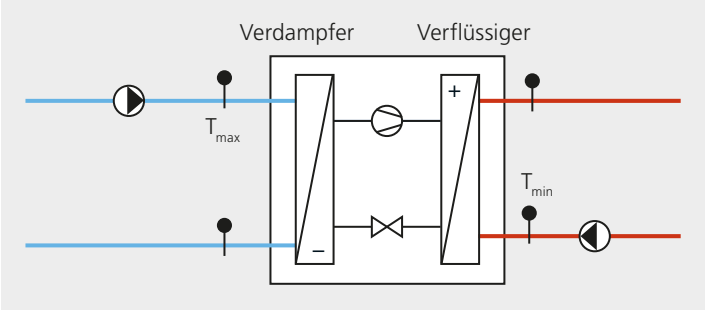
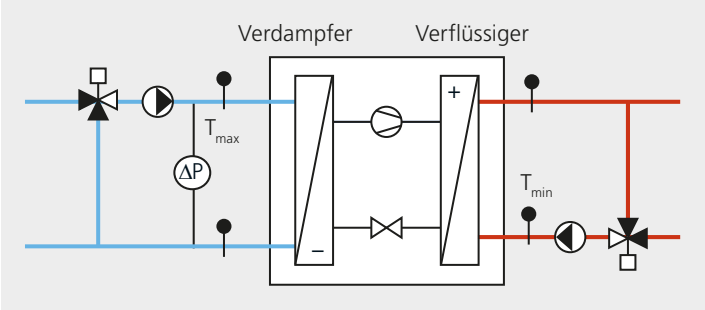


Bild 8.4: Einbindung einer Kältemaschine mit Temperaturbegrenzungen.



Check-Punkte für die Einbindung von Kältemaschinen

Bei Kältemaschinen (Erzeugern) für Klimakaltwasser sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Mehrere Kältemaschinen werden parallel eingebunden, um einen grösseren Volumenstrom (mit gleichem Temperatur-Niveau) zu erzielen.
- Prüfen, ob eine leistungsregulierte Kältemaschine (20 % – 100 %) eingesetzt werden soll.
- Die Verflüssiger- und Verdampfer-Volumenströme sollen variabel geführt werden (sofern dies der Lieferant der Kältemaschine erlaubt).
- Die Verflüssiger- und Verdampfer-Regelung soll wenn möglich durch die Reguliereinheit der Kältemaschine übernommen werden. Erfahrungsgemäss führt die Regulierung durch ein übergeordnetes System oft zu Problemen.
- Bei Anlagen mit einer Kälteleistung über 200 kW sollen zwei (oder mehr) Maschinen mit je 50 % Leistung oder allenfalls das Redundanzkonzept «n+1» geplant werden. Dies erhöht die Betriebssicherheit und optimiert den Betrieb (Energieeffizienz). Allerdings steigen dabei auch die Investitionskosten.
- Kälte-Wärme-Maschinen können sowohl kälte- wie auch wärmegeführt betrieben werden. Die Hauptnutzung definiert die Regelgrössen der Systemtemperaturen. So kann zum Beispiel vermieden werden, dass die KWM wegen eines Wärmebezugs von lediglich 10 % permanent auf einer Verflüssigungstemperatur von 50 °C gefahren wird.

Drehzahlgeregelte Pumpen als Alternative zur Beimisch-Schaltung

Der Einbau der Mischventile für die Temperaturbegrenzung ist aufwendig. Als Alternative kann die Verdampfungs- beziehungsweise die Verflüssigungstemperatur mit einer drehzahlregulierten Pumpe über den Volumenstrom begrenzt werden. Mit der Reduktion des Volumenstroms erhöht sich gleichzeitig die Energieeffizienz der Anlage (siehe auch Kapitel Regulierung).
Ob eine Kältemaschine mit variablen Volumenströmen arbeiten kann, muss mit dem jeweiligen Maschinenlieferanten abgeklärt werden – es braucht dazu sein schriftliches Einverständnis.

Hinweise zur Hydraulik auf der Verdampfer-Seite

Auf der Verdampfer-Seite muss hydraulisch und regeltechnisch sichergestellt werden, dass keine Betriebszustände auftreten, die Schäden und Störungen verursachen.

- Anlagen mit einem (Kälte-)Speicher müssen mit einer Beimisch-Regelung ausgerüstet sein, damit die Temperatur stets den Sollwert einhält.
- Möglichst kurze Leitungen – weniger als 10 Meter – im Verdampfer-Kreislauf wählen.
- Die Laufzeit[1] des Ventilantriebs darf nicht mehr als 45 Sekunden betragen.
- Die Durchflussüberwachung (Strömungswächter) ist im Verdampfer-Kreislauf ein Muss; Differenzdruckmessung oder thermische Strömungsüberwachung sind genauer als ein Paddel-Strömungswächter[2] und diesen entsprechend vorzuziehen.
- Nachlauf der Verdampfer-Pumpe vorsehen.
- Der Verdampfer-Kreislauf braucht unbedingt eine Temperaturüberwachung als Überhitzungsschutz. Dafür muss beim Eintritt in den Verdampfer eine Maximal-Temperaturbegrenzung der Temperatur vorgesehen werden.

Hinweise zur Hydraulik auf der Verflüssigerseite

Auf der Verflüssigerseite muss sichergestellt werden, dass die Eintrittstemperatur des Verflüssigers durch die Temperatur aus dem Rückkühler oder der Wärmenutzung nicht zu hoch ist. Sonst steigt der Druck, es kommt zu einer Hochdruckstörung und die ganze Kältemaschine wird abgeschaltet. Folgende Punkte sind zu beachten:

- Mit dem Lieferanten der Kältemaschine klären, wie hoch die minimale Wasser-Eintrittstemperatur zum Verflüssiger sein muss. Bei einer Wärmepumpe muss die Eintrittstemperatur der Auslegungstemperatur der Heizung entsprechen. Bei einer Auslegung von z. B. 29/35 °C beträgt die Eintrittstemperatur in den Verflüssiger bei 100 % Last 29 °C. Wird bei reduzierter Last eine konstante Austrittstemperatur verlangt, muss die Eintrittstemperatur durch die Beimischung entsprechend angehoben werden.
- Die Laufzeit des Ventilantriebes soll nicht mehr als 30 Sekunden betragen. Der Verflüssiger reagiert empfindlicher auf Temperaturänderungen als die Verdampfer-Seite. Mit einem trägen Ventilantrieb kann ein schneller Anstieg der Verflüssigungstemperatur eine Hochdruckstörung verursachen. Darum sind hier schnellere Antriebe einzusetzen.
- Nachlauf der Verflüssiger-Pumpe vorsehen.

---

1 Die Laufzeit ist die Zeit, die der Ventilantrieb braucht, um das Ventil von der Endstellung «AUF» auf die Endstellung «ZU» zu fahren.

2 Dieser Strömungswächter erfasst mit einem Paddel den Wasserstrom und schaltet so über einen Mikroschalterkontakt ein respektive aus.

8.4 Einbindung Kälteverbraucher

Die Temperatur der einzelnen Kälteverbraucher-Gruppen müssen individuell eingestellt werden können. Dies kann mit einer Drosselschaltung (A), einer Einspritzschaltung (B) oder einer Beimisch-Schaltung (C) gelöst werden (siehe Bild 8.5). Mit diesen Schaltungen können Schwankungen der Kaltwasser-Vorlauftemperaturen vermieden werden.

Bild 8.5: Grundschaltungen der Kälteverbraucher und ihre Eigenschaften. Die Schaltung ist jeweils auf das Hauptnetz bezogen.

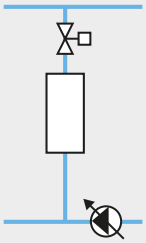
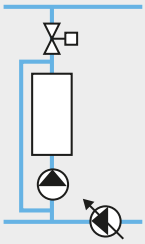
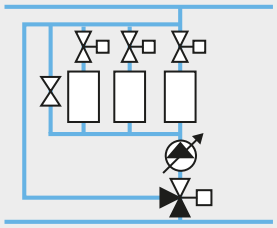
	A **Drossel-Schaltung**	**B** **Einspritz-Schaltung**	**C** **Beimisch-Schaltung**
			
Typische Anwendung	• Lüftungsanlagen • Prozesskälte • Bei latenter und sensibler Kühlung	• Thermoaktive Bauteilsysteme • Kühlbalken; Kühlbaffel • Kühldecken • Umluftkühler • Brüstungsgeräte • Verhindert latente Kühlung (Kondensatbildung) • Vorlauftemperatur ist mit der Regulierung beeinflussbar.	• Gleiche Anwendungen wie B • Zusätzliche Drosselschaltung bei einzelnen Verbrauchern (z. B. Kühldeckenelementen)
Zu beachten	• Schaltung, mit der die tiefstmögliche Temperatur erreicht wird (für Entfeuchtung). • Temperatur am Kälteverbraucher kann schwanken • Schichtungen bei Lüftungsanlagen-Kühler beachten	• Schaltung, mit der die geforderte Temperatur mit der höchsten Kälteträger-Temperatur erreicht wird. • Temperaturen können exakt eingehalten werden.	• Temperaturen können sehr exakt eingehalten werden.

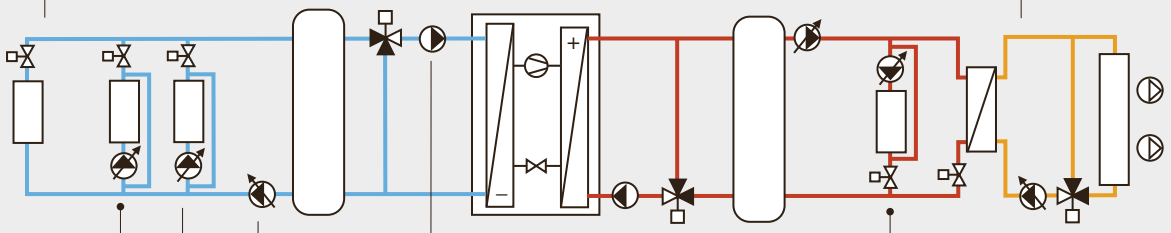
Bild 8.6: Überblick hydraulisches System einer Klimakälteanlage.

Temperaturen und Volumenströme im Erzeugerkreis
- Es gibt zwei Prinzipien mit denen die Temperatur am Erzeuger garantiert werden kann. Mit einer Beimisch-Schaltung (siehe unten) oder einer Volumenstrom-Regulierung.
- Die Temperaturen müssen auch im Teillastbetrieb eingehalten werden.
- Bei Beimisch-Schaltungen kann sich jede Pumpe über die hydraulische Trennung das Wasser selbst holen (zu beachten bei der Druckverlustberechnung).

Volumenströme
Kälteverbraucher, die mit «raumtemperaturnahen» Vorlauftemperaturen (>19 °C) arbeiten, sollten mit konstanten Volumenströmen bedient werden. Denn bei hohen Vorlauftemperaturen sind die Temperaturdifferenzen zwischen dem Raum und dem Kälteträger so tief, dass bei variablen Volumenströmen das System nicht mehr die gewünschte Leistung liefert.

Einbindung der Erzeuger
- Mehrere Erzeuger sind parallel einzubinden.
- Einzelne Erzeuger müssen hydraulisch vollständig vom Netz getrennt werden können.
- Ein minimaler Volumenstrom über den Erzeugern ist immer notwendig, damit die minimal erlaubte Strömungsgeschwindigkeit im Wärmeübertrager nicht unterschritten wird.

Rückkühlkreis
- Als «Wärmeverbraucher» eingebunden.
- Falls Einfriergefahr besteht, sind diese mit hydraulisch getrennten Kreisläufen auszuführen.



Frostsicherung

Wärmeverbraucher
Wärmeverbraucher deren Bedarf von der Aussentemperatur abhängt, benötigen eine Vorlauftemperatur-Regulierung, die die Aussentemperatur miteinbezieht.

Pumpen
- Einspritzschaltung erfordert immer eine Hauptpumpe, welche die Gruppen parallel versorgt.
- Einspritzschaltung ab drei Verbraucher-Gruppen sind energetisch und regelungstechnisch besser als drei einzelne Beimisch-Schaltungen.
- Einspritzschaltungen sind von der Energieeffizienz her immer zu bevorzugen, da eine Pumpe gleichzeitig alle Ventile übernimmt. Die Ventile sind bei der Einspritzschaltung parallel eingebunden und so muss der Pumpendruck «einmal» für alle Ventile erbracht werden.
- Kälteverbraucher sollten wegen der Effizienz immer mit Mengensteuerungen (Durchgangsventilen), d. h. variable Volumenströme reguliert werden.

Notwendige Armaturen und Instrumente

Im Verdampfer- und im Verflüssiger-Kreislauf müssen diverse Armaturen und Instrumente eingebaut werden, damit die fachgerechte Inbetriebnahme und spätere Optimierung sowie der Unterhalt gewährleistet werden können.

Obwohl beispielsweise die Kaltwassertemperatur oder die Druckdifferenz an der Kältemaschine abgelesen werden können, ist es sinnvoll, in den Zuleitungen zusätzliche Instrumente und Messeinrichtungen vorzusehen. Damit kann das Bedienpersonal allfällige Abweichungen schneller feststellen.

Bild 8.7 illustriert die empfohlenen Armaturen und Instrumente am Beispiel der Verflüssigerseite. Die Elemente auf der Verdampferseite sind identisch.

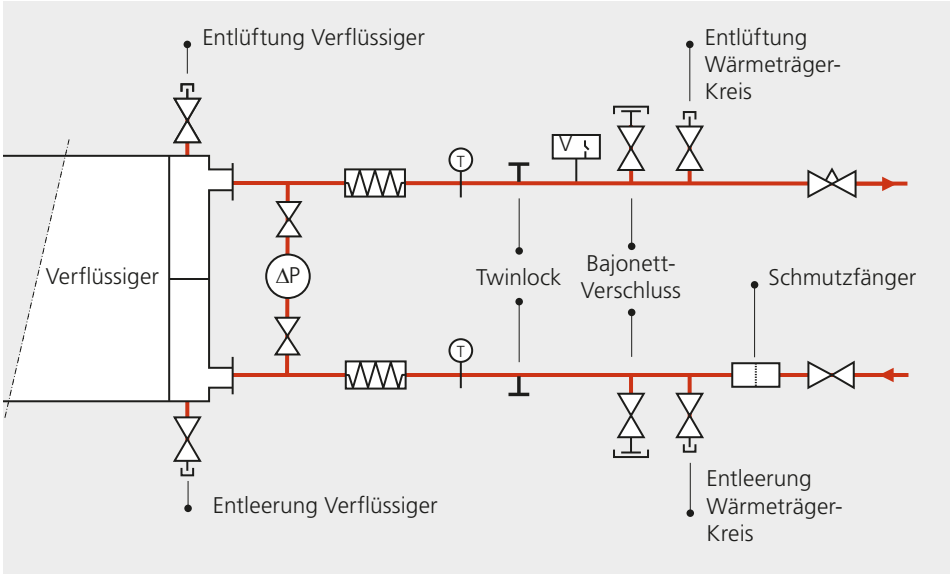


Bild 8.7: Armaturen und Instrumente am Beispiel der Verflüssigerseite.

Symbol	Bezeichnung	Erläuterung
	Absperrung	
	Absperrdrosselventil	Absperrdrosselventile werden für den hydraulischen Abgleich benötigt.
	Schwingungsdämpfer	Um die Schwingungen von der Maschine auf das Rohrleitungsnetz zu reduzieren, werden Schwingungsdämpfer eingebaut.
	Schmutzfänger	Auf der Eintrittsseite braucht es nach der Absperrung einen Schmutzfänger.
	Strömungswächter	Um das Einfrieren des Verdampfers zu verhindern ist der Einbau eines Strömungswächters erforderlich. Dieser kann auch bereits in der Maschine integriert sein.
	Bajonett-Verschluss (Storz-Kupplung) (optional)	Bei offenen Kreisläufen (Verdunstungsrückkühler) wird empfohlen, einen Bajonett-Verschluss vorzusehen. Dies ermöglicht eine einfache chemische Reinigung des Verflüssigers im Umlaufverfahren. Vor dem Bajonett-Verschluss muss noch zusätzlich eine Absperrung eingefügt werden.
T	Twinlock	Twinlock für die mobile Temperatur-, beziehungsweise Druckmessung. Es wird empfohlen an folgenden Orten Twinlock-Messstellen einzubauen: vor und nach den Pumpen und im Verbraucher-Rücklauf.
ΔP	Differenzdruckanzeige	Differenzdruckanzeige für Kontrolle des Volumenstroms
T	Temperaturfühler (T)	Temperaturanzeige

Bild 8.8: Notwendige Armaturen und Instrumente einer eingebundenen Kältemaschine.

8.5 Wärmeaufnahme

Das Konzept der hydraulischen Schaltung im Kaltwasserkreis hängt von folgenden Faktoren ab:

- Anlagengrösse (Leistung)
- Anzahl Verbraucher und Kältemaschinen
- Anforderungen an die zulässigen Temperaturen (Wie gross darf die Abweichung von der Solltemperatur sein?)
- Versorgungssicherheit

Die wichtigsten konzeptionellen Überlegungen bei der Ausgestaltung des hydraulischen Systems sind:

- Mit oder ohne hydraulische Trennung
- Mit oder ohne Speicher
- Mit variablem oder konstantem Volumenstrom

Hydraulische Trennungen

Trennungen können hydraulisch (Entkopplung) und technisch (Systemtrennung) realisiert werden. Die hydraulische Trennung stellt sicher, dass verschiedene Pumpen sich nicht aktiv beeinflussen. Sie bildet auch einen «hydraulischen Nullpunkt» zwischen den beiden Netzteilen.

Eine hydraulische Systemtrennung kann mit einem Speicher oder mit einem Bypass (Verbindungsrohr zwischen Vor- und Rücklaufverteiler ohne Speicherwirkung) ausgestaltet werden.

Bypass als hydraulische Entkopplung

Anlagen mit einfacher hydraulischer Entkopplung (häufig auch als Bypass bezeichnet) benötigen wenig Platz, d. h. keinen Speicher, und sind darum bezüglich Investitionskosten interessant. Der Volumenstrom im Verdampferkreis muss gleich, oder grösser sein als im externen Kreis. Sie haben jedoch folgende Nachteile:

- Keinen Einfluss auf die Schalthäufigkeit der Kältemaschine (fehlendes Speichervolumen)
- Hohe Abnutzung der Verdichter
- Fehlende Kälteleistung infolge der Startbegrenzung der Kältemaschine
- Verschlechterung der Energieeffizienz
- Häufigere Lastspitzen im Stromnetz
- Temperaturschwankungen im Kältenetz
- Hohe Beanspruchung der Regelventile und Antriebe
- Kürzere Lebensdauer der Antriebe

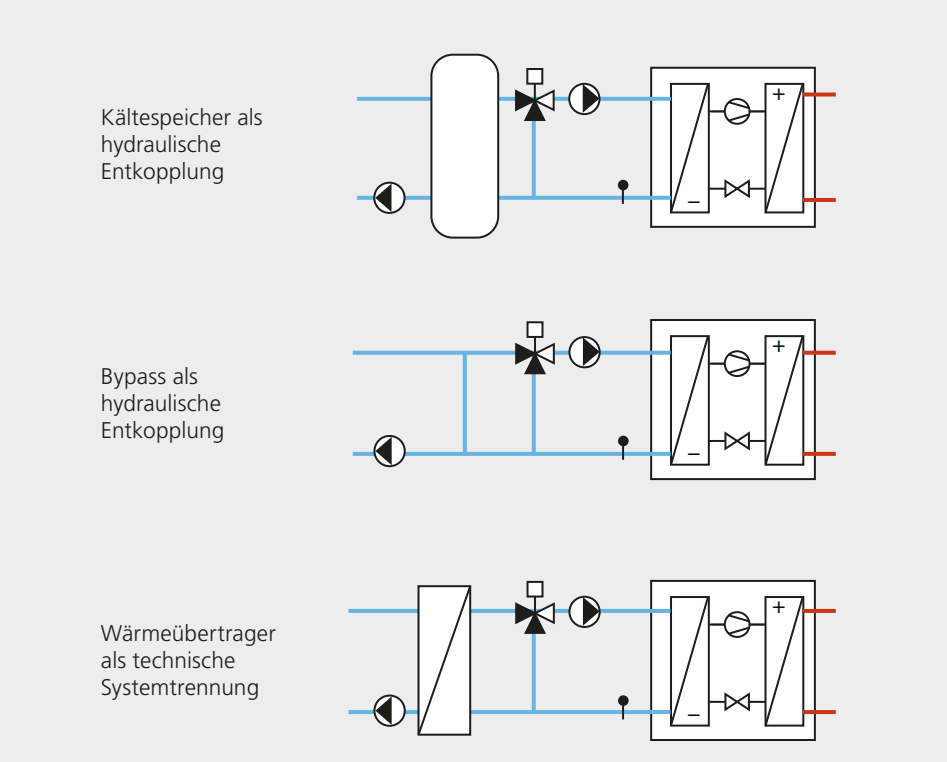


Bild 8.9: Beispiele von hydraulischen und technischen Trennungen.

Speicher als hydraulische Entkopplung

Bei Anlagen

- mit kleinem Netzvolumen
- bei Kältemaschinen mit begrenztem Regelbereich und
- bei höheren Ansprüchen an die Temperaturregulierung

ist es sinnvoll, einen Speicher vorzusehen. Damit kann unter anderem auch die Schalthäufigkeit der Kältemaschine in Grenzen gehalten werden.

Der Speicher (technischer Speicher oder Energiespeicher) übernimmt

- die hydraulische Entkopplung zwischen Kälte- respektive Wärmeerzeugerkreis und der Verteilung.
- Bereitstellung der Kälteleistung durch den Speicher bei kleiner Last und abgeschalteter Kältemaschine
- die Energiespeicherung als Sicherheitsreserve (z. B. bei einem Ausfall einer Kältemaschine)
- Stabilisierung der Leistungsregulierung

Der Zustand der Speicherladung kann für die Regulierung der Leistung der Kältemaschine und die Rangfolgeschaltung bei mehreren Erzeugern genutzt werden.

Technische Systemtrennung

Bei der technischen Systemtrennung handelt es sich um eine Anlagentrennung mit einem Wärmeübertrager. Er stellt sicher, dass zwei Anlagesysteme hydraulisch (flüssigkeitsseitig) getrennt sind – so z. B. bei der Einbindung des Rückkühlers. Dadurch können

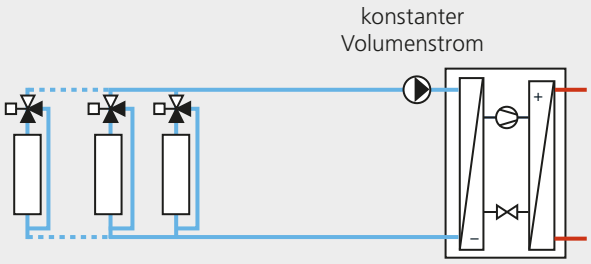
- verschiedene Medien (Wasser-Glykol)
- Netztrennungen von grossen Inhalten (Stichwort Sicherheit)
- Gewerkstrennungen wie Heizung und Kälte oder
- Systeme mit grosse statischen Druckdifferenzen (z. B. in Hochhäusern)

wirtschaftlich miteinander verbunden werden (siehe Kapitel 8.7 Einbindung Rückkühlung).

Systemübersicht der Schaltungen im Kaltwasserkreis

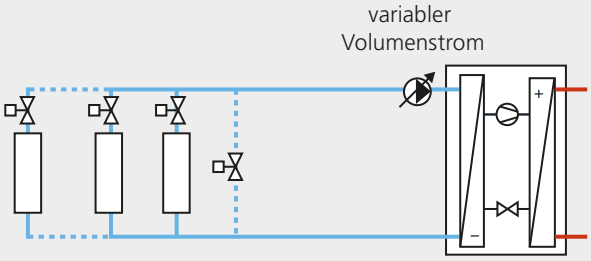
1. System ohne hydraulische Entkopplung mit konstantem Volumenstrom

- Das System wurde früher eingesetzt, es kommt heute nicht mehr zur Anwendung.
- Nachteil ist der hohe Energiebedarf der Pumpe(n) über das Jahr, da der Volumenstrom konstant bleibt. Zudem erzeugt dieses System eine tiefe Rücklauftemperatur, wenn kein Verbrauch ansteht.
- Da die Kältemaschine immer auf einem tieferen Temperaturniveau als erforderlich arbeitet, ist dieses System mässig energieeffizient.



2. System ohne hydraulische Entkopplung mit variablem Volumenstrom

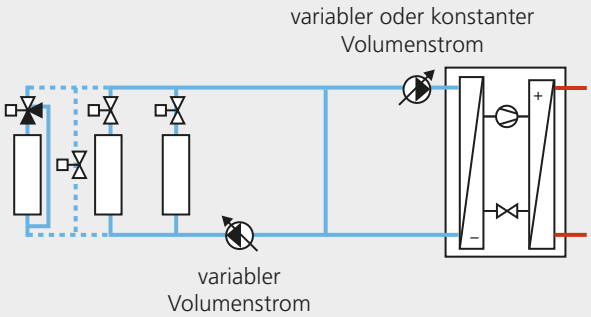
- Einfacher Aufbau der Anlage
- Preisgünstig
- Stellt höhere Ansprüche an die Planung, da die Mindestdurchflussmengen sichergestellt werden müssen (Sicherheit).
- Kälteverbraucher dürfen keine hohen Ansprüche an Leistungs- und Temperaturstabilität haben.



3. System mit hydraulischer Entkopplung ohne Speicher

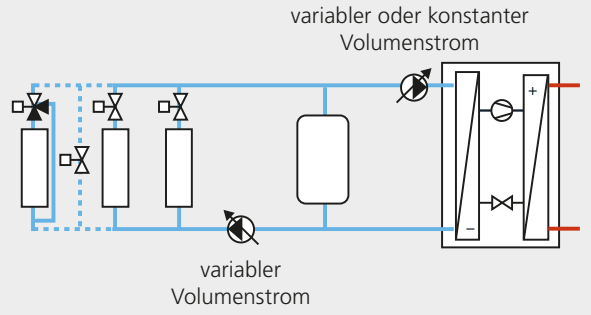
- Geeignet für Anwendungen mit hoher Grundlast ($\dot{Q}_{V\,min.} > \dot{Q}_{E\,min.}$)* Trifft dies nicht zu, dann weist das System schwankende Temperaturen und hohe Schalthäufigkeit auf.
- Es ist zu beachten, dass der Volumenstrom der Verdampfer-Pumpe ca. 5 % höher sein muss als der Volumenstrom über den Erzeugern.

* $\dot{Q}_{V\,min.}$ = minimale Verbraucherlast (minimaler Kältebedarf)
$\dot{Q}_{E\,min.}$ = minimale Erzeugerleistung (minimale Kälteleistung)



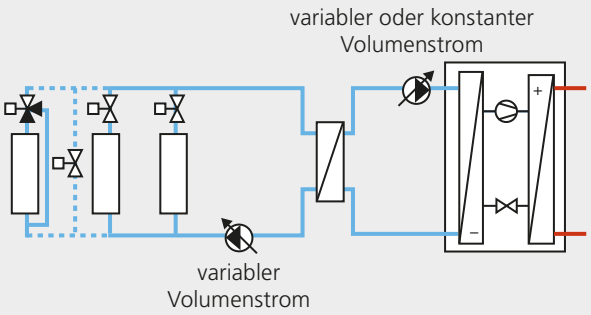
4. System mit hydraulischer Entkopplung mit einem Speicher

- Das System wird bei höheren Anforderungen an die Systemstabilität und Versorgungssicherheit (z. B. bei zwei parallel geschalteten Erzeugern) angewendet.
- Grösserer Platzbedarf
- Aufwendiger zum Installieren
- Die Speichergrösse ist von den Anforderungen an die Anlage abhängig (Bedarfsspitzen, Anzahl Einschaltungen des Verdichters pro Stunde, Genauigkeit der Kaltwassertemperatur etc.).



5. System mit einer Systemtrennung (Wärmeübertrager)

- Für Wasser-Glykol-Systeme
- Bei grossen Druckdifferenzen (Hochhaus)



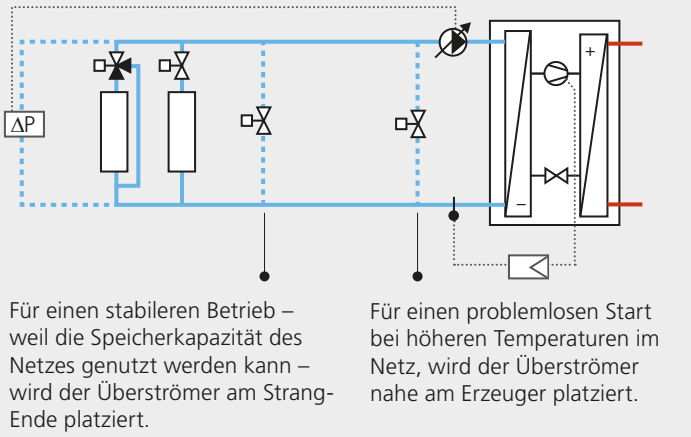
System mit variablem Volumenstrom ohne hydraulische Entkopplung

Bei Systemen mit variablem Volumenstrom und ohne hydraulische Entkopplung erfolgt die Anpassung der Kälteleistung, indem mehr oder weniger Wasser durch den Verdampfer geführt wird. Die Regelung des Volumenstromes erfolgt mit Drossel- beziehungsweise mit Einspritzschaltung bei den Verbrauchern.

Da sich die Erzeuger- und Verbraucherkreise bei diesem System hydraulisch beeinflussen, arbeitet der Verdampfer mit variablen Volumenströmen.

Bei mehreren Kältemaschinen ist jeder Maschine eine drehzahlgeregelte Kaltwasser-Pumpe zugeordnet, eine Verbraucher-Netzpumpe entfällt. Der Parallelbetrieb der drehzahlregulierten Pumpen stellt höhere Ansprüche an den Planer der Anlage und ist daher bei Anlagen mit mehr als einer Kältemaschine nicht zu empfehlen. Bild 8.10 zeigt ein Beispiel.

Bild 8.10: Kälteanlage mit variablem Volumenstrom und einem Bypass.



Verhalten von Volumenstrom und Temperaturen

Die beiden Grafiken in Bild 8.11 zeigen das Verhalten von Volumenstrom und der Temperaturen bei unterschiedlichen Leistungen der Kälteanlage.

Der Volumenstrom über den Verdampfer kann im vorliegenden Beispiel von 18 Liter pro Sekunde auf 10 Liter reduziert werden (1). Die Leistung nimmt dadurch von 100 % auf 55 % ab. In diesem Bereich bleibt die Temperaturdifferenz über den Verdampfer konstant bei 6 K. Weniger als 11 Liter pro Sekunde darf – gemäss den Angaben des Lieferanten – der Volumenstrom nicht betragen. Will man nun die Leistung weiter absenken, öffnet man den Bypass. Dadurch strömt nur noch ein Teil des Kaltwassers über die Kälteverbraucher (2). Das «erwärmte» Kaltwasser und das «ungenutzte» Kaltwasser aus dem Bypass mischen sich. Dadurch sinkt die Eintrittstemperatur in den Verdampfer und die Temperaturdifferenz über den Verdampfer sinkt bis auf 3 K (Abschaltpunkt).

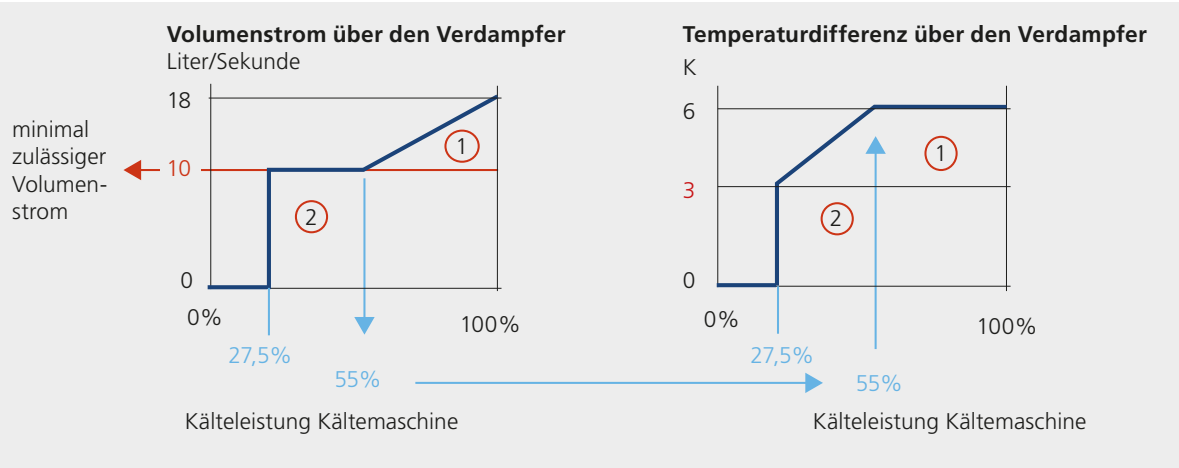


Bild 8.11: Verhalten von Volumenstrom und der Temperaturen bei unterschiedlichen Leistungen der Kälteanlage.

8.6 Kaltwasserspeicher

Kaltwasserspeicher dämpfen Temperatur-Veränderungen bei der Erzeugung und bei den Verbrauchern. Sie tragen dazu bei, dass das Gesamtsystem «gutmütig» wird. So reduzieren sie die Schalthäufigkeit der Kältemaschine und können Energie speichern (z. B. über den Tag verschieben).
Ob ein Speicher als Energiespeicher oder technischer Speicher genutzt wird, spielt aus Sicht der Hydraulik keine Rolle.

Technischer Speicher (Pufferspeicher)
Pufferspeicher haben ein relativ kleines Fassungsvermögen. Sie wirken als Vergrösserung des hydraulischen Netzes. Dadurch kann die Schalthäufigkeit der Kältemaschine reduziert werden. Diese soll möglichst gering sein – z. B. max. 3-Einschaltungen pro Stunde. Eine Kältemaschine mit Ein-Aus-Schaltung (0 % oder 100 %) benötigt einen grösseren Speicher als eine Kältemaschine mit einer Stufenschaltungen oder als leistungsregulierte Kältemaschinen (20 % – 100 %).
Bei einer Maschine mit einem breiten Regelbereich (z. B. FU-geregelte Maschine mit einem Leistungsbereich zwischen 20 % und 100 %) darf der Speicher kleiner ausgelegt werden. Ein kleiner Speicher bedingt jedoch, dass die Leistung der Kältemaschine beim Start auf den aktuellen Kältebedarf der Nutzungen begrenzt werden muss. Sonst läuft die Kältemaschine mit 100 % Leistung an, der Speicher ist in kurzer Zeit geladen und die Maschine schaltet wieder ab. Typischerweise werden solche Maschinen auf ihrer Minimumleistung eingeschaltet und dann langsam hochgefahren.

Auslegung des technischen Speichers
Bei der Auslegung des Speichers liefert die Regelungsart der Kältemaschine (Ein/Aus oder bedarfsabhängig mit einem FU) den ersten Hinweis zum notwendigen Speichervolumen.

- Bei einstufigen Kälteanlagen (Ein/Aus) liegt die maximale Schalthäufigkeit bei 50 % der Verbraucherleistung. Darunter und darüber verringert sich die Schalthäufigkeit.
- Bei leistungsgeregelten Kältemaschinen liegt diese maximale Schalthäufigkeit bei 50 % der kleinsten Leistungsstufe.

Liegt die Schalthäufigkeit über beispielsweise 3 Einschaltungen pro Stunde, muss das Speichervolumen grösser vorgesehen werden.

Als Richtwert kann das Speichervolumen mit 30 Liter bis 40 Liter Nettoinhalt pro kW Kälteleistung (bei 100 % Leistung) abgeschätzt werden.

Zu beachten: Bei der Auslegung des Speichers kann nur das aktive Speichervolumen berücksichtigt werden. Das Volumen der Mischzonen im oberen und unteren Teil des Speichers ist für die Energiespeicherung nicht nutzbar. Beim «schlanken» Speicher ist das nutzbare Volumen grösser, die Mischzonen im Verhältnis zum Gesamtvolumen sind kleiner.

Energiespeicher
Energiespeicher sind technische Speicher, die zusätzlich in der Lage sind, die Leistung einer Kältemaschine während mindestens einer Stunde vollständig aufzunehmen (zwischenzuspeichern).
Auch im Energiespeicher muss eine klar definierte Temperaturschichtung des Mediums gewährleistet sein. Ein Energiespeicher hat den Vorteil, dass er als Sicherheitsreserve zum Brechen von Leistungsspitzen (über 2 bis 3 Stunden) genutzt werden kann.

Einbindung von Kältespeichern

Im Gegensatz zum Heizungsspeicher wird bei Kälteanlagen das kalte Wasser von der Kältemaschine in den unteren Teil des Speichers eingeführt. Das «erwärmte» Wasser von den Verbrauchern wird oben in den Speicher eingespeist.

Ohne besondere Massnahmen stellt sich im Speicher eine Temperaturschichtung ein. Diese ist nicht immer gleich und hängt vom Verhältnis der beiden Volumenströme ab (Bild 8.12).

Falls in der Rücklaufleitung des Kältekreises Temperaturschichtungen entstehen (siehe Bild 8.12 Punkt A), verursachen diese schwankende Temperaturen am Eintritt der Kältemaschine. Diese wiederum kann zu Instabilität bei der Regulierung der Kältemaschine führen.

Um dies zu vermeiden, kann der obere Teil des Speichers als Mischkammer verwendet werden (siehe Bild 8.12, Punkt B). In diesem Fall muss im Speicher die Mischzone mit einem Lochblech abgetrennt werden. Die Rohrleitungsanschlüsse des Speichers erfolgen idealerweise von oben oder bei begrenzten Platzverhältnissen seitlich.

Bild 8.12: Hydraulische Einbindung eines Kaltwasserspeichers. Der Detailausschnitt zeigt, wie im Punkt A Temperaturschichtungen entstehen können.

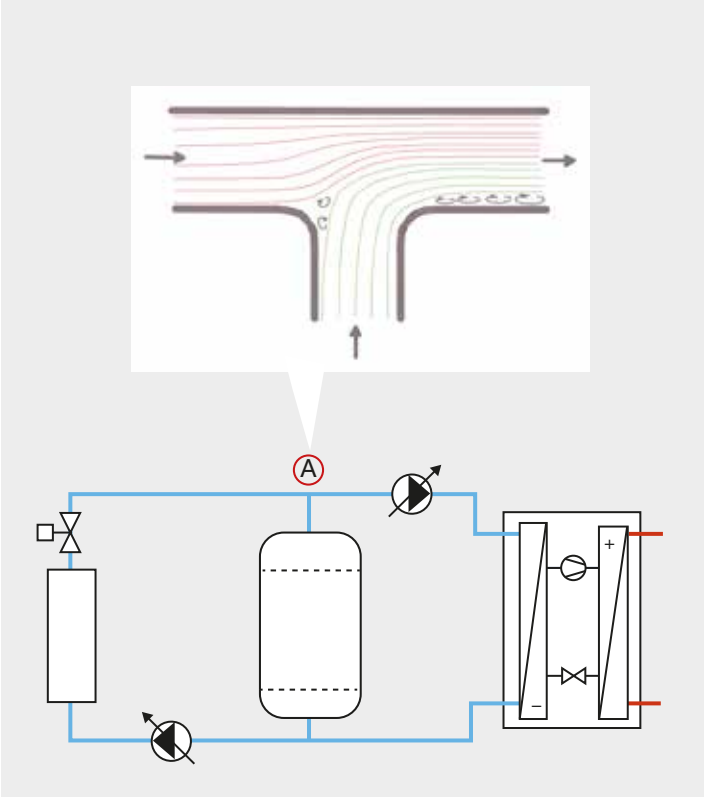
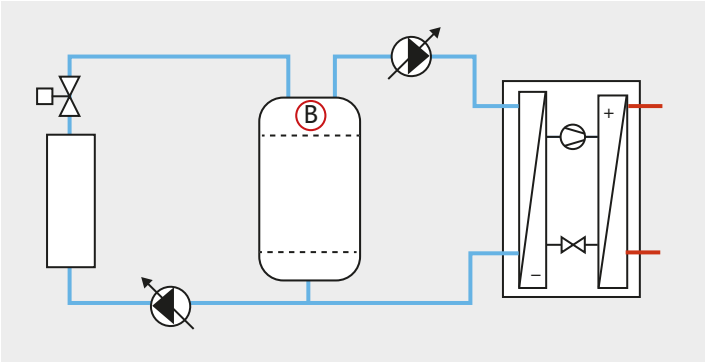


Bild 8.13: Hydraulische Einbindung eines Kaltwasserspeichers mit einer Mischkammer (B) im oberen Bereich des Speichers.



Beispiel: Anlage mit technischem Speicher

Im Beispiel Bild 8.14 wurde ein Speicher mit einem kleinen Speichervolumen gewählt. Wenn die Kältemaschine abgeschaltet wird, sobald der Speicher geladen ist, entlädt sich der Speicher umgehend wieder. Und sogleich schaltet die Kältemaschine wieder ein – die Maschine taktet.
Es ist deshalb empfehlenswert, die beiden identischen Kältemaschinen im Beispiel so zu regulieren, dass die zweite Maschine über die Kältekreislauf-Rücklauftemperatur ausschaltet, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur der Verdampfer die Hälfte des Auslegungswertes erreicht hat.

Speicherbewirtschaftung bei Anlagen mit grösserem Speicher

Die Speicherbewirtschaftung erfolgt in der Regel aufgrund der Temperaturen im Speicher (Schichtung). Zusätzlich kann auch der Volumenstrom (Strömungsrichtung) in der Leitung zum Speicher herangezogen werden.
Die Leistung von Kältemaschinen mit breitem Regelbereich kann aufgrund der Speicherladung vorgegeben werden, z. B. durch Vorgabe der Verdampfer-Eintrittstemperatur mittels Beimisch-Regulierung.

Bei der Anwendung eines Latentspeichers ist die Energiedichte höher als bei einem Speicher ohne Phasenwechsel – demzufolge kann mehr Energie im gleichen Volumen gespeichert werden. Damit können die Tagesspitzen (Tag-Nacht-Speicherung) und die erforderliche maximale Kältemaschinenleistung reduziert werden.
Weitere Details zu Speichern und zur Speicherauslegung siehe Kapitel 10.4.

Hinweis: Kältemaschinen, welche die anfallende Wärme zu 100% für die Wärmeerzeugung an die Heizung abgeben können, brauchen auf der Heizungsseite ein Speichervolumen, das 1,3-mal so gross ist wie der Kältespeicher (Energiebetrachtung).

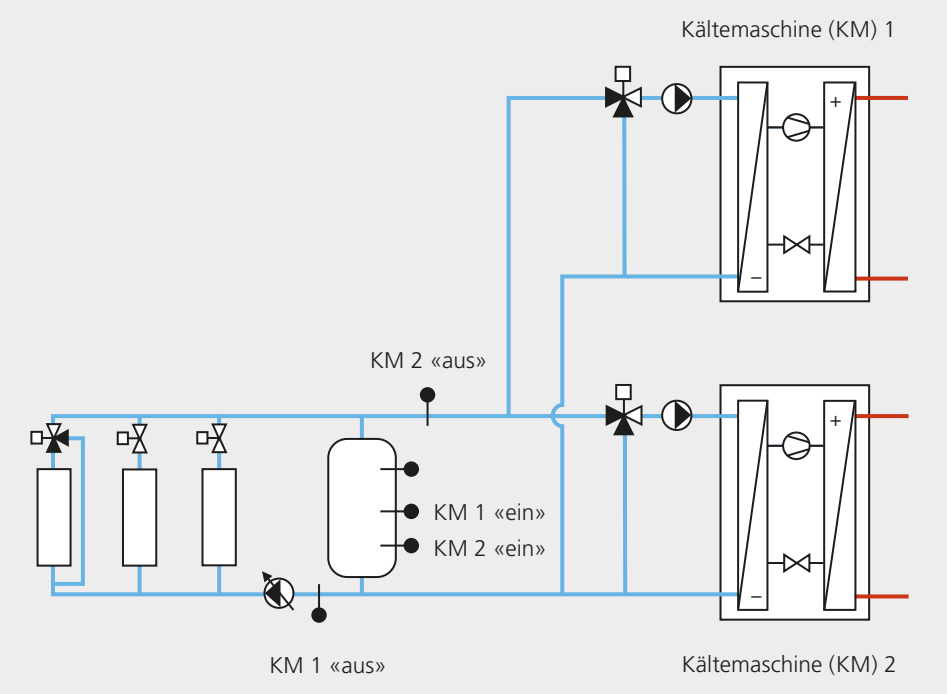


Bild 8.14: Beispiel einer Kälteanlage mit 2 identischen Kältemaschinen und einem (kleinen) technischen Speicher. Die Kältemaschinen erhalten unterschiedliche Ausschalt-Signale.

Konstruktion des Kaltwasserspeichers

Bei der Konstruktion des Speichers ist darauf zu achten, dass es durch den Medium-Ein- und Austritt zu keiner unerwünschten Zirkulation kommt.

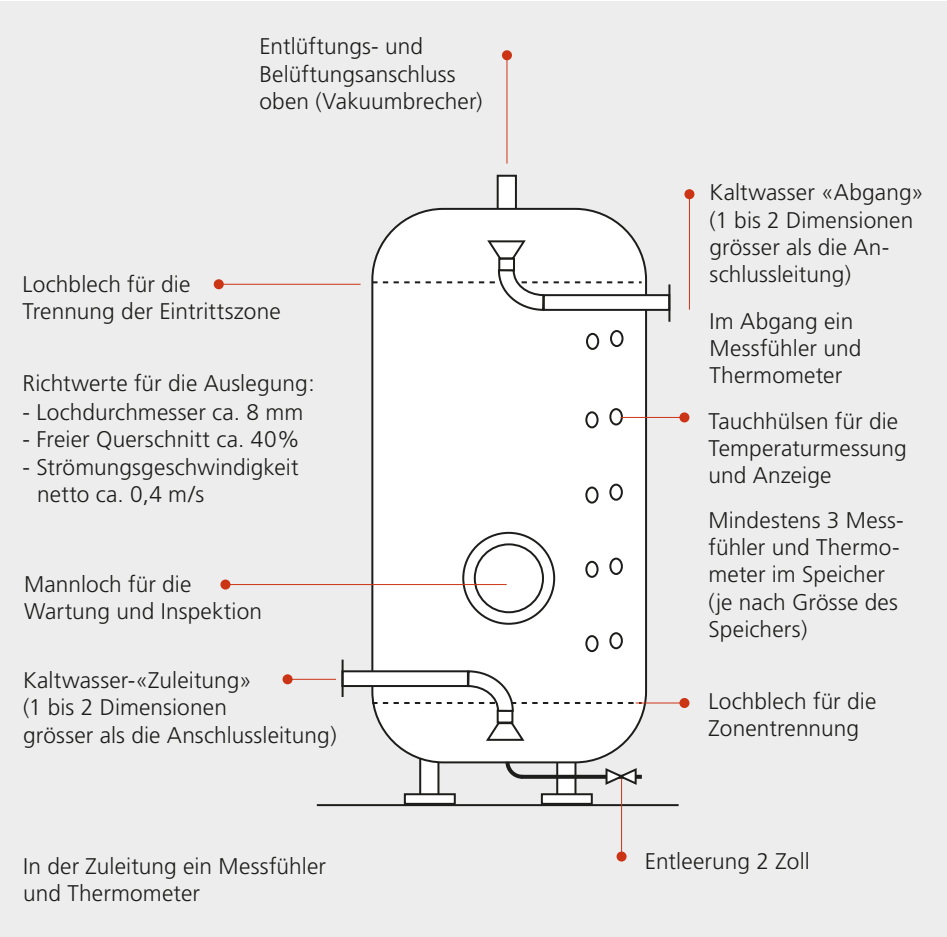


Bild 8.15: Beispiel der Konstruktion eines Kaltwasserspeichers mit Angaben zur Ausstattung.

8.7 Einbindung Rückkühlung

Die hydraulische Einbindung der Rückkühlung in das Kälte- und Wärmesystem beinhaltet meist eine minimale Begrenzung der Verflüssiger-Eintrittstemperatur mit einem Dreiwegventil. Damit wird sichergestellt, dass die Eintrittstemperatur nicht zu tief wird.

Frostschutz-Massnahmen bei Rückkühlern

Geschlossene Rückkühlkreise müssen immer mit Wasser-Glykol gefüllt werden, damit sie nicht einfrieren – besonders im Winter, wenn kein (Rück-)Kühlbedarf besteht. Wärmeträger ohne Glykol-Zusatz müssen im Winter entweder entleert oder elektrisch beheizt werden. Bei Systemen, die entleert werden müssen, besteht immer ein Restrisiko, dass sie einfrieren und ein Entleeren erhöht die Korrosion in den Rohren. Elektrisch beheizte Systeme müssen aus Sicht der Energieeffizienz möglichst vermieden werden.

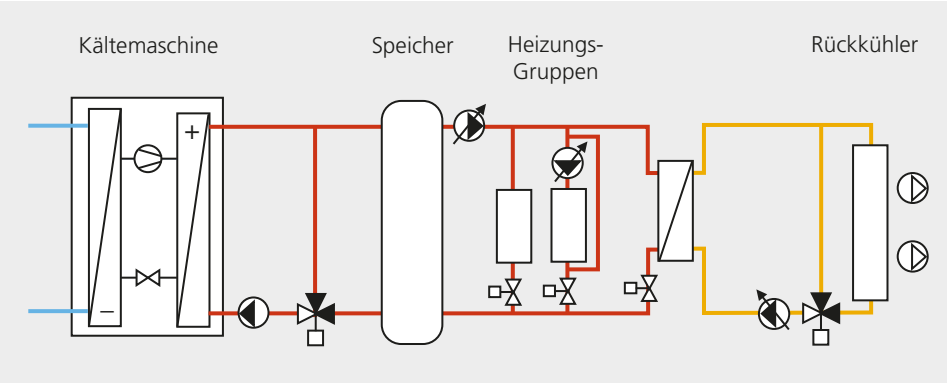


Bild 8.16: Kälte-Wärme-Maschine mit der Einbindung der Rückkühlung ins Wärmenetz. Die Wärme wird prioritär von der Heizung genutzt. Wärme, die von der Heizung nicht genutzt werden kann, wird an die Umgebung abgegeben (Rückkühlung).

Einfluss der Distanz zwischen der Kältemaschine und dem Rückkühler

Bei kleiner Distanz zwischen Kältemaschine und Rückkühlung genügt eine Beimischregulierung auf der Verflüssigerseite mit einem Dreiwegeventil und einer Pumpe. Bei grösserer Entfernung, wenn das Medium mehr als 15 Sekunden für den Weg zwischen Verflüssiger und Rückkühler benötigt (das entspricht rund 10 m), sollten eine zweite Umwälzpumpe und ein Bypass installiert werden, um die Regulierung stabil zu halten.

Bei HLK-Anlagen wird die Einbindung gemäss Bild 8.17 empfohlen (siehe auch Kapitel 9.5).

Die ca. 10 Meter Distanz (Länge) sind abhängig von der Fliessgeschwindigkeit und vom Durchmesser der Leitung. Die 10 Meter Distanz sind abgeleitet aus der 15-Sekunden-Fliessdauer des Mediums über diese Strecke.

Die Berechnung der Länge erfolgt über:

$$\text{Länge} = \frac{4 \times 15 \text{ Sekunden} \times \text{Volumenstrom}}{(\text{Innendurchmesser der Leitung})^2 \times \pi}$$

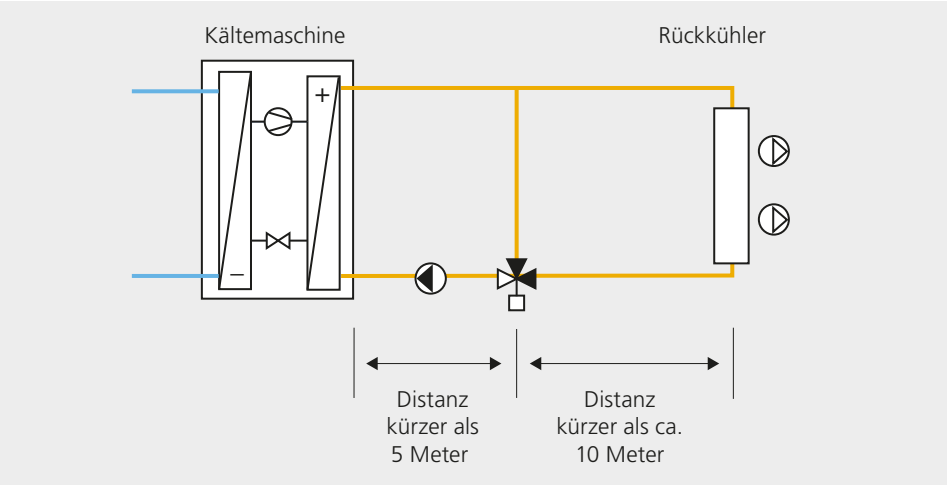


Bild 8.17: Hydraulische Einbindung des Rückkühlers bei kurzer Distanz zwischen Verflüssiger und Rückkühler.

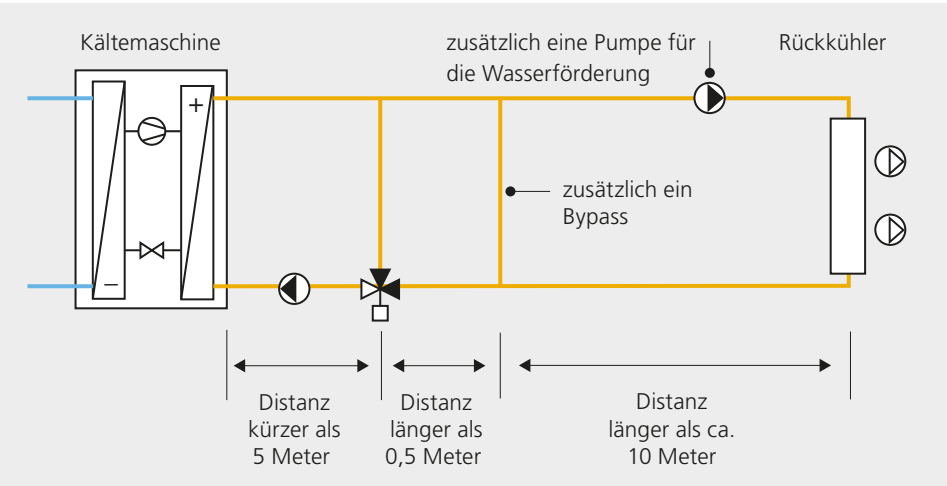


Bild 8.18: Hydraulische Einbindung des Rückkühlers bei grösserer Distanz zwischen Verflüssiger und Rückkühler.

8.8 Freie Kühlung

Bei der freien Kühlung (Free-Cooling) erfolgt die Kühlung ohne Kältemaschine. Freie Kühlungen können grundsätzlich mit variablem Volumenstrom betrieben werden und bedürfen keiner Speicherung beziehungsweise hydraulischen Trennung. Bei Aussentemperaturen unter 1 °C besteht bei einem Wassersystem die Gefahr, dass es einfriert. Dies muss mit einem Wasser-Glykol-Kreislauf, einer Frostschutz-Heizung oder einer Selbstentleerung verhindert werden.

Um die freie Kühlung optimal zu nutzen. wird der Mediumkreislauf mit kleinen Temperaturspreizungen von 3 bis 4 K ausgelegt. Daraus resultieren grosse Volumenströme und entsprechend grosse Rohrquerschnitte.

Bei Kältemaschinen mit einem Rückkühler muss die Einbindung der Wärmeübertrager-Systemtrennung beachtet werden. Bei den Wärmeübertragern muss mit Druckverlusten und Temperaturspreizungen von der Primär- zur Sekundärseite von 2 K und einer Druckdifferenz von maximal 20 kPa gerechnet werden (auch im Teillastbetrieb).

Die serielle Einbindung der freien Kühlung einer Kältemaschine (Bild 8.21) ist hydraulisch und regeltechnisch anspruchsvoll, da die Kältemaschine sehr sensibel auf schwankende und sich stark ändernde Temperaturen reagiert.

In Bild 8.19 bis Bild 8.23 sind verschiedene Einbindungen dargestellt. Die angegebenen Kältekreis-Vorlauftemperaturen sind Richtewerte, welche sich auf den Standort Zürich-Kloten beziehen.[3]

3 Quelle: ZHAW, Studie Free Cooling in der Klimakälte: Untersuchung des Potentials in der Schweiz, 2018)

1. Free-Cooling über den Rückkühler der Kältemaschine

Die Wärme wird entweder über den Wärmeübertrager an den Rückkühler abgegeben oder über die Kältemaschinen. Im Free-Cooling-Betrieb ist die Kältemaschine abgeschaltet (bivalent-alternativer Betrieb). In der Regel für Anlagen mit Kälteverbraucher geeignet, die mit folgender Kältekreis-Vorlauftemperatur arbeiten:

- bei Trockenrückkühlung grösser 22 °C
- bei benetzten Rückkühlern[4] grösser 22 °C

Vorteil

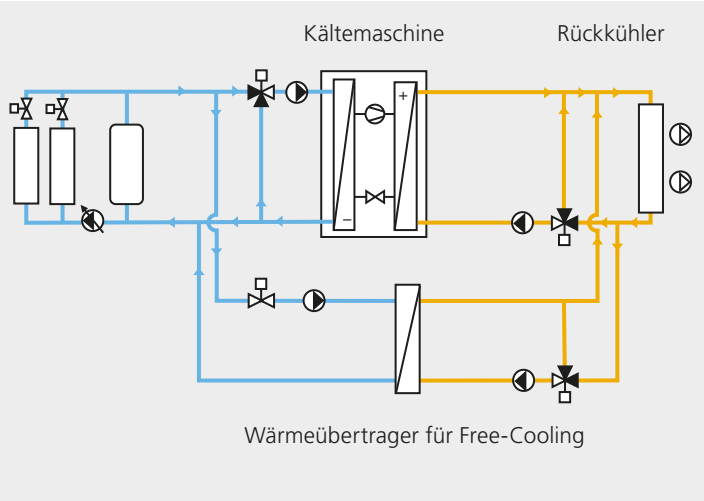
- kostengünstige Variante

Nachteil

- Temperaturdifferenz über den Wärmeübertrager verringert das Potenzial.

4 Hybridrückkühler, die ständig benetzt werden.

Bild 8.19: 1. Free-Cooling über den Rückkühler der Kältemaschine.



2. Free-Cooling über einen parallel eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler

Die Wärme wird entweder direkt über den Free-Cooling-Rückkühler abgegeben oder über die Kältemaschine an den Rückkühler abgegeben. Im Free-Cooling-Betrieb ist die Kältemaschine abgeschaltet (bivalent-alternativer Betrieb).

In der Regel für Anlagen mit Kälteverbraucher geeignet, die mit folgender Kältekreis-Vorlauftemperatur arbeiten:

- bei Trockenrückkühlung grösser 22 °C
- bei benetzten Rückkühlern grösser 18 °C

Vorteil

- effizienter als Variante 1

Nachteile

- aufwendigere Einbindung
- für den Frostschutz Wasser-Glykol als Kälteträger einsetzen oder einen Rückkühler für das Free-Cooling nutzen, der sich selber entleert.

3. Free-Cooling über einen seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler

Die Wärme wird entweder

- vollständig über den Rückkühler Free-Cooling abgegeben oder
- vollständig über die Kältemaschine und den Rückkühler abgegeben oder
- über den Free-Cooling-Rückkühler vorgekühlt und dann über die Kältemaschine und den Rückkühler abgegeben

Im Free-Cooling-Betrieb kann die Kältemaschine unterstützend wirken (bivalent-paralleler Betrieb).

In der Regel für Anlagen mit Kälteverbraucher geeignet, die mit folgender Kältekreis-Vorlauftemperatur arbeiten:

- bei Trockenrückkühlung grösser 18 °C
- bei benetzten Rückkühlern grösser 14 °C

Vorteil

- effizienteste Variante (mit Variante 5)

Nachteile

- aufwendigere Einbindung
- für den Frostschutz Wasser-Glykol als Kälteträger einsetzen oder einen Rückkühler für das Free-Cooling nutzen, der sich selber entleert

Bild 8.20: 2. Free-Cooling über einen parallel eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.

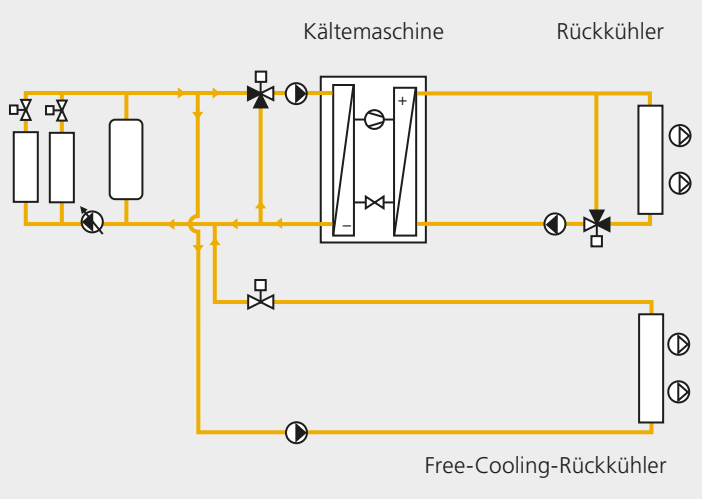
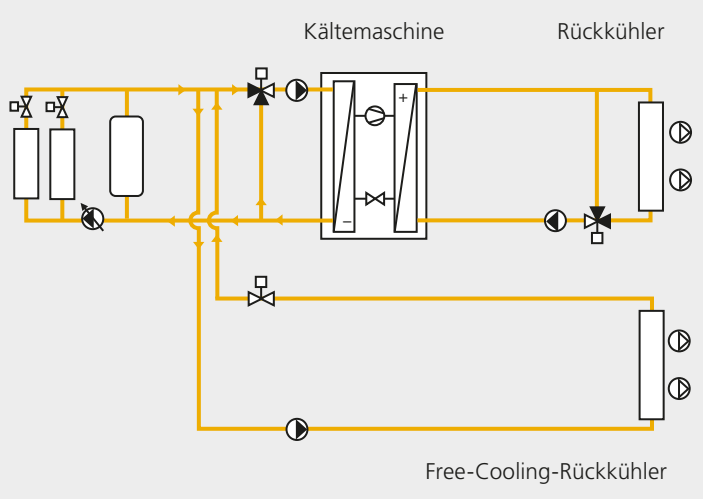


Bild 8.21: 3. Free-Cooling über einen seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.



4. Free-Cooling bei Direktkondensation mit einem parallel eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler

Die Wärme wird entweder direkt über den Free-Cooling-Rückkühler abgegeben oder über die Kältemaschine (Verflüssiger) direkt abgegeben.

Im Free-Cooling-Betrieb ist die Kältemaschine abgeschaltet (bivalent-alternativer Betrieb).

In der Regel für Anlagen mit Kälteverbraucher geeignet, die mit folgender Kältekreis-Vorlauftemperatur arbeiten:

- bei Trockenrückkühlung grösser 22 °C
- bei benetzten Rückkühlern grösser 18 °C

Vorteil

- effizienter als Variante 1

Nachteile

- aufwendigere Einbindung
- für den Frostschutz Wasser-Glykol als Kälteträger einsetzen oder einen Rückkühler für das Free-Cooling nutzen, der sich selber entleert

5. Free-Cooling bei Direktkondensation mit einem seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler

Die Wärme wird entweder:

- vollständig über den Free-Cooling-Rückkühler abgegeben oder
- vollständig über die Kältemaschine und den Rückkühler abgegeben oder
- über den Free-Cooling-Rückkühler vorgekühlt und dann über die Kältemaschine und den Rückkühler abgegeben

Im Free-Cooling-Betrieb kann die Kältemaschine unterstützend wirken (bivalent-paralleler Betrieb).

In der Regel für Anlagen mit Kälteverbraucher geeignet, die mit folgender Kältekreis-Vorlauftemperatur arbeiten:

- bei Trockenrückkühlung grösser 18 °C
- bei benetzten Rückkühlern grösser 14 °C

Vorteil

- effizienteste Variante (mit Variante 3)

Nachteile

- aufwendigere Einbindung
- für den Frostschutz Wasser-Glykol als Kälteträger einsetzen oder einen Rückkühler für das Free-Cooling nutzen, der sich selber entleert.

Systeme mit Direktkondensation (Bild 8.22 und Bild 8.23) haben, verglichen mit den Wärmeträgersystemen (Bild 8.20 und Bild 8.21) nur sehr geringfügige Vorteile bezüglich Stromeffizienz.

Bild 8.22: 4. Free-Cooling bei Direktkondensation mit einem parallel eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.

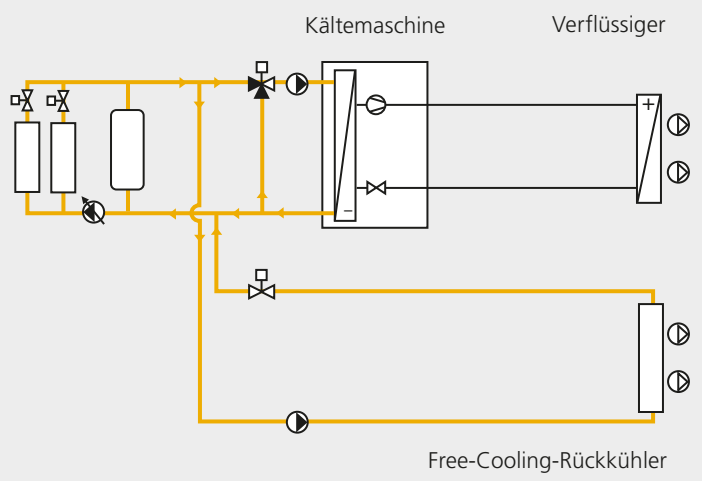
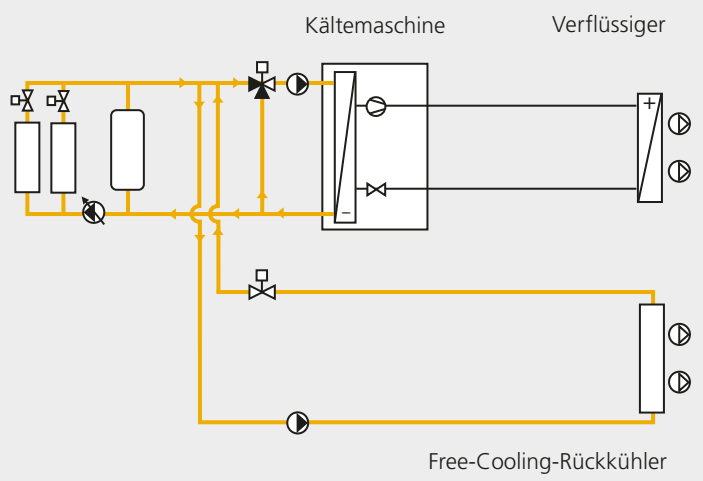


Bild 8.23: 5. Free-Cooling bei Direktkondensation mit einem seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.



8.9 Wärmeabgabe

Nutzung der Wärme
Die anfallende Wärme aus der Kältemaschine kann auf verschiedenen Temperaturniveaus ausgekoppelt werden, d. h. im Enthitzer (Heissgas), im Verflüssiger und im Unterkühler (siehe auch Kapitel 5.6)

Heissgas
Die direkte Nutzung des Heissgases für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung nimmt 10 % bis 20 % der Verflüssigerleistung auf. Der Rest der Wärme wird über den Rückkühler abgeführt.

Heissgas und Kondensationswärme
Die Nutzung des Heissgases erfolgt direkt für die Heizung mit 50 °C. Der Rest der Wärme wird in den Heizungsspeicher mit 40 °C geführt. Von diesem wird die Wärme für Heizungszwecke genutzt. Überschüssige Wärme, die nicht in der Heizung genutzt werden kann, wird über den Rückkühler abgeführt.

Ein Nachteil dieser Lösung ist der stark variable Durchfluss im Unterkühler (je nach Ventilstellung).

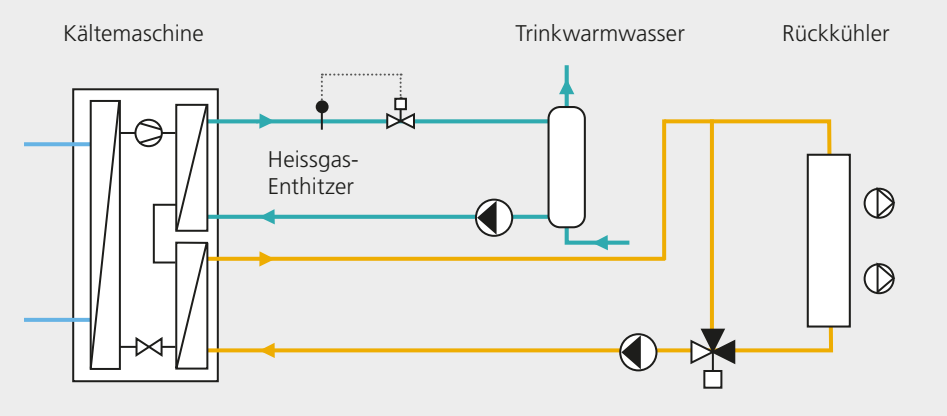


Bild 8.24: Möglichkeit, wie das Heissgas direkt genutzt werden kann.

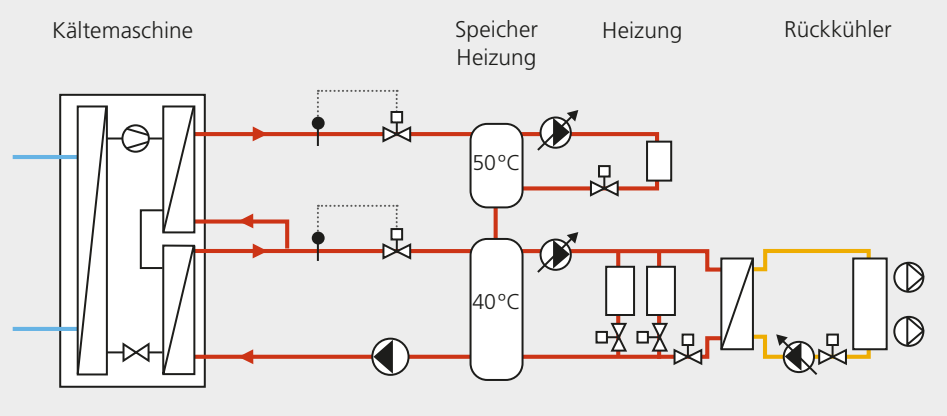


Bild 8.25: Möglichkeit, wie das Heissgas und die Kondensationswärme genutzt werden kann.

Unterkühler
Durch die Unterkühlung wird die Energieeffizienz der Anlage verbessert. Der Unterkühler kann:

- im Verflüssiger integriert oder
- als separater Wärmeübertrager nach dem Verflüssiger

ausgeführt werden. Die beste Wirkung erreicht man, indem ein separater Wärmeübertrager für die Unterkühlung vorgesehen wird. (siehe auch Vertiefung 5 zum Thema Unterkühlung im Anhang 11.8 auf Seite 203)
Wenn die Verflüssiger-Wärme mit einer volumenstromvariablen Pumpe abgeführt wird, erreicht man die beste Effizienz (ökologisch und ökonomisch). Dabei müssen alle minimalen und maximalen Temperaturen im Verflüssiger-Kreislauf sichergestellt und eingehalten werden.
Die elektrische Pumpenleistung sollte nicht mehr als 0,4 % der abgeführten thermischen Leistung betragen. Das gilt auch für den Teillastbereich. Dieses Verhältnis kann nur gewährleistet werden, wenn das Pumpen-Fördervolumen sich proportional zur thermischen Leistung verhält.
Die Sicherstellung der Austrittstemperatur kann durch die Volumenstromanpassung (Pumpe respektive Beimisch-Ventil) erfolgen. Der variable Volumenstrom stellt somit Temperatur und Effizienz sicher.
Die Einhaltung der Temperaturen bei der hydraulischen Einbindung erfolgt am häufigsten mit einem Dreiwegventil (Beimisch-Schaltung) als Eintritts- respektive Austrittstemperatur-Regulierung. Die Eintrittstemperatur-Regulierung ist für einen kritischen Anfahrbetrieb oder stark schwankende Rücklauftemperaturen erforderlich. Eine Beimisch-Schaltung kann auch mit variablen Volumenströmen gefahren werden. Alle Schaltungen sind immer mit dem Kältemaschinenlieferanten schriftlich zu vereinbaren.

8.10 Kälte-Wärme-Nutzung als Gesamtsystem

Wie die verschiedenen Komponenten und Schaltungen miteinander zu einer Gesamtanlage zusammengeführt werden, illustriert das (vereinfachte) Schema (Bild 8.27). Das Beispiel beschreibt ein System, wie es eher bei grösseren Anlagen (ab 100 kW Kälte- und Wärmenutzung) anzutreffen ist. Für kleinere Anlagen (z. B. Anlage ohne Erdsondenfeld) entfallen die entsprechenden Elemente und Leitungen.
Das Schema mit weiteren Erläuterungen zu den verschiedenen Betriebszuständen befindet sich auch im Anhang 11.6.

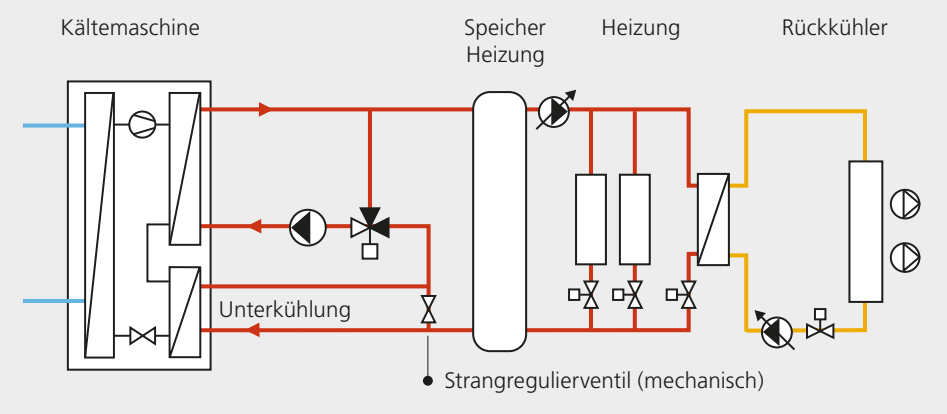


Bild 8.26: Möglichkeit, wie mit einer Unterkühlung die Energieeffizienz zusätzlich verbessert werden kann.

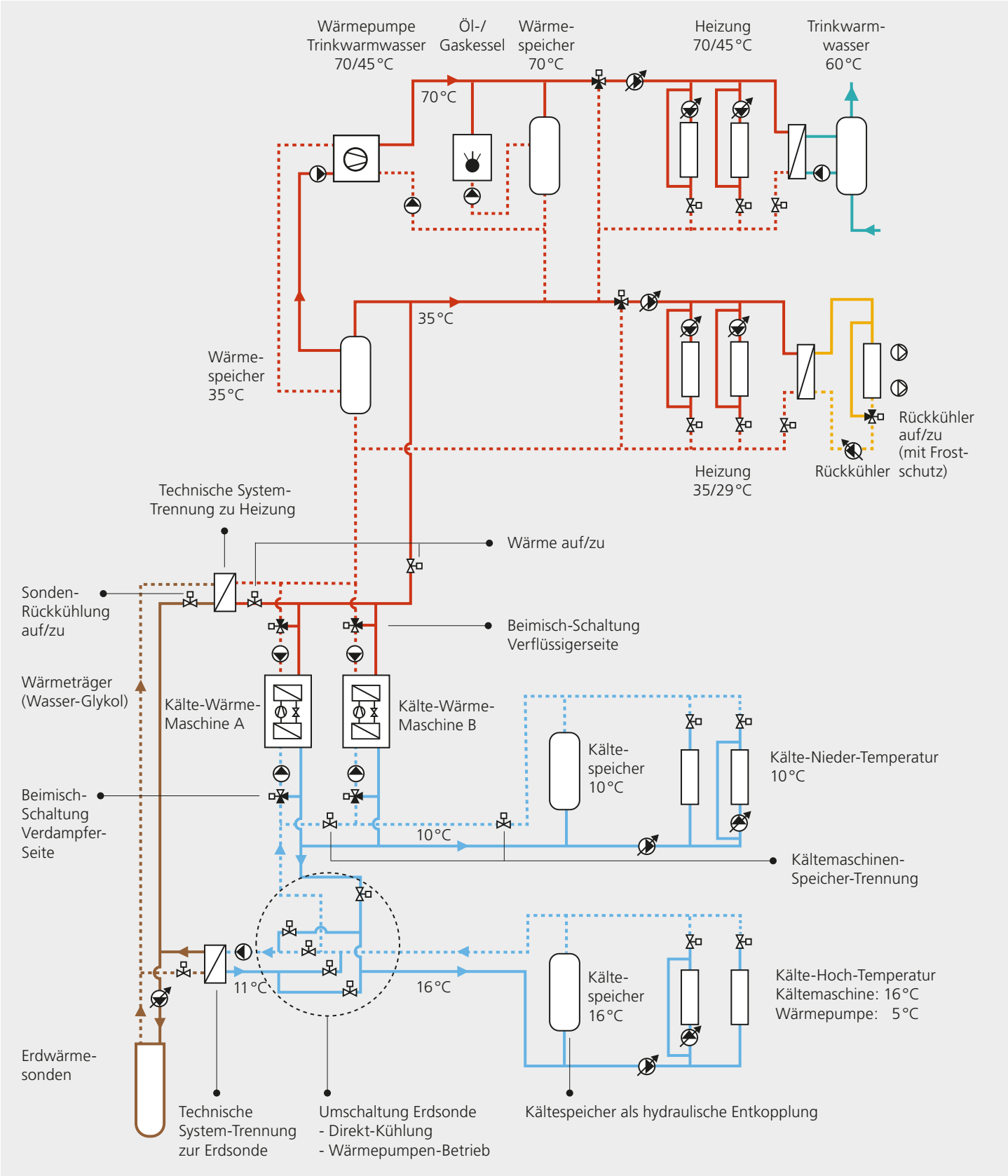


Bild 8.27: Beispiel einer Klimakälteanlage mit zwei Kältenetzen, Wärmenutzung und mit Erdwärmesonden.

8.11 Verteilsystem

Rohrleitungen
Für die Beförderung von Wasser beziehungsweise eines Wasser-Glykol-Gemischs werden in der Klimakälte Leitungen aus Stahl oder Kunststoff verwendet. Die Temperaturen des Wärmeträgers respektive des Kälteträgers bewegen sich im Bereich zwischen 0 °C und 80 °C.
Der Nenndruck ist derjenige Druck, für den die Rohrleitungen, Armaturen, Flansche und Formstücke ausgelegt sind. In der Klima-Kältetechnik werden normalerweise die Nenndrücke PN6, PN10 oder PN16 angewendet.
Die Wasserbehandlung sowohl für geschlossene, als auch für offene Kreisläufe ist der SWKI-Richtlinie «Wasserbeschaffenheit für Heizungs-, Dampf-, Kälte- und Klimaanlagen» (BT102-01) zu entnehmen.

Edelstahlrohre
Grundsätzlich wird empfohlen, Kälteleitungen in Edelstahlrohren (Chrom-Nickel-Stahl CNS) auszuführen. Bis zu einem Durchmesser von ca. 100 mm werden von Vorteil Edelstahlleitungen unter Anwendung von Pressfittings verwendet.

Vorteile Edelstahlrohre
- Nicht rostend
- Glatte Oberflächen
- Selbsttragend
- Nicht brennbar
- Schnelle Montage, Ausführung durch HLK-Personal

Nachteile Edelstahlrohre
- Material teurer gegenüber normalen Stahlrohren (ST-33, ST-42)
- Begrenzte Auswahl an Formstücken
- Benötigen mehr Platz für die Formstücke (bei engen Platzverhältnissen zu beachten)
- Grössere Ausdehnung

Innenkorrosion
Bei offenen Kreisläufen (z. B. bei offenem Verdunstungsrückkühler) ist die Anwendung von normalen Stahlrohren (St 33, St 42) wegen der Korrosion problematisch. Mit Korrosionsschutz-Inhibitoren kann dieses Risiko etwas reduziert werden.
Die Korrosionsgefahr ist besonders bei Rückkühlanlagen mit offenen Verdunstungsrückkühlern hoch, weil das Wasser mit Sauerstoff gesättigt ist und daher die Korrosion stark fördert. Aus diesem Grund ist für solche Anwendungen der Einsatz von CNS empfehlenswert, als Variante können auch Kunststoffrohre eingesetzt werden.

Aussenkorrosion
Die Korrosionsschutzarbeiten sollten durch eine spezialisierte Firma ausgeführt werden. Es muss unbedingt verhindert werden, dass infolge einer mangelhaft ausgeführten Dampfbremse die Leitungen unter der Isolation unbemerkt korrodieren.
Eine Oberflächenbehandlung für den Korrosionsschutz von ST-33-Stahlrohren umfasst:
- Oberfläche reinigen (Sandstrahlen, Schweissnähte mit Stahlbürste beziehungsweise mit Schleifscheibe)
- Grundanstrich
- Deckanstrich

Empfehlung: Minimale Anstrichdicke 140 µm

Kunststoffrohre
Als Werkstoff wird oft Polypropylen verwendet. Die Anwendung von Kunststoffrohren hat die folgenden Vor- und Nachteile:

Vorteile
- Korrosionsbeständig
- Glatte Oberflächen
- Geräusch- und schwingungsdämpfend
- Isolierend

Nachteile
- Geringere Festigkeit
- Grosse Dehnung
- Montage durch Kunststoffrohr-Spezialisten
- Fehlende Form- und Anschlussstücke auf Apparate
- Temperatur- und schlagempfindlich
- Brennbar

Rohrhalterungen
Bei der Rohrhalterung ist darauf zu achten, dass keine Kältebrücken entstehen.

Kältedämmung
Die Kältedämmung vermindert Kälteverluste der Leitungen und Armaturen und erhöht die Energieeffizienz der Anlage.

Tauwasserschutz
Bei Kälteleitungen wird direkt auf der kalten Leitungsoberfläche der Taupunkt unterschritten – es entsteht Kondensat. Damit kein Wasserdampf in die Wärmedämmung und zur Leitungsoberfläche eindringt, muss die Aussenoberfläche der Kältedämmung als Dampfbremse ausgeführt sein. Dies ist insbesondere bei Kälteleitungen aus normalem Stahl besonders wichtig. Hier kann ein mangelhafter Oberflächen-Korrosionsschutz unbemerkt zu Korrosionsschäden führen.
Durch den gezielten Einsatz des richtigen Dämmstoffes (Stichwort: Wärmeleitfähigkeit) und vor allem auch durch eine genügend grosse Dämmdicke kann die Energieeffizienz bei Kühlleitungsverteilsystemen gesteigert werden. Daher sollte die Dämmung nicht nur mit Blick auf Tauwasser- und Feuchteschutz dimensioniert werden. Vielmehr müssen auch die Energieverluste möglichst klein gehalten und ein wirtschaftlicher Betrieb sichergestellt werden.

Feuchteschutz
Unzulässige Feuchtezunahme im Dämmstoff wird durch eine qualitativ angemessene Dampfbremse respektive eine genügend dick bemessene Dämmung vermieden. Je dichter die Dampfbremse und je dicker (voluminöser) die Dämmung, umso geringer ist die volumenbezogene Feuchtezunahme im Dämmstoff.

Wirtschaftlichkeit der Dämmstoffe
Für Kühl-(Kälte)-Leitungen nutzt man hauptsächlich zwei Dämmstoffe: synthetischer Kautschuk sowie Alu-kaschierte PIR-Rohrschalen (Polyisocyanurat). Kautschuk ist flexibel, leicht zu verarbeiten (auch bei Formteilen) und garantiert durch eine hohe Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl eine Verhinderung von Tauwasser. PIR-Dämmstoffe haben eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und sind daher äusserst energieeffizient. Um eine Durchdringung mit Feuchtigkeit zu verhindern, muss beim Dämmstoff PIR zwingend eine Dampfbremse (z. B. Alu-Kaschierung) angebracht werden.

Kautschuk
Für Kautschuk-Dämmungen gibt es spezielle Kälterohrschellen, welche für die Verteilsysteme angewendet werden können. Der Kautschukschlauch kann somit einfach mit der Kälteschelle verklebt werden.

PIR-Alu-System
Die Rohraufhängungen (Formteile) mit PIR-Alu zu dämmen, braucht Sorgfalt und ist zeitintensiv. Die PIR-Schalen und Formteile müssen mit dickflüssigem Bitumen eingestrichen werden, um das System –

Bild 8.28: Gedämmte Rohrhalterung für eine Kälteleitung. Sie vermeidet Kältebrücken und Kondensatbildung.

Bild 8.29: Korrosionsschäden an Kaltwasserleitung (unter der Dämmung).

besonders auch die Wärmedämmungs-Stösse (Verbindungsflächen) – dampfdiffusionsdicht zu verkleben.
Es gibt (noch) keine passende Rohraufhängung. Bei genügender Dämmstärke kann jedoch über die Rohrhalterung gedämmt werden; damit ist die Dampfsperre auch gewährleistet.

Dämmstärken
Ökonomisch und ökologisch ist es sinnvoll, die Kühlleitungen zum einen gegen Tauwasser (d. h. als Feuchteschutz) zu dämmen, was geringe Dämmdicken braucht. Anderseits muss mit «wirtschaftlichen Dämmdicken» auch die Energieeffizienz beachtet werden. Zudem muss man auch den Hybridsystemen Rechnung tragen, die im Winter heizen und im Sommer kühlen. Im Bereich Wärmedämmung sind die Anforderungen der Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich MuKEn massgebend. Analog dazu sollten Empfehlungen bezüglich der Dämmdicken für Kühlleitungen eingehalten werden (Bild 8.30).

Hinweis: Das Merkblatt 5/2021 «Technische Dämmung in der Gebäudetechnik» von suissetec enthält detaillierte Angaben zu den empfohlenen Dämmstärken.

Brandschutz
Bei Klimakälteanlagen muss bezüglich Brandschutz auf die Rohrdurchführungen, Rohrdämmungen in Fluchtwegen, Brandabschnittsdämmungen sowie auf die Kältemaschine (brennbare Kältemittel) geachtet werden. Aufgrund der (lokal) unterschiedlichen Anforderungen an den Brandschutz empfiehlt es sich, dass der verantwortliche Brandschutzplaner mit den Behörden die notwendigen Massnahmen in einer frühen Projektphase festlegt.

Wärme- und Kälteträger
Als Wärme- oder Kälteträger wird sauberes, aufbereitetes (korrosionsinhibiertes) Wasser verwendet. Siehe dazu auch die SWKI-Richtlinie «Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen».
Für Anwendungen, die einen Frostschutz erfordern, kommen Glykol-Wassermischungen mit Korrosionsschutz zum Einsatz.
- Ethylenglykol-basierte Fluide werden eingesetzt, wenn höchste Wärmeübertragungsleistung und Wirtschaftlichkeit essenziell sind.
- Propylenglykol-basierte Fluide werden genutzt, wenn Wärmeträgerflüssigkeiten mit geringer Toxizität benötigt werden.

Glykol-Wasser-Gemische ohne Zusatz von Korrosionsschutz-Additiven sind deutlich korrosiver als reines Wasser.
Die glykolhaltigen Wärmeträger unterscheiden sich in der Qualität des Korrosionsschutzes. Bei der Auswahl des passenden Wärmeträgers kann der Korrosionsprüfungsstandard ASTM D 1384 als Orientierung dienen.
Unterschiedliche Wärmeträgerflüssigkeiten, insbesondere verschiedener Hersteller, dürfen nicht miteinander vermischt werden, da es zu Unverträglichkeiten und infolgedessen zu Korrosionsschäden kommen kann.

Bild 8.30: Empfohlene minimale Dämmstärken für Kaltwasserleitungen die in einer Umgebungstemperatur von + 25 °C verlegt werden.

Dämmung mit	**PIR-Hartschalen**		**Kautschuk**	
	$\lambda \leq 0{,}028$		$\lambda = 0{,}033$	
Kaltwassertemperatur	bis DN 65	DN 80 bis DN 200	bis DN 65	DN 80 bis DN 200
6 °C bis 14 °C	30 mm	40 mm	19 mm	45 mm
ab 14 °C bis 19 °C	30 mm	30 mm	13 mm	19 mm

Die Frostsicherheit ist abhängig von der verwendeten Glykol-Art und dem Mischungsverhältnis mit Wasser und richtet sich nach der tiefsten Auslegungstemperatur am Aufstellungsort (vgl. Bild 8.31).
Es ist zu beachten, dass die minimale Konzentration des Gemisches bei rund 20 % liegt (diese ist produkt- und materialabhängig). Eine tiefere Konzentration kann den Wärmeträger chemisch aggressiv machen.
Glykol ist als Konzentrat oder als fertig einsetzbare Mischung mit Wasser erhältlich. Für Anlagen mit weitläufigem Rohrleitungssystem und geringer Umwälzung empfiehlt es sich, das Konzentrat ausserhalb der Anlage mit Wasser auf die gewünschte Konzentration zu verdünnen.
Sind Glykol und Wasser einmal homogen vermischt, entmischen sie sich nicht mehr.

Wichtig: Wird reines Glykol in ein bereits mit Wasser gefülltes System beigegeben, vermischt sich das Glykol nicht automatisch mit dem Wasser. Somit ist der Frostschutz nicht garantiert und die Anlage kann Schaden nehmen.

Bei neuen Füllungen müssen die Konzentration, der pH-Wert und die Inhibitor-Konzentration erstmals nach 3 Monaten kontrolliert werden. Diese erste Kontrolle ist Bestandteil des Werkvertrages.
Danach braucht es jedes Jahr eine Überprüfung der Frostsicherheit, was z. B. mittels Refraktometer möglich ist. Einige Hersteller bieten ihren Kunden auch einen Analyseservice an, mit dem der aktuelle Zustand des Fluids im System bestimmt werden kann.
Aus Umweltschutzgründen soll möglichst wenig Glykol beigemischt werden. Die Entsorgung des Glykols muss mit der örtlichen Umweltschutzbehörde abgeklärt werden. Das Ableiten in die Kanalisation ist ohne vorherige schriftliche Bewilligung nicht erlaubt.

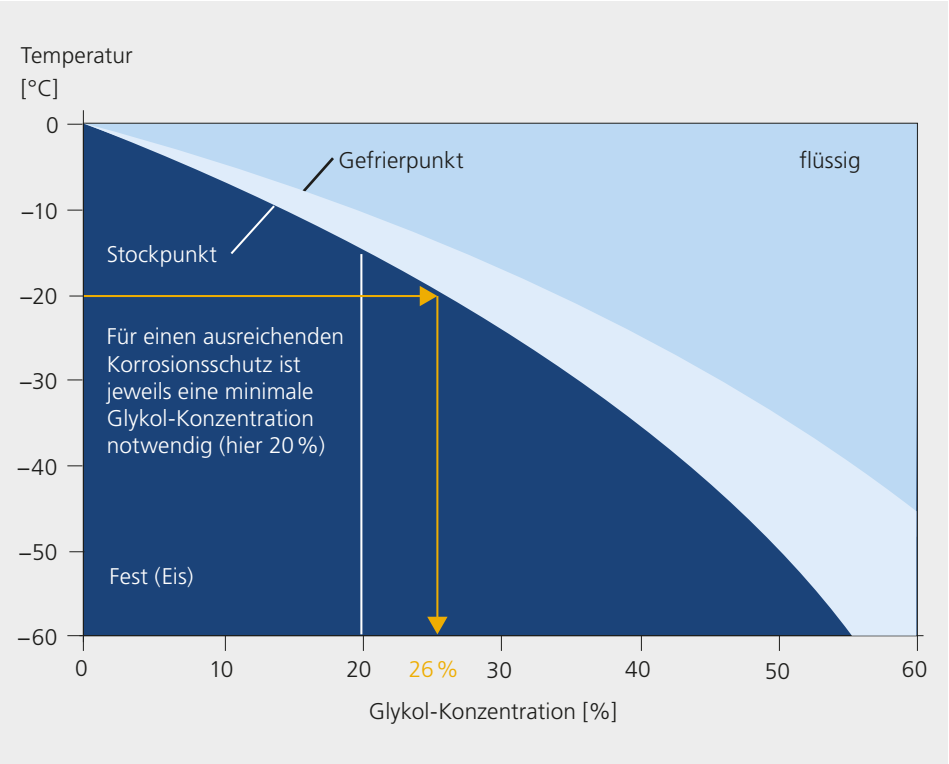


Bild 8.31: Frostsicherheit von Glykol-Wasser-Mischung. Lesebeispiel: Wird eine Frostsicherheit gemäss Auslegung bis –20 °C gefordert, gibt dies gemäss der Grafik einen Glykol-Anteil im Wasser von 26 %.

Exkurs

Eisspeicher

Bei einem Eisspeicher wird Wasser in Eis umgewandelt. Dabei wird auch latente Wärme – und somit auch Energie – gespeichert. Diese Energie wird zu gewünschter Zeit zu fast 100 % an den Kälteträger abgegeben.

Der Eisspeicher wird eingesetzt:
- um teure Leistungsspitzen zu brechen
- damit bei Tag-Nacht-Tarifen der günstigere Preis für Elektrizität in der Nacht genutzt werden kann
- damit eine Kälteenergiereserve die Versorgungssicherheit erhöht – zum Beispiel bei Prozessanlagen oder Rechenzentren zur Überbrückung eines Strom- oder Kältemaschinenausfalls

Die Eisspeicher werden entweder in Serie oder parallel zum Verdampfer der Kältemaschine geschaltet. Die Wahl der Schaltung hängt vom Anlagenkonzept und von der Betriebsart ab. Bei mehreren Kältemaschinen wird die Parallelschaltung angewendet.

Ein Eisspeicher hat aber auch Nachteile:
- Hohe Kosten
- Grosser Platzbedarf
- Relativ schlechte Energieeffizienz der Anlage infolge der tiefen Verdampfungstemperatur im Ladebetrieb – besonders wenn die Verbraucher-Kaltwassertemperaturen höher liegen

Da für die Elektrizität heute oft ein Einheitstarif gilt und der Leistungspreis nicht verrechnet wird, ist der Einbau eines Eisspeichers oft nicht wirtschaftlich.
Anstelle von Wasser respektive Eis als Speichermedium können Latentwärmespeicher mit Phasenwechselmaterialien mit unterschiedlichen Erstarrungstemperaturen angewendet werden. Diese nutzen für die Speicherung der Kälteenergie den Phasenwechsel des Mediums bei Kälteträger-Mediumtemperatur.

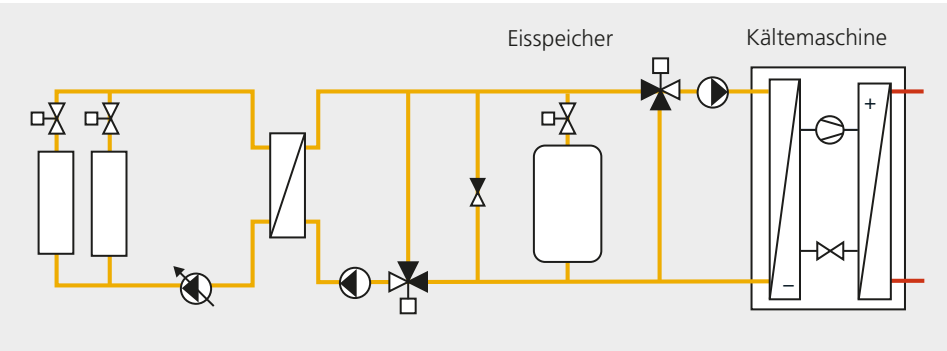


Bild 8.32: Eispeicheranlage mit 3 Betriebsarten:
1. Speicher laden
2. Speicher entladen
3. Kältemaschinen-Betrieb

10 Merkpunkte zur Hydraulik von Kälteanlagen

1. Fehler der Hydraulik führen meist zu grösseren Betriebsproblemen und können später nur mit grossem Aufwand behoben werden.
2. Die verschiedenen Kreisläufe werden hydraulisch oder mechanisch (Entkopplung, Systemtrennung) voneinander getrennt, so dass sich die verschiedenen Pumpen nicht aktiv beeinflussen können.
3. Der Antrieb des Beimisch-Ventils im Verflüssiger-Kreislauf sollte nicht mehr als 30 Sekunden Laufzeit haben.
4. Damit die Kältemaschine anlaufen kann, müssen am Verflüssiger und Verdampfer gewisse Temperaturen herrschen und sie müssen mit dem Kälte- oder Wärmeträger durchströmt werden.
5. Volumenströme über den Verdampfer und Verflüssiger können auch mit einem variablen Pumpen-Volumenstrom sichergestellt werden.
6. Speicher machen das hydraulische System gutmütig. Bei der Einbindung ist der Temperaturschichtung ein spezielles Augenmerk zu schenken.
7. Für den Unterhalt der Kältemaschine und des Kälte- und Wärmeträgesystems sind unter anderem Entleerungshahnen, Entlüftungshahnen, Twinlocks für mobile Temperaturmessungen und Strömungswächter vorzusehen. Zudem ermöglicht ein Bajonett-Anschluss eine einfachere Reinigung des Verflüssigers.
8. Leitungssysteme, die ins Freie geführt werden (z. B. zum Rückkühler), müssen gegen Einfrieren geschützt werden (Wasser-Glykol, Heizband, automatische Entleerung).
9. Kälteleitungen müssen gegen Kondenswasserbildung und Energieverluste gedämmt werden. Die Dämmung muss vollständig diffusionsdicht verlegt werden.
10. Vor der Übergabe an den Betreiber müssen zwingend die Durchflussmengen im Wärme- und Kälteverbraucher-Kreis korrekt eingestellt werden (hydraulischer Abgleich).

Kapitel 9

Steuerung und Regulierung

Bei Kälteanlagen sind Funktionalität und Hydraulik komplexer als bei Heizungsanlagen. Verdampfer- und Verflüssigerseite hängen stark zusammen und beeinflussen sich gegenseitig. Zudem gibt es nur wenig Spielraum bei Druck und Temperatur: Auch kurzes Überschwingen des Drucks auf der Verflüssigerseite kann zur Sicherheitsabschaltung der Anlage über den Hochdruck führen. Dies stellt hohe Anforderungen an Steuerung und Regulierung.

9.1 Allgemeines

Die Art der Steuerung und Regulierung hängt wesentlich von der Art der Kälteerzeugung ab. Kälteanlagen mit einer Direktverdampfung respektive einer Direktverflüssigung werden anders geregelt beziehungsweise gesteuert als Anlagen mit einem Zwischenkreislauf mit Kälte- und Wärmeträger.

Anlage mit Direktverdampfung und Direktverflüssigung

Bei einer Anlage mit Direktverdampfung und Direktverflüssigung übernimmt die in der Kältemaschine integrierte Steuer- und Regeleinheit die entsprechenden Funktionen. Die Verantwortung für die ganze Anlage, inklusive Regulierung, liegt in diesem Fall beim Lieferanten der Kältemaschine. Bei Bedarf wird die Kommunikation zwischen der Kälteanlage und der Gebäudeautomation (GA) über entsprechende Schnittstellen sichergestellt. Bei diesen Systemen kann die Kälteenergie nicht gespeichert werden. Deshalb sollten solche Anlagen über einen grossen Regelbereich (20 % – 100 % der Leistung) verfügen.

Anlagen mit Zwischenkreisläufen

Anlagen mit Zwischenkreisläufen (Verdampfer- oder Verflüssiger-Kreislauf) werden aus diversen Komponenten zusammengebaut. Damit die Anlage als Ganzes richtig funktioniert, ist eine genaue Koordination zwischen den beteiligten Fachbereichen und Personen zwingend notwendig: HLK, MSR, Elektroplanung und Kältemaschinenhersteller.

Ein zentraler Aspekt ist dabei die Definition der Schnittstellen zwischen den einzelnen Gewerken. Für diese Aufgabe, deren Lösung am Anfang des Projektes stattfinden muss, gibt es unterschiedliche Vorgehensansätze (siehe Kapitel 9.2).

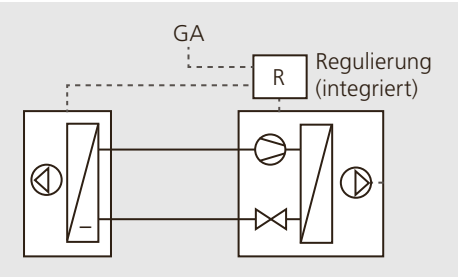


Bild 9.1: Kältemaschine mit Direktverdampfung und Direktverflüssigung mit integrierter Regulierung.

Die Stabilität der Regulierung wird stark durch die Hydraulik beeinflusst. Fehler bei der hydraulischen Einbindung einer Kälteanlage lassen sich durch die Regulierung nicht beheben.

9.2 Ansätze der Schnittstellendefinition

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten der Kälteanlage (Kälteerzeugung, Verbraucher-Gruppen, Rückkühler etc.) erfolgt heute mehrheitlich über mehrere Regulierungen, die von unterschiedlichen Lieferanten stammen.
Wie die Schnittstellen gelöst werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Aufbau der Anlage, Betriebsphilosophie, Bedienungskomfort, Alarmierungskonzept
- Anforderungen an die Fernüberwachung
- Wartungskonzept
- Hard- und Software

Dabei kann die Kälte-Wärme-Maschine (KWM) unterschiedlich in das Gesamtsystem eingebunden werden. Nachfolgend drei Beispiele der Schnittstellendefinition (Bild 9.2).

Schnittstellen-Lösung A: Kälte-Wärme-Maschine für sich alleine

Die Kältemaschine wird autonom durch die eigene SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuert und reguliert. Sie übernimmt die Leistungsregulieung der Maschine inklusive der Sicherheitsfunktionen wie Rückmeldungen über den Betrieb der Pumpen, Strömungsüberwachung usw. Bei der Leistungsregulierung besteht oft die Möglichkeit der Leistungsbegrenzung über ein externes Signal. Die Zu- und Abschaltung der Kältemaschine erfolgt durch die Gebäudeautomation, in die auch die Pumpen, die Regelventile und andere Anlagenteile eingebunden sind.
Diese Lösung wird oft bei «Standard»-Kältesätzen mit begrenzter Funktionalität der eingebauten Steuereinheit gewählt.
Ein Nachteil dieser Lösung sind die unterschiedlichen Verantwortlichkeiten für die Steuerung der Kältemaschine und für die übergeordnete Steuerung. Da die Steuerungen von verschiedenen Lieferanten stammen, fehlt ein Verantwortlicher für

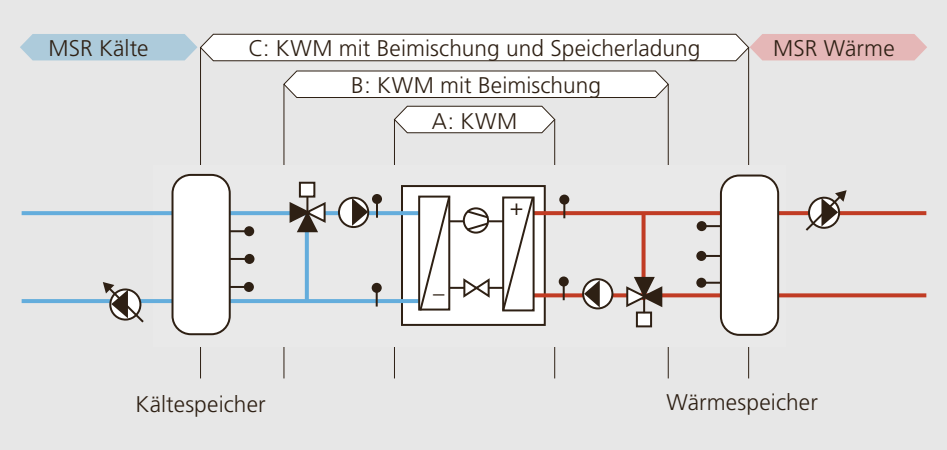


Bild 9.2: Schnittstellenbetrachtung einer Kälteanlage aus regeltechnischer Sicht. Es gibt drei mögliche Lösungen (A, B und C), wie die Schnittstellen sinnvoll gelegt werden können (MSR: Messen, Steuern, Regeln).

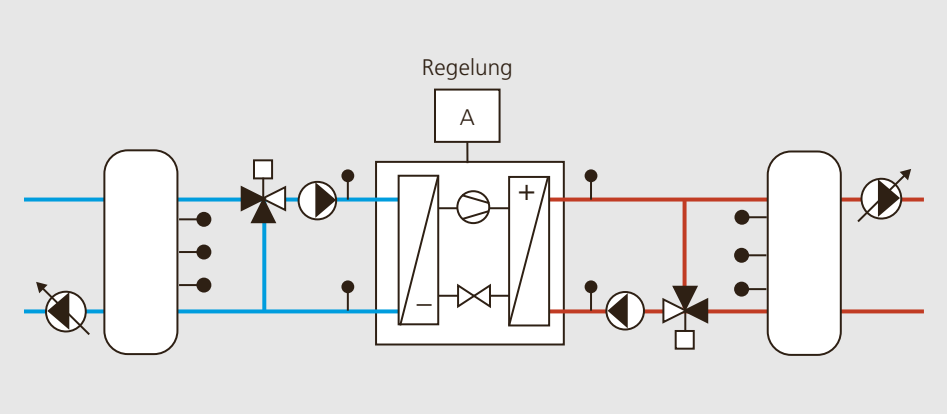


Bild 9.3: Schnittstellen Lösung A: Kälte-Wärme-Maschine (KWM).

die optimale Funktionalität des Gesamtsystems.
Bei der Behebung von Störungen und bei Wartungsarbeiten an der Kältemaschine muss in der Regel auch der Spezialist, der für das übergeordnete System verantwortlich ist, dabei sein.

Schnittstellen-Lösung B: Kälte-Wärme-Maschine mit Beimischung
Die Steuerung der Kältemaschine übernimmt auch die Ansteuerung der Pumpen und der 3-Weg-Ventile für die Beimisch-Schaltung:

- Freigabe beziehungsweise Zu- und Abschaltung der Pumpen
- Signale für die Ansteuerung der Regelventile

Damit sind bei der Planung, Inbetriebsetzung, Störungsbehebung und Wartung die Verantwortlichkeiten klar geregelt. Der Servicefachmann der Kältefirma kann zudem die Pumpen und die Regelventile bedienen und ist nicht auf die Unterstützung des Lieferanten der übergeordneten Steuerung angewiesen. Diese Variante hat sich in der Praxis bewährt.

Schnittstellen-Lösung C: Kälte-Wärme-Maschine bis und mit Speicherladung
Bei dieser Variante ist der Lieferant der Kältemaschine für die Steuerung und Regulierung der gesamten Kälte- und Wärmeerzeugung zuständig. Dazu gehört auch das Speichermanagement und eventuell sogar die Rückkühlung. Die Regulierung des Herstellers kann somit auch die Bewirtschaftung des Speichers und der Gesamtanlage übernehmen. Insofern wäre dies die ideale Schnittstellenlösung.
Voraussetzung dafür ist, dass der Maschinenlieferant über das entsprechende Knowhow in der Steuer- und Regeltechnik verfügt. Nur wenige Hersteller sind heute in der Lage, diese Leistung anbieten zu können.

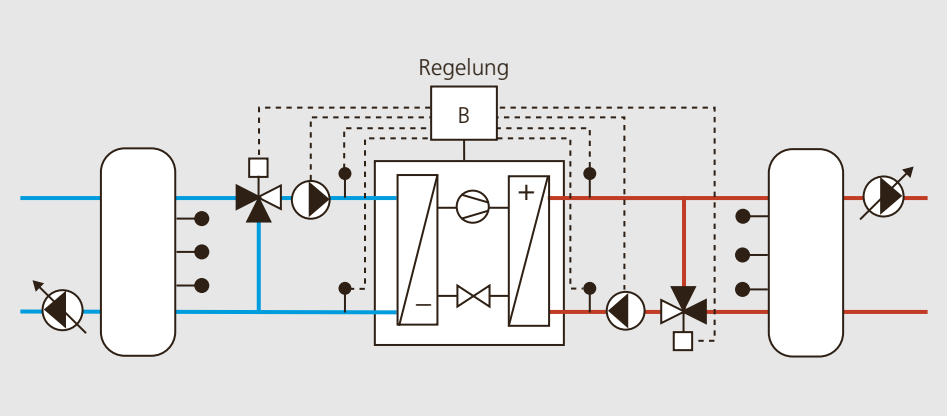


Bild 9.4: Schnittstellen Lösung B: Kälte-Wärme-Maschine (KWM) mit Beimischung.

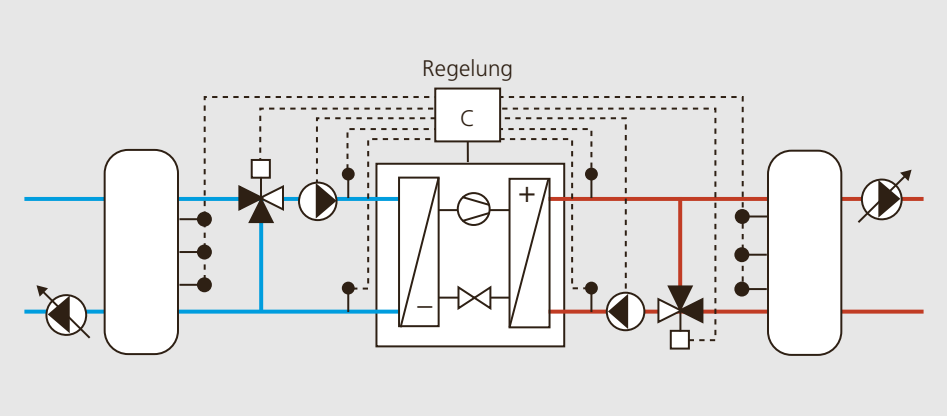


Bild 9.5: Schnittstellen Lösung C: Kälte-Wärme-Maschine (KWM) bis und mit Speicherladung.

9.3 Regulierung der Kältemaschinenleistung

Die Leistung einer Kältemaschine kann an vier Stellen reguliert werden:

1. Eingriff in den Verdichter
Mit einer Ventilanhebung bei Kolbenverdichtern oder mit dem Schieber bei Schrauben-Verdichtern kann die Leistung des Verdichters ohne Drehzahländerung angepasst werden (siehe Kapitel 5).

2. Eingriff in den Motor
Der Motor kann mit einer Drehzahlregulierung ausgerüstet werden. Zudem besteht die Möglichkeit, einen polumschaltbaren Motor einzusetzen (spezielle Motorenbauart, mit der verschiedene, fixe Drehzahlen einstellbar sind).

3. Eingriff in den Kältemittelkreislauf
Der Hersteller der Kältemaschine kann den Kältemittelkreislauf unterschiedlich aufbauen. Vor allem bei kleineren Anlagen mit einer Kühlstelle wurde in der Vergangenheit oft die kostengünstige Lösung mit Saugdrossel und Heissgasbypass realisiert. Kältemaschinen mit Heissgasbypass-Regulierung führen jedoch zur markanten Verschlechterung der Energieeffizienz der Anlage. Darum wird empfohlen, keine Kältemaschinen mit einer Heissgasbypass-Regulierung einzusetzen.

Hinweis: Die Regulierung der Sauggasüberhitzung hat keinen Einfluss auf die Leistung. Sie stellt vielmehr sicher, dass kein flüssiges Kältemittel zum Verdichter gelangt (siehe Vertiefung Seite 164).

4. Energiespeicher
Mit Energiespeicher können Leistungsspitzen der Kälteanlage gebrochen werden. Dadurch können die Kältemaschine eventuell kleiner dimensioniert, die Schalthäufigkeit reduziert und der Betrieb der Anlage stabiler gestaltet werden (siehe Kapitel 6).
Die Planerin und der Planer können nur die Dimensionierung des Energiespeichers beeinflussen. Die Art und Weise der Regulierung der Kälteerzeugung ist Sache des Kältemaschinenherstellers. Der Planer aber muss bei der Bestellung und der Auswahl der Maschinen entsprechende Vorgaben machen.

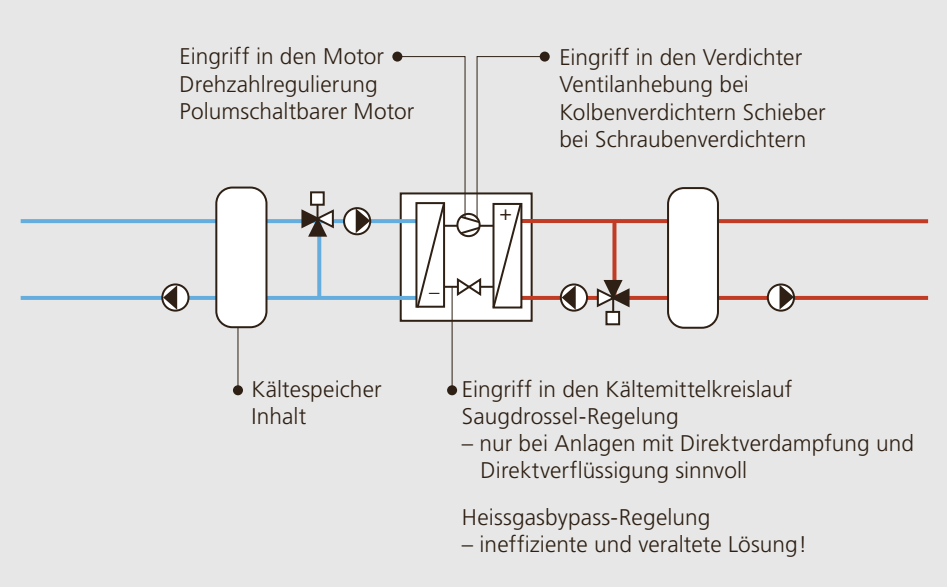


Bild 9.6: Die vier Möglichkeiten, mit denen die Leistung der Kältemaschine reguliert werden kann.

9.4 Regulierung der Verdampferseite

Die Verdichterleistung wird in Abhängigkeit der Verdampfer-Austrittstemperatur (T_{AK}) geregelt. Liegt der Ist-Wert von T_{AK} höher als der Soll-Wert, wird die Verdichter-Leistung erhöht und umgekehrt. Damit die Leistungsregulierung des Verdichters schneller auf Veränderungen reagieren kann, wird oft auch die Verdampfer-Eintrittstemperatur (T_{EK}) als Hilfsgrösse herangezogen.
Die Wahl der Reglierungsart ist abhängig von der zulässigen Abweichung. Die Temperaturnachführung erfolgt, indem die Verdichterleistung stetig (mit FU) oder in Stufen angepasst wird. (z. B. 4-stufige Regelung bei Kaltwasser 14 °C/8 °C, entsprechend 1,5 K Differenz je Stufe)

Austrittstemperaturregulierung (Verdampferseite)

Die Temperaturregulierung am Verdampfer-Austritt wird vor allem bei Anlagen mit einer stufenlosen Leistungsregulierung angewendet. Denn regeltechnisch liegt eine Rückkoppelung vor: Nach der Veränderung der Leistungsvorgabe für den Verdichter ändert die Kaltwasser-Austrittstemperatur (T_{AK}).

Spezifische Merkmale

- Kleine Regelabweichung vom Sollwert[1]
- Reagiert empfindlich auf Temperaturschwankungen am Verdampfer-Austritt. Insbesondere bei Anlagen mit kleiner «Verdampfer-(Kälte-)Speicherkapazität»

Leistungsteuerung

Bei Anlagen mit Ein-/Aus-Schaltung der einzelnen Verdichter wird die Kälteanlage von Vorteil in Abhängigkeit der Verdampfer-Eintrittstemperatur gesteuert. In diesem Fall wirkt das hydraulische Kaltwassernetz – dank seines Wasserinhaltes – dämpfend. Dadurch schaltet der Verdichter weniger oft ein und aus – respektive hat längere Lauf- und Standzeiten.
Bei einer Lösung mit Temperaturmessung am Verdampfer-Austritt hingegen sinkt nach Zuschaltung einer Stufe des Verdichters die Temperatur unmittelbar ab – dies kann wieder zur Zurückschaltung der Stufe führen, die Schalthäufigkeit wird dadurch höher.
Optional kann eine Begrenzung der Austrittstemperatur vorgesehen werden. Spezifische Merkmale:

- Das Kältenetz hat eine dämpfende Wirkung
- Weist eine grössere Regelabweichung auf, vor allem wenn die Differenz zwischen der Verflüssigungs- und der Verdampfungstemperatur klein ist. In diesem Fall steigt die Verdichterleistung, was zu einer grösseren Temperaturdifferenz je Leistungsstufe führt.

1 Dazu wird ein PI-Regler (Proportional-Integral-Regler) eingesetzt. Dieser regelt genau auf den Sollwert ohne Regelabweichung.

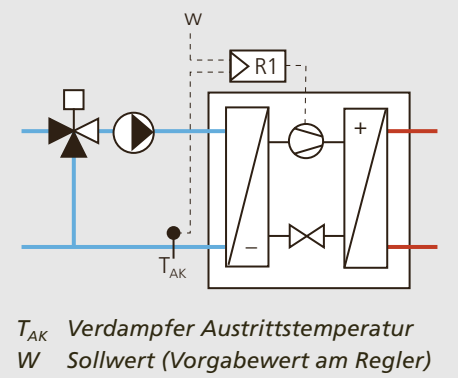


Bild 9.7: Verdampfer-Austrittstemperatur-Regulierung, Verdichter mit stufenloser Leistungsregulierung (20 % bis 100 %).

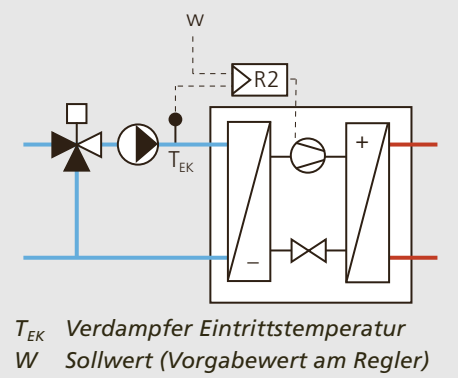
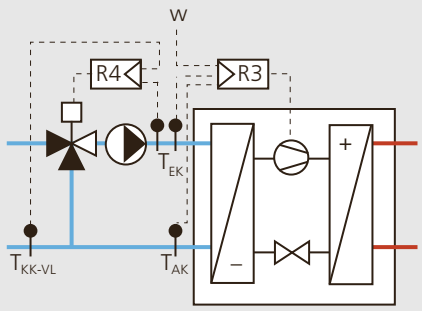


Bild 9.8: Verdampfer-Eintrittstemperatur-Steuerung.

Kombination von Ein- und Austrittstemperatur-Regulierung

Wird bei Anlagen mit höheren Ansprüchen eine genauere Kaltwassertemperatur-Regulierung verlangt, kann die Leistungsregulierung noch mit einer Regulierung zur Sollwert-Einhaltung ergänzt werden.

Die Leistungsregulierung erfolgt hier in Abhängigkeit der Verdampfer-Austritts- und Verdampfer-Eintrittstemperatur. Die Begrenzung der Verdampfer-Eintrittstemperatur stellt sicher, dass diese den Sollwert nicht überschreitet. Bei der Überschwingung des Sollwertes im Netz wird das Mischventil in Sequenz zur Eintrittstemperatur-Begrenzung in der Umlenkstellung mehr geöffnet. Dadurch sinkt die Kältemaschinen-Austrittstemperatur. Bei Erreichen des Sollwerts wird das Ventil im direkten Weg geöffnet. Diese Option reduziert allfällige Störungen durch die Überschreitung der Soll-Temperatur im Netz. Ergänzt wird diese mit einer Regulierung zur Begrenzung der Verdampfer-Eintrittstemperatur.



R3 *Regelt Leistung aufgrund der Ein- und Austrittstemperatur am Verdampfer.*
R4 *Regler für die Temperaturbegrenzung*
T_{AK} *Verdampfer-Austrittstemperatur*
T_{EK} *Verdampfer-Eintrittstemperatur*
T_{KK-VL} *Begrenzung Austrittstemperatur ins Kaltwassernetz*
W *Sollwert (Vorgabewert am Regler)*

Bild 9.9: Kombination von Ein- und Austrittstemperatur-Regulierung.

Hinweis zur Verdampferseite

Die Beimisch-Schaltung (3-Wegventil) ist empfehlenswert beim System mit Speicher und bei Anlagen, bei denen die gewünschte Verdampfer-Austrittstemperatur zu jeder Zeit eingehalten werden muss. Dies gilt auch für das Anfahren der Kältemaschine bei hoher Netztemperatur (z. B. nach dem Wochenende). Die Installation der Beimisch-Schaltung verursacht jedoch zusätzliche Kosten.

Als etwas günstigere Alternative besteht die Möglichkeit, bei hoher Verdampfer-Eintrittstemperatur den Volumenstrom mittels einer drehzahlregulierten Pumpe abzusenken, um damit den gleichen Effekt zu erreichen. Diese Variante kann allerdings nur mit dem Einverständnis des Maschinenlieferanten erfolgen. Diese Überlegungen gelten auch für die Verflüssigerseite.

Maximaltemperatur-Begrenzung am Verdampfer-Eintritt (R4)

Die Maximalbegrenzung verhindert zu hohe Austrittstemperaturen am Verdampfer-Austritt sowie allfällige Störungen beim Anfahren der Kältemaschine. Mit dem Kältemaschinenlieferanten muss geklärt werden, wie hoch die maximal zulässige Verdampfer-Wassereintrittstemperatur ist und wie lange diese allenfalls überschritten werden darf. Die Begrenzung ist besonders erforderlich bei:

- Speicherschaltung, damit der Speicher mit einer gleichmässigen Temperatur geladen wird.
- Anlagen mit grossem Kaltwasserinhalt: hier besteht das Problem beim Anfahren der Anlage mit hohen Medium-Temperaturen (20 °C bis 25 °C) nach längerem Stillstand.

Sollwert-Schiebung nach Anheben der Verdampfer-Austrittstemperatur
Wird die Verdampfer-Austrittstemperatur z. B. um 2 K angehoben, müssen gleichzeitig auch die Sollwerte der Verdampfer-Eintrittstemperatur, die Verflüssiger-Eintrittstemperatur sowie diverse andere Sollwerte – wie z. B. die Speichertemperaturen in der übergeordneten Steuerung – um 2 K erhöht werden.
Deshalb ist es sinnvoll, jeweils mit ΔT zum definierten Grundwert zu operieren und alle anderen Sollwerte damit zu verknüpfen. Es verursacht einen minimalen Zusatzaufwand, diese Option in der Planungsphase zu realisieren. Eine nachträgliche Anpassung der Software ist hingegen sehr aufwendig.

Hinweis zur Pumpensteuerung
Die Pumpe und die Temperaturüberwachung des Verdampfers werden so geregelt, dass sie nach Abschalten des Verdichters nachlaufen und die «Restkälte» abführen (gilt besonders für überflutete Verdampfer).

Leistungsregulierung in Kombination mit variablem Volumenstrom
Bei der Anwendung einer drehzahlregulierten Pumpe auf der Verdampferseite sind diverse Kombinationsvarianten möglich. Nachfolgend zwei Beispiele:

Beispiel 1: Sequenz-Regulierung der Kältemaschinenleistung über den Volumenstrom
Bei Systemen mit variablen Volumenströmen über den Verdampfer sind die Vorgaben der Hersteller zu beachten. Die meisten Hersteller erlauben nur eine maximale Reduktion der Wassermenge bis 30 %. Denn mit erheblich reduziertem Volumenstrom ändert sich der Wärmeübergang in den Plattenübertragern. Dabei stellen sich unkontrollierbare Betriebszustände ein.

Beispiel 2: Volumenstrom «Soll»: Vorgabe durch das übergeordnete System
Die übergeordnete Regulierung (z. B. Gebäudeautomation) gibt aufgrund der hydraulischen Verhältnisse und in Abhängigkeit des Leistungsbedarfs den Volumenstrom vor (w_{GA}). Zusätzlich wird bei der Überschreitung der Soll-Austrittstemperatur (T_{AK}) der Volumenstrom reduziert.
In der Praxis zeigt sich, dass die Gebäudeautomation (GA) der Kältemaschine idealerweise nur den Bedarf signalisieren soll. Es soll vermieden werden, dass die GA direkt in die Maschinenregulierung eingreift (z. B. durch eine Vorgabe der benötigten Kälteleistung). Die Maschine soll sich immer selber regulieren.
Das oben beschriebene System – besonders die Vorgabe durch die Gebäudeautomation – muss daher gut überlegt sein, um Probleme beim Betrieb der Anlage zu vermeiden. Diese Lösung stellt sowohl an den Planer als auch an den Installateur höhere Anforderungen.

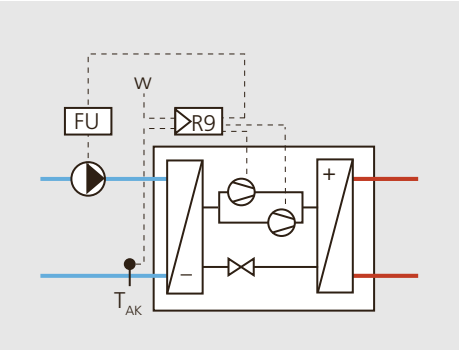


Bild 9.10: Regulierung, die eine konstante Austrittstemperatur (T_{AK}) sicherstellt. Um die Austrittstemperatur konstant zu halten, werden in Sequenz (nacheinander) zuerst die Verdichterleistung und anschliessend der Volumenstrom geregelt, wenn der Lieferant der Kälteerzeugung dies zulässt (R9).

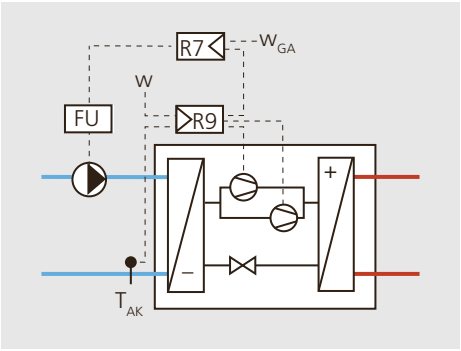


Bild 9.11: Regulierung Austrittstemperatur kombiniert mit Sollvorgabe der Gebäudeautomation (R9).

9.5 Regulierung der Verflüssigerseite

Die Verflüssigungstemperatur wird durch die Rückkühlung beziehungsweise Wärmenutzung bestimmt. Es ist empfehlenswert, die Möglichkeit einer Schiebung der Verflüssigungs-Austrittstemperatur vorzusehen – auch dann, wenn diese in der Planungsphase nicht erforderlich erscheint.
Deshalb ist es sinnvoll, jeweils mit einer Temperaturdifferenz (ΔT) zum bestimmten Grundwert zu arbeiten und alle anderen Sollwerte damit zu verknüpfen. Um diese Option in der Planungsphase zu realisieren, braucht es einen minimalen Zusatzaufwand. Eine nachträgliche Anpassung der Software ist hingegen sehr aufwendig.

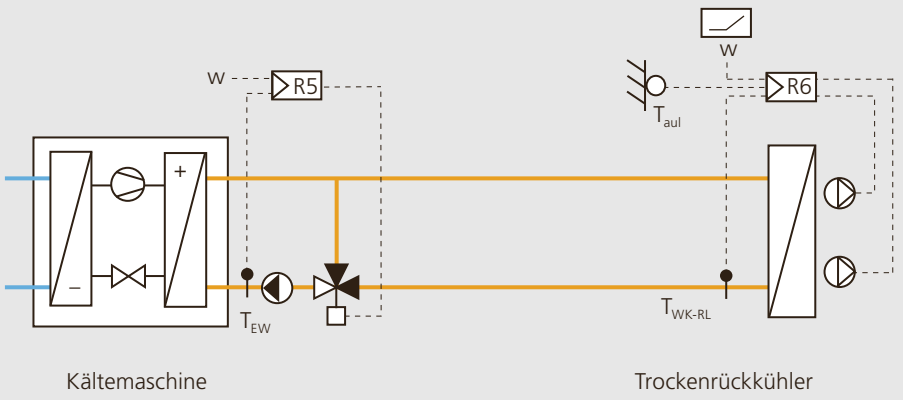
Bemerkung: Anstelle der Temperatur kann auch der Druck als Regelgrösse genutzt werden.

Minimaltemperaturbegrenzung am Verflüssiger-Eintritt (R5)

Die Minimaltemperaturbegrenzung am Verflüssiger-Eintritt verhindert eine zu tiefe Temperatur auf der Eintrittsseite des Verflüssigers. Zwischen der Verflüssigungstemperatur T_c und der Verdampfungstemperatur T_0 muss eine minimale Differenz sichergestellt werden.
Die minimale Temperaturdifferenz ($T_c - T_0$) muss mit dem Maschinenlieferanten geklärt werden. Sie beträgt oft 12 K bis 15 K, in Ausnahmefällen ca. 10 K. Dies bedeutet, dass bei hohen Verdampfer-Austrittstemperaturen die Verflüssiger-Eintrittstemperatur entsprechend angehoben werden muss.

Zusammenspiel von Kältemaschine und Rückkühlung

Die bauliche und funktionelle Trennung von Kältemaschine und Rückkühler bedingt zwei Regelkreise, um die Wärme über den Rückkühler abzuführen (Bild 9.12). Der eine Regelkreis (R5) stellt sicher, dass die Eintrittstemperatur in den Verflüssiger nicht zu tief ist (Minimalbegrenzung Verflüssiger Eintrittstemperatur). Der andere Regelkreis (R6) reguliert die Austrittstemperatur aus dem Rückkühler in Abhängigkeit der Aussentemperatur und stellt so sicher, dass die Wärme effizient abgeführt wird.
Anstelle von Beimisch-Regulierungen kann bei Maschinen, die nur im Sommer laufen



1. Regelkreis: Verflüssiger-Eintrittstemperatur
R5 Eintrittstemperatur-Regler
w Soll-Wert
T_{EW} Verflüssiger-Eintrittstemperatur

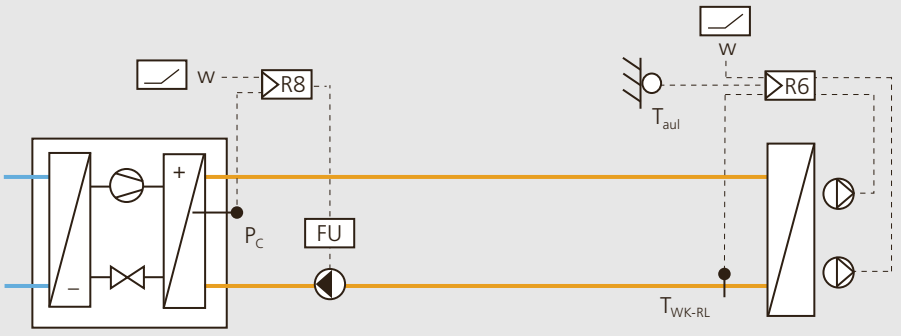
2. Regelkreis: Rückkühler
R6 Regler, der aufgrund der Austrittstemperatur und der Aussentemperatur die Ventilatoren der Rückkühlers ansteuert bzw. reguliert.
w Soll-Wert mit Schiebung nach Aussentemperatur (erhöht die Effizienz)
T_{aul} Aussentemperatur (Basisinfo für Soll-Wertschiebung)
T_{WK-RL} Temperatur des Wärmeträgers am Austritt aus dem Trockenrückkühler

Bild 9.12: Regeltechnische Einbindung eines Trockenrückkühlers. Dabei wird der Verflüssiger der Kältemaschine mit konstantem Volumenstrom durchströmt und die Eintrittstemperatur reguliert.

(kein Winter-Betrieb) auch mit variablen Volumenstrom gearbeitet werden (Option bei der Anwendung von Platten-Wärmeübertragern, Bild 9.13).

Hinweise zur Verflüssigerseite

- Damit eine reine Kälteanlage ohne Wärmerückgewinnung energieeffizient arbeitet, ist die Schiebung des Sollwerts des Verflüssigungsdrucks in Abhängigkeit der Aussentemperatur absolut erforderlich.
- Besonders bei der Wärmenutzung muss die Eintrittstemperatur zum Verflüssiger der Auslegungstemperatur entsprechen (wichtig vor allem bei Speicheranwendung).
- Nachlauf der Verflüssiger-Pumpe ist vorzusehen.
- Bei offenen Rückkühl-Kreisläufen ist es empfehlenswert, die Temperaturdifferenz zwischen der Verflüssigung und dem Verflüssiger-Austritt zu überwachen. Basierend auf der Temperaturdifferenz kann bestimmt werden, ob der Verflüssiger verschmutzt ist.



1. Regelkreis: Verflüssigungsdruck

R8 Verflüssigungsdruck-Regler: Regelt über einen Frequenzumformer den Volumenstrom der Verflüssigerpumpe und so die Verflüssigungstemperatur.
w Soll-Wert
P_c Verflüssigungsdruck

2. Regelkreis: Rückkühler

R6 Regler, der aufgrund der Austrittstemperatur und der Aussentemperatur die Ventilatoren der Rückkühler ansteuert.
w Soll-Wert mit Schiebung nach Aussentemperatur (erhöht die Effizienz)
T_{aul} Aussentemperatur (Basisinfo für Soll-Wertschiebung)
T_{WK-RL} Temperatur des Wärmeträgers am Austritt aus dem Trockenrückkühler

Bild 9.13: Regelschema, bei dem der Verflüssigungsdruck (Verflüssigungstemperatur) mit variablem Volumenstrom reguliert wird. Für Kältemaschinen, die nur im Sommer laufen.

9.6 Zu- und Abschalten der Kältemaschine

Kältemaschinen können nur unter gewissen Temperatur-Bedingungen arbeiten. So darf die Temperatur am Verdampfer einen bestimmten Wert nicht über- oder unterschreiten (z. B. 4 °C bis 20 °C). Gleichzeitig muss am Verflüssiger eine minimale Temperatur herrschen (z. B. mindestens 25 °C). Damit beim Start der Kältemaschine und im Betrieb diese Bedingungen eingehalten werden können, werden die Temperaturen an der Kältemaschine beidseitig mit Beimisch-Schaltungen ein- und sichergestellt (Temperatur-Begrenzungen). Eine Begrenzung kann je nach Temperaturanforderungen eines Prozesses erforderlich werden.

Ein- und Auschschaltschaltvorgang einer Kältemaschine

Die Dauer des Hoch- beziehungsweise Herunterfahrens einer Kältemaschine ist vom Fabrikat abhängig. Beim Hochfahren liegt die Spanne in der Regel zwischen 2 und 20 Minuten. Dieser Aspekt ist für die Regulierung der Anlage wichtig und bei der Dimensionierung des Speichers zu berücksichtigen. Denn bei Anlagen, die eine lange Hochfahrzeit haben, muss der Speicher über genügend Reserve verfügen.
Der Abschaltvorgang verläuft analog, ist jedoch in der Regel viel kürzer. Sowohl bei der Verdampfer- als auch bei der Verflüssigerpumpe wird ein zeitlich begrenzter Nachlauf empfohlen, nachdem die Kältemaschine ausgeschaltet wurde. Die Folgeschaltung von mehreren Kältemaschinen wird im Kapitel «Hydraulische Systeme» beschrieben.
Es ist zu berücksichtigen, dass bei einem reduzierten Kälteleistungsbedarf der Verdichter nicht beliebig oft ein- und ausgeschaltet werden kann. Die sogenannte Wiedereinschaltsperre des Verdichtermotors erlaubt nur eine bestimmte Anzahl von Starts, in der Regel 3 bis 6 in einer Stunde. Je weniger Starts desto besser. Ist die Sperre aktiv, dann liefert die Kältemaschine reduzierte Leistung bei Systemen mit mehreren Verdichtern oder keine Leistung bei Systemen mit nur einem Verdichter. Dies ist bei der Dimensionierung der Speicher zu berücksichtigen.
Jede Zu- und Abschaltung der Kältemaschine ist zudem mit einer Reduktion der Energieeffizienz der Maschine verbunden – zum Anfahren wird mehr Energie benötigt als im laufenden Betrieb. Darum möglichst wenige Ein- und Abschaltungen anstreben.

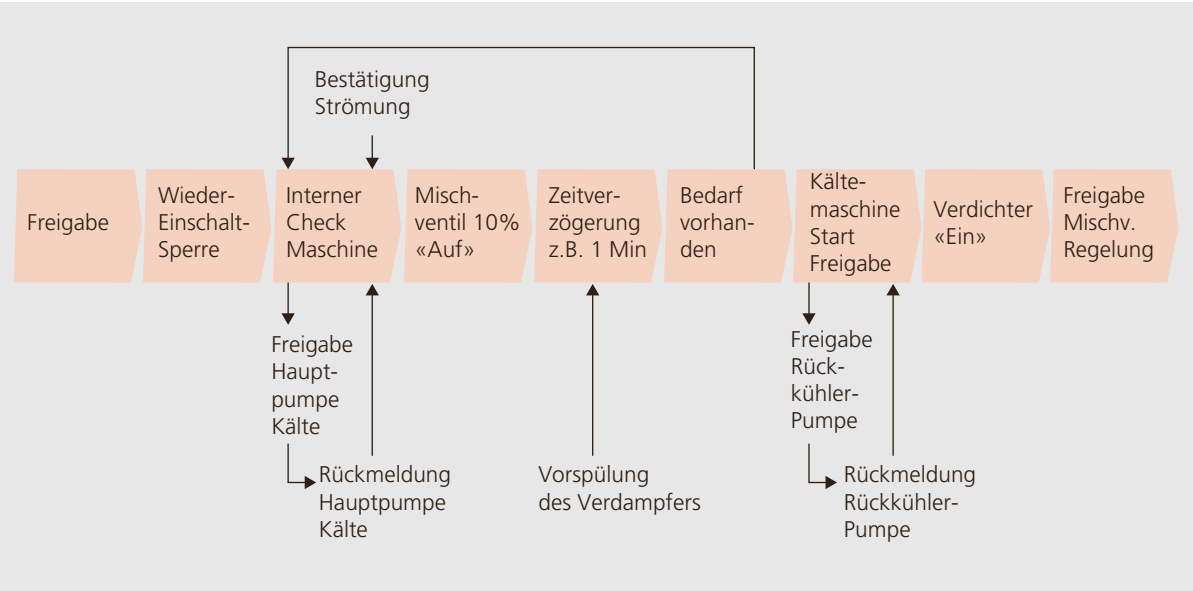


Bild 9.14: Einschaltvorgang einer Kältemaschine.

V2000

9.7 Kältemaschinensicherheit

Eine Kältemaschine wird durch diverse Sicherheitseinrichtungen gegen allfällige Schäden geschützt. Besonders wenn auf der Verflüssigerseite die Wärme nicht mehr abgeführt werden kann oder auf der Verdampfer-Seite die Temperaturen so tief werden, dass der Kälteträger einfriert, müssen Sicherheitseinrichtungen schnell reagieren und die Kältemaschine abschalten oder im Extremfall das Kältemittel abblasen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Bauteile und Leitungen in der Anlage bersten. Die wesentlichen Grössen sind im Bild 9.17 zusammengestellt.

Schutz des Verdampfers vor dem Einfrieren

Für Klimakälteanlagen sind Temperaturen unter 8 °C am Verdampfer-Austritt tief. Wenn bei diesen Temperaturen mit einem Kälteträger ohne Frostschutzmittel gearbeitet wird, erhöht sich die Einfriergefahr. Der Grund liegt darin, dass die Verdampfertemperatur des Kältemittels regeltechnisch auch deutlich unter 0 °C fallen kann. Für den Schutz vor dem Einfrieren werden darum folgende Massnahmen getroffen:

- Die Kältemaschine startet erst nach der Freigabe des Motorschutzes der Verdampferpumpe.
- Strömungsüberwachung: sie erfolgt bei vorliegendem Beispiel über eine Differenzdruck-Überwachung (siehe PIC-Strömungsüberwacher[2] Bild 9.17). Die Überwachung kann auch mit einem thermischen Durchflussmesser[3] oder Paddel-Wächter erfolgen. Die letzte Variante ist wegen ihrer Störanfälligkeit nicht empfehlenswert.
- Abschaltung des Verdichters über die zu tiefe Austrittstemperatur
- Überwachung des Verdampferdruck mit einem Niederdruckpressostat

2 PIC = Pressure Indicator + Controller = Druckanzeige und Steuerung

3 Ein thermischer Durchflussmesser (kalorimetrischer Durchflussmesser) misst elektronisch den Durchfluss. Dieses Messprinzip wird bei der Strömungsüberwachung und bei der Durchflussmessung angewendet.

Bild 9.15: Rohrbruch aufgrund eines eingefrorenen Verdampferkreises (Frostschaden).

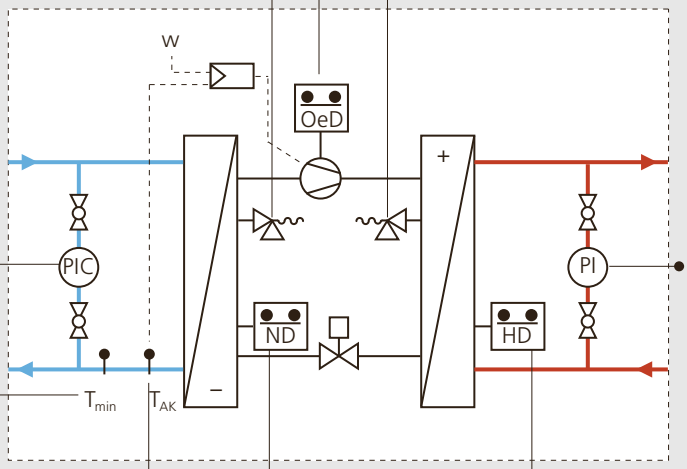
Bild 9.16: Mit der Strömungsüberwachung mittels Differenzdrucküberwachung kann der Durchfluss über den Verdampfer gemessen und so vor dem Einfrieren geschützt werden. Gleichzeitig wird so die Druckdifferenz angezeigt.

Öldrucküberwachung Verdichter
Der Öldifferenzdruckschalter überwacht den Schmieröldruck im Kälteverdichter. Ist der Druck über eine gewisse Zeit zu tief schaltet die Öldrucküberwachung den Kälteverdichter ab und schützt ihn so vor einem «Trockenlaufen» (Verdichter mit Ölpumpen).

Sicherheitsventil Kältemittelseite (Niederdruck ND)
Übersteigt der Druck auf der Kältemittelseite im Verdampfer den Grenzwert, öffnet das Sicherheitsventil und schützt so den Verdampfer vor einem Schaden.

Sicherheitsventil Kältemittelseite (Hochdruck HD)
Übersteigt der Druck auf der Kältemittelseite im Verflüssiger den Grenzwert (z. B. sollte die Hochdruck-Überwachung nicht reagieren), öffnet das Sicherheitsventil und Kältemittel wird abgeblasen. Dies schützt den Verflüssiger vor einem Schaden.

Strömungs-Überwachung Verdampfer
Mit einem Strömungsüberwacher wird geprüft, ob der Verdampfer durchströmt wird (PIC = Pressure Indicator + Controller = Druckanzeige und Steuerung).



Strömungs-Überwachung Verflüssiger (optional)
Mit einem Strömungsüberwacher wird geprüft, ob der Verflüssiger durchströmt wird (PI = Pressure Indicator = Druckanzeige).

Temperatur-Überwachung (Frostschutz)
Der Frostschutz T_{min} stellt sicher, dass der Verdampfer nicht einfriert. Er schaltet die Maschine ab, sobald die Austrittstemperatur unter den vorgegebenen Soll-Wert (w) fällt.

Überwachung der minimalen Austrittstemperatur (T_{AK})
Wird der eingestellte Wert erreicht, reduziert die Kältemaschine ihre Leistung und gibt Alarm.

Niederdruck-Überwachung
Ein Drucksensor stellt den Druck auf der Kältemittelseite fest und schaltet den Verdichter aus, sobald der Druck zu tief ist (Niederdruckstörung).

Hochdruck-Überwachung
Ein Drucksensor stellt den Druck auf dem Verflüssiger fest und schaltet den Verdichter aus, sobald der Druck zu hoch ist (Hochdruckstörung).

Frostschutz-Störung
Die Unterschreitung des Kältemitteldrucks im Verdampfer kann zu schwerwiegenden Schäden durch Einfrieren des Verdampfers führen.
Mögliche Ursachen sind:
- Zu tiefer Verdampfungsdruck
- Ungenügende Mediums-Strömung
- Mehrfache Quittierung des Niederdruckalarms

Niederdruck-Störung
Ein zu tiefer Druck auf der Kältemittelseite (Niederdruckstörung) kann zu schwerwiegenden Schäden durch Einfrieren des Verdampfers führen.
Die häufigsten Ursachen dafür sind:
- Zu tiefe Medium-Temperatur
- Zu kleiner Medium-Volumenstrom
- Verschmutzung auf der Medium seite (Kälteträger, Luftkühler)
- Kältemittelmangel
- Zu tiefe Verflüssigungstemperatur bei luftgekühlten Kaltwassersätzen beim Anfahren

Hochdruck-Störung
Kann die Verflüssigungswärme nicht abgeführt werden, steigt der Druck auf der Kältemittelseite an und der Verdichter wird abgeschaltet (Hochdruckstörung).
Mögliche Ursachen:
- Zu hohe Verdampfungstemperatur
- Kein oder zu wenig Durchfluss über den Verflüssiger
- Zu hohe Eintrittstemperatur

Hinweis: 90 % der Hochdruckstörungen haben ihre Ursache ausserhalb der Kältemaschine, d. h. bei der Wärmenutzung respektive Rückkühlung.

Bild 9.17: Sicherheitsrelevante Regel- und Steuergrössen bei Kältemaschinen.

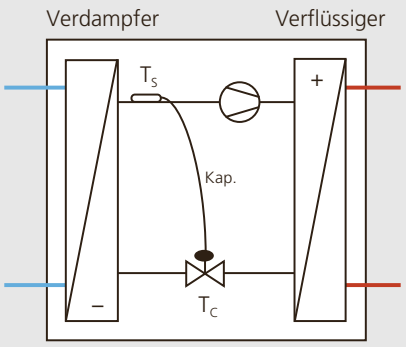
Vertiefung

Regulierung Sauggasüberhitzung

Um Schäden am Verdichter zu vermeiden, darf der Verdichter kein flüssiges Kältemittel ansaugen. Denn dies kann Flüssigkeitsschläge auf den Verdichter geben und ihn beschädigen. Damit kein flüssiges Kältemittel in den Verdichter gelangt, wird mit einer entsprechenden Überhitzung des Sauggases sichergestellt, dass das Kältemittel vollständig verdampft ist.
Aufgrund der Temperatur in der Saugleitung und des Verdampfungsdrucks kann ermittelt werden, ob alles Kältemittel verdampft ist.
Wenn das Kältemittel wärmer ist, als es zum vollständigen Verdampfen nötig wäre, sprechen die Kältefachleute von einer Sauggasüberhitzung. Je geringer diese Überhitzung ist, desto energieeffizienter ist die Kältemaschine. Gleichzeitig bedeuten kleine Überhitzungen auch ein Risiko, denn das System muss nun sehr schnell auf Veränderungen reagieren können.

Thermostatisches Expansionsventil
Bei thermostatischen Expansionsventilen (TEV) bewirkt eine Temperaturänderung am Messfühler eine Druckänderung im Kapillarrohr. Dieser Druck wird auf ein Membran übertragen, welches auf einen Ventilkegel wirkt. Dieser öffnet das TEV mehr oder weniger. Das thermostatische Expansionsventil verhält sich wie ein P-Regler und die Überhitzung ist – verglichen mit dem elektronischen Expansionsventil – grösser.

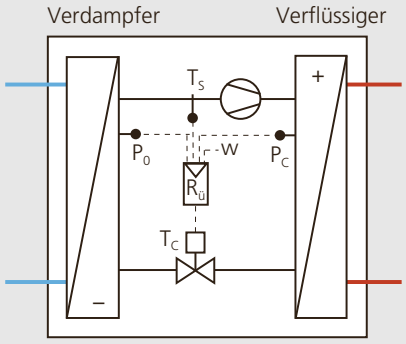
Elektronisches Expansionsventil
Bei einem elektronischen Expansionsventil (EEV) kontrolliert der Überhitzungsregler die Temperaturdifferenz zwischen der Sauggastemperatur und der berechneten Verdampfungstemperatur. Dank der genauen Elektronik kann das Einspritzventil in einem engen Bereich geregelt werden. Dadurch können die Temperaturen besser genutzt werden (weniger Reserve = energieeffizienter).



T_s Sauggastemperatur
Kap. Kapillarrohr
T_C Expansionsventil (Regulierung Sauggastemperatur)

Die Funktion eines thermostatischen Expansionsventils ist vergleichbar mit einem Heizkörper-Thermostatventil mit Fernfühler.

Bild 9.18: Regulierung der Sauggasüberhitzung mit einem thermostatischen Expansionsventil TEV.



$R_ü$ Überhitzungsregler Sauggas
T_C Expansionsventil (Regulierung Sauggastemperatur)
P_C Verflüssigungsdruck
P_0 Verdampfungsdruck
T_s Sauggastemperatur
w Sollwert

Bild 9.19: Regulierung der Sauggasüberhitzung mit einem elektronischen Expansionsventil EEV.

9.8 Regel-Ventile und Messfühler

Installation der Regel-Ventile

Die Ventile sollen möglichst nahe beim Verdampfer beziehungsweise Verflüssiger eingebaut werden. Denn eine zu grosse Distanz verursacht eine längere Totzeit und erschwert eine stabile Regulierung. Die Folge ist eine instabile Regulierung mit schwankenden Betriebstemperaturen.

Wahl und Einbau der Messfühler

In der Kältetechnik müssen möglichst schnelle, durchschnittbildende Fühler mit kleiner Zeitkonstante verwendet werden. Fühler, die direkt mit dem Kaltwasser Kontakt haben, reagieren schneller und genauer als solche in Tauchhülsen. Bei Messfühlern, die nicht in Tauchhülsen eingeführt sind, ist der Austausch oder die Kalibrierung aufwendiger.
Werden Messfühler in Tauchhülsen eingebaut, müssen diese immer mit Kontaktpaste umhüllt sein. Nur so liefern sie genügend genaue Messergebnisse.
Müssen falsch platzierte Fühler nachträglich versetzt werden, ist das aufwendig und teuer.

Platzierung der Messfühler

Falsch platzierte Messfühler nach dem Mischventil können verfälschte respektive schwankende Temperaturen messen. Dies führt zu schwankenden Temperaturen am Verdampfer-Eintritt. Als Folge wird die Regulierung der Kältemaschine instabil.
Temperaturfühler bei Mischschaltungen können wie in Bild 9.21 platziert werden:

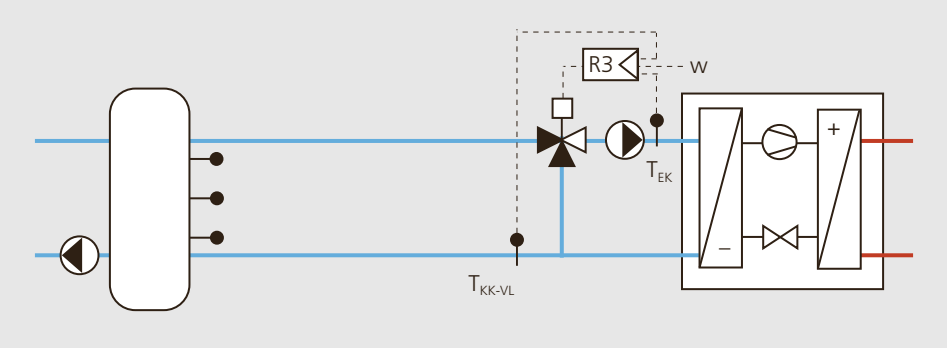


Bild 9.20: Werden die Verdampfer-Pumpe und das Regelventil nahe am Verdampfer installiert, reagiert das Regel-System schnell.

A: Nach der Pumpe	B: Nach dem Ventil
Korrekt platzierter Fühler (T_{EK}) nach der Verflüssiger-Pumpe. Hier haben sich die Wasserströme in der Regel vermischt und die Temperaturen sind «korrekt».	Der Messfühler soll nur nach dem Ventil und vor der Pumpe platziert werden, wenn es wirklich nicht anders geht. In diesem Fall muss der Fühler mit einem minimalen Abstand (d) von 10-mal dem Rohrdurchmesser – und mindestens 50 cm vom Ventil entfernt – platziert werden. Ansonsten können je nach Ventilstellung heterogene Mischungen zur falschen Temperaturerfassung führen.

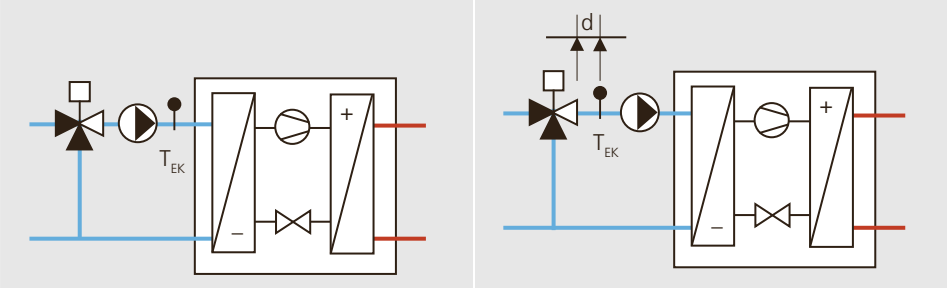


Bild 9.21: Platzierung des Ventils.

Die Platzierung des Messfühlers nach dem Ventil führt dazu, dass je nach Ventilstellung unterschiedliche Temperaturen gemessen werden. Das hat zur Folge, dass die Temperatur am Maschineneintritt starken Schwankungen unterworfen ist. Damit wird die Regulierung der Kältemaschine instabil. Siehe auch Kapitel «Hydraulische Systeme».

Bild 9.22: Falsch platzierter Messfühler unmittelbar direkt nach dem Mischventil und vor der Pumpe. Das Versetzen des Fühlers nach Inbetriebnahme der Anlage ist aufwendig.

9.9 Beispiele zur Kombination von Regulierungen

Aus den beschriebenen Regelkreisen wird die Gesamtregulierung der Klimakälteanlage zusammengestellt.
Zwei Beispiele einer möglichen Kombination – die sich für Anlagen mit kurzer Distanz zwischen Verflüssiger und Rückkühler eignen – sind im Folgenden aufgezeigt:

Kombination Beispiel A

R3 Regulierung der Kälteleistung
R4 Regulierung Maximalbegrenzung der Verdampfer-Eintrittstemperatur
R5 Regulierung Minimalbegrenzung Verflüssiger-Eintrittstemperatur
R6 Regulierung Rückkühler-Austrittstemperatur mit Sollwertschiebung in Abhängigkeit der Aussentemperatur

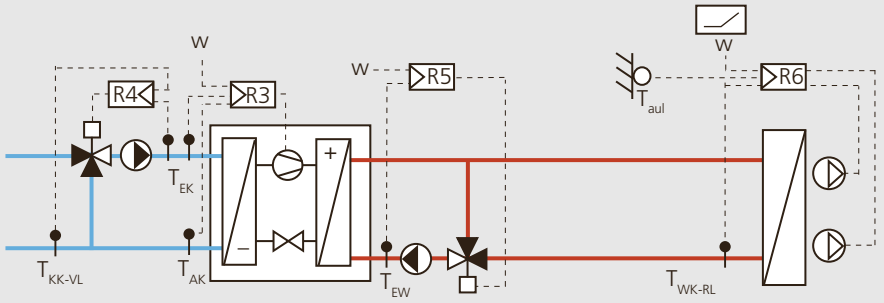


Bild 9.23: Gesamt-Regulierung einer Kälteanlage mit Beimisch-Schaltungen.

Kombination Beispiel B
für Kältemaschinen, die nur im Sommer in Betrieb sind

R6 Regulierung Rückkühler-Austrittstemperatur mit Sollwertschiebung in Abhängigkeit der Aussentemperatur
R7 Pumpendrehzahlregulierung
R8 Verflüssigungsdruck, Regulierung über drehzahlveränderliche Pumpe
R9 Sequenz-Regulierung der Kältemaschinenleistung über den Volumenstrom (Kältemaschinenhersteller muss seine Einwilligung geben)

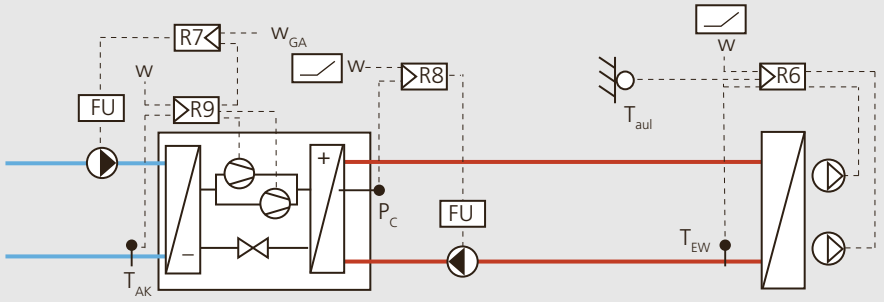


Bild 9.24: Regulierung einer Kälteanlage mit variablen Volumenströmen.

9.10 Monitoring des Betriebs

Um den optimalen Betrieb einer Kälteanlage sicherzustellen und die Bedienung für das Betriebspersonal zu erleichtern, ist es sinnvoll, die wichtigsten Betriebsdaten und auch die Energieeffizienz der Anlage zu visualisieren und die Daten zu speichern.

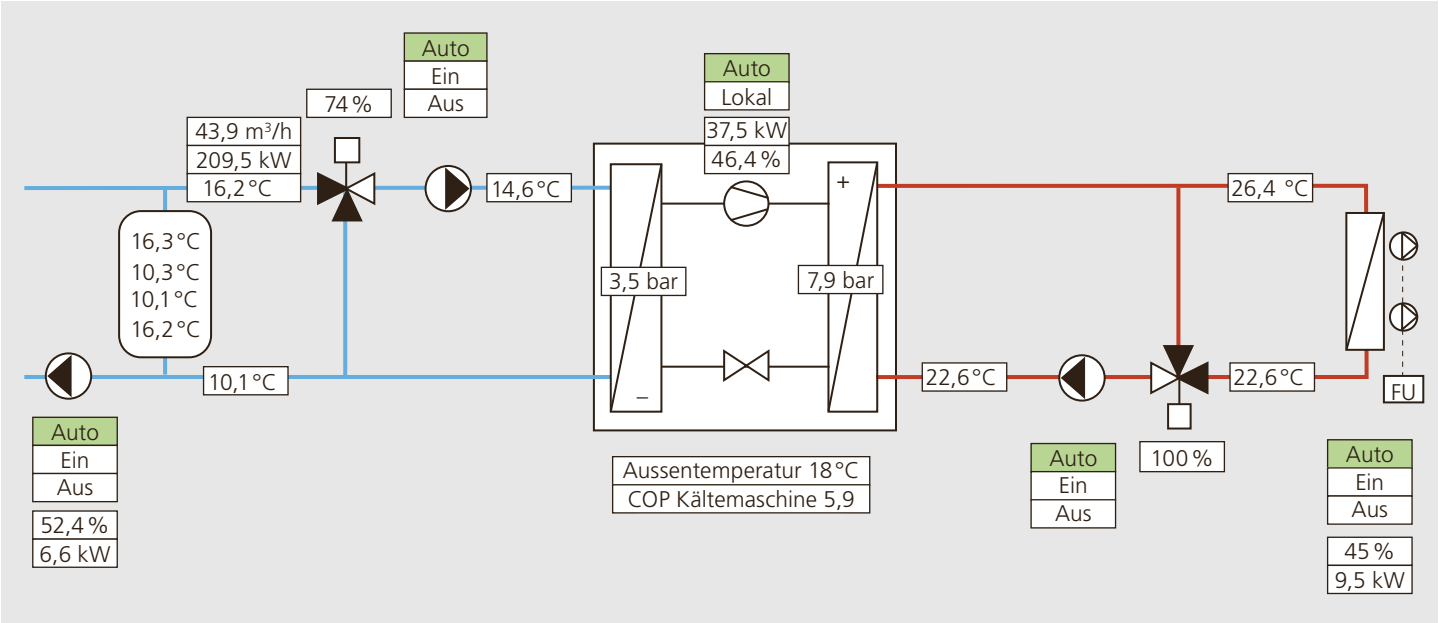
Liegen die Daten über die generierte Kälteleistung und den Leistungsbedarf der Kältemaschine vor, ist es sinnvoll, die Leistungszahl der Kältemaschine laufend anzuzeigen. Weil die Energieeffizienz der Anlage in erster Linie von der Kältemaschinenleistung und von der Aussentemperatur abhängig ist, sollten diese Werte ebenfalls visualisiert werden, damit die aktuell angezeigte Leistungszahl besser beurteilt werden kann. Damit sind gute Voraussetzungen für eine laufende Optimierung der Anlage in Bezug auf die Energieeffizienz gegeben.

Die Anzahl der erfassten Daten hängt von der Grösse der Anlage ab. Aus den gespeicherten Daten können Grafiken über den zeitlichen Verlauf des Energieverbrauchs und der Kälteproduktion sowie den Verlauf der Energieeffizienz je Kältemaschine in Abhängigkeit der Aussentemperatur erstellt werden.

Für den Betreiber ist wichtig, dass jemand die Daten regelmässig überprüft und die angezeigten Werte auch interpretieren kann. Nur so stiftet eine solche (nicht ganz billige) Visualisierung einen Nutzen.

Bild 9.25 zeigt eine Visualisierung einer Gebäudeautomation (GA) mit laufender Überwachung der Energieeffizienz.

Bild 9.25: Visualisierung Energieverbrauch einer grösseren Kältemaschine.



10 Merkpunkte zur Steuerung von Klimakälteanlagen

1. An den Schnittstellen zwischen der Kältemaschine, den Kälteverbrauchern, den Wärmeverbrauchern und der HLK-Gebäudeautomation muss definiert werden, welche Daten und Signale benötigt werden.
2. Die Anlage (Kältemaschine, Wärmenutzung, Rückkühlung etc.) ist als ein Gesamtsystem zu betrachten. Die Regulierung und Steuerung der Kältemaschine muss in die Regulierung und Steuerung des Gesamtsystems integriert werden.
3. Regulierung und Steuerung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz der gesamten Anlage.
4. Die Kältemaschine kann nur in bestimmten Temperaturbereichen eingesetzt werden. Die Regulierung hat dafür zu sorgen, dass die Kältemaschine in diesem Bereich arbeitet. Wenn die Regulierung den Temperaturbereich nicht einhält, kann die Kältemaschine nicht anfahren.
5. Bestandteil der Kälteerzeugung sind auch die Steuerung, Regulierung, Sicherheitseinrichtungen und die hydraulischen Systeme (Pumpen und Ventile).
6. Je genauer die Kälteerzeugung dem effektiven Kältebedarf angepasst werden kann, desto effizienter ist die Anlage.
7. Die drei wichtigsten Kältemaschinen-Regulierungen sind:
   - Ein-Aus-Regulierung (0 % und 100 %),
   - Stufenregulierung (0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 %) oder
   - Regulierung stufenlos (20 % bis 100 %) mit einem Frequenzumformer (FU)
8. Wenn der Kühlbedarf zu 100 % der Auslegung entspricht, funktionieren die meisten Systeme. Zu prüfen ist, wie sich das Kältesystem verhält, wenn der Kältebedarf zwischen 0 % und 50 % der Auslegungsleistung liegt.
9. Mit der Regulierung können hydraulische und andere Fehler nicht kompensiert werden.
10. Die Anlage soll bei aussergewöhnlichen Temperaturen (Winter und Übergangszeit: Frost, Sommer: Tropenhitze) innerhalb ihrer Anwendungsgrenzen betrieben werden. Besser als ein Totalausfall ist, wenn die Anlage in diesen Extremsituationen «reduziert» arbeitet. So werden die garantierten Werte zwar nicht mehr erreicht, aber eine Grundkühlung findet trotzdem noch statt.

Kapitel 10

Energieeffizienz und Teillastverhalten

Der energetisch optimale Betrieb von Klimakälteanlagen ist ein wichtiges Ziel der ingenieurtechnischen Planungsarbeit. Der Planende muss die Kennzahlen – wie beispielsweise COP und EER – verstehen, denn sie ermöglichen eine Aussage zur Effizienz von Komponenten und der Gesamtanlage. Neben der Systemwahl müssen auch Betriebszustände und die gleichzeitige Nutzung von Kälte und Wärme in die Planung einfliessen. Dabei braucht es über die Kälte hinaus den Blick auf das Gesamtsystem.

10.1 Anlageneffizienz verstehen

Die Beurteilung der Energieeffizienz einer Klimakälteanlagen ist komplex. Es muss ein System beurteilt werden, das aus vielen unterschiedlichen Komponenten besteht, die im «realen» Betrieb (Teillastbetrieb) anders zusammenspielen als im Auslegungspunkt bei Volllast. Zudem können Effizienzkennzahlen zum einen für Einzelkomponenten definiert werden, das heisst z. B. nur für die Kältemaschine. Zum andern aber auch für ein Gesamtsystem, wie es die Kälte-Wärme-Maschine inkl. Wärmenutzung darstellt. Darum ist es zentral, dass bei allen Kennzahlen klar zum Ausdruck kommt, was sie umfassen (Systemgrenzen).

Gesamteffizienz im Blick

Das Ziel ist immer ein optimiertes Gesamtsystem. Darum kann es zum Beispiel Sinn machen, die Verflüssigungstemperatur anzuheben und damit den Kälteprozess ineffizienter zu machen. Dann nämlich, wenn auf der «Habenseite» die Wärme vollständig genutzt werden kann und so ein hocheffizientes Gesamtsystem entsteht. (siehe Kapitel Wärmeabgabe Kapitel 7.1) Daher muss immer das Gebäude als Ganzes (eventuell auch ein Areal oder ein Quartier) optimiert werden und nicht «nur» eine Einzelkomponente.

Teillastbetrieb ist entscheidend

Die Effizienz des Gesamtsystems wird in einem ersten Schritt für einen festen Zeitpunkt (in der Regel bei Maximalbelastung) beurteilt. Doch Klimakälteanlagen arbeiten in der Regel nur wenige Tage im Jahr bei Volllast – die meiste Zeit arbeitet sie im Teillastbetrieb. Daher macht es wenig Sinn die Anlage so auszulegen, dass sie die optimale Energieeffizienz bei Volllast (100 %) erzielt. Vielmehr ist es der Teillastbetrieb, bei dem die Klimakälteanlage hocheffizient arbeiten muss.

Im Schnitt arbeitet eine Klimakälteanlage während 60 % ihrer jährlichen Betriebszeit mit weniger als 50 % Leistung.

Es lohnt sich, das Verhalten und die Energieeffizienz von Anlagen nebst der Volllast auch bei 25 %, 50 % und 75 % Last zu beurteilen. Mit verschiedenen Steuerungsmöglichkeiten, z. B. Betrieb mit einem FU oder mit dem Zuschalten von Leistungsstufen, mit zusätzlichen Speichern oder der Nutzung von Wärme kann die Effizienz der Gesamtanlage über das ganze Lastspektrum hinweg deutlich verbessert werden.

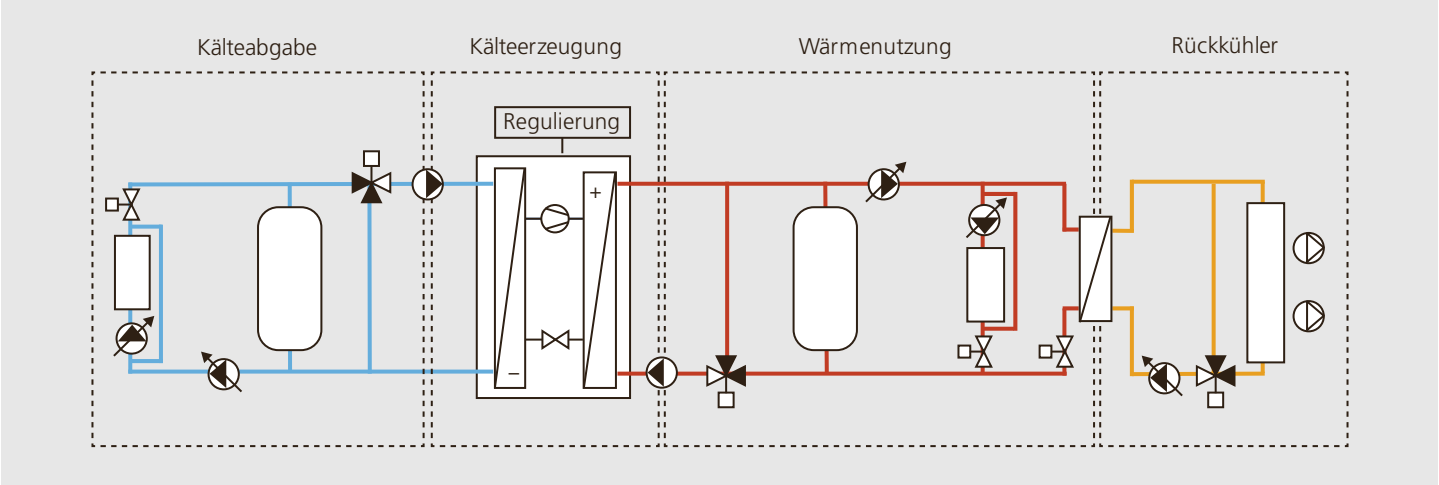
Energieeffizienz ist eine Haltung
Von der Planung über den Bau zur Inbetriebnahme und zum Betrieb: Energieeffizienz ist immer ein Thema und muss daher im täglichen Arbeitsprozess gezielt verfolgt werden. Nach Abschluss der Arbeiten sich noch kurz Gedanken zur Energieeffizienz der Klimakälteanlage zu machen, ist nicht zielführend.
In allen vorhergehenden Kapiteln werden die Energie und die Effizienz aufgegriffen und thematisiert.

10.2 Energiebilanz einer Klimakälteanlage

Die Energiebilanz einer Kälteanlage kann in unterschiedlichen Systemgrenzen gebildet werden. Das Energiegesetz fordert, dass neben der reinen Kältemaschine auch die Leistungen für Umwälzpumpen in den Wärme- und Kälteträgerleitungen, für Ventilatorantriebe in Rückkühlern etc. einberechnet werden. Bild 10.1 zeigt eine exemplarische Einteilung einer Kälteanlage in Teilsysteme. Jedes Teilsystem liefert einen Beitrag zur gesamten Effizienz der Anlage. Die Kältemaschine ist aus Sicht der Effizienz zwar ein wichtiger Bestandteil – für den Betreiber ausschlaggebend ist aber die gesamte Energieeffizienz der Anlage. So können beispielsweise Fehlfunktionen in Ventilen zu einem ineffizienten Betrieb führen, obwohl die Kältemaschine optimal läuft. Zudem muss darauf geachtet werden, dass sich die Temperaturen für die kalte und für die warme Seite an den jeweiligen Kälte- und Wärmeverbrauchern orientieren.
Die Angabe von Leistungszahlen sollte der SIA 382/1 (2014) oder Eurovent entsprechen. Bei Kompaktanlagen werden elektrische Verbraucher innerhalb der Anlage zum Aufwand hinzugerechnet

Die Energiemessung für Kälteanlagen erfolgt oft unter «erschwerten Bedingungen», da die Komponenten im Gebäude häufig weit verteilt liegen. Bei grösseren Anlagen ist es durchaus üblich, dass sich auf dem Dach ein separater Rückkühler befindet, der über ein hydraulisches Netz an die Kältemaschine im Keller angeschlossen ist. Dies ist ein deutlicher Unterschied zu Wärmepumpen, die oft kompakter aufgebaut sind. Es braucht daher eine sorgfältige Summierung der relevanten Teilenergieströme.
Wärmeverluste, die durch Wärmeabgabe auf der warmen Seite ausserhalb des Wärmeübertragers auftreten, liegen erfahrungsgemäss unterhalb von 3 % von ($\dot{Q}_{Wärme}$) und werden hier vernachlässigt.

Bild 10.1: Exemplarische Einteilung einer Kälteanlage in Teilsysteme.



10.3 Energetische Beurteilung von Klimakälteanlagen

EnergieSchweiz stellt mit «Kälte-Tool» online kostenlos ein Werkzeug zur energetischen Beurteilung von Kälteanlagen zur Verfügung. Zudem gibt es noch weitere Berechnungsprogramme (www.effiziente-kaelte.ch). Die Werkzeuge unterstützen die Planung von energieeffizienten Anlagen. Für die Beurteilung von Klimakälteanlagen gibt es verschiedene grundlegende Begriffe, die bekannt sein müssen. Insbesondere die Lüftungsnorm SIA 382/1 (2014) nimmt hierauf Bezug. Als Branchenverband definiert z. B. Eurovent Prüfungen von Kältemaschinen unter vorgegebenen Bedingungen.

COP (Coefficient of Performance)
Bei Kältemaschinen und Wärmepumpen wird die Leistungszahl – also die Effizienz der Maschine – als COP bezeichnet. Je höher der Wert, desto effizienter arbeitet die Kältemaschine.
Der COP bei einer Kältemaschine ($COP_{Kälte}$) ist das Verhältnis zwischen der Kühlleistung und der eingesetzten elektrischen Leistung. Der COP bei einer Wärmepumpe ($COP_{Wärme}$) ist das Verhältnis zwischen der Heizleistung und der eingesetzten elektrischen Leistung.

Energy Efficiency Ratio (EER)
In der Praxis trifft man sowohl die Bezeichnung EER (Energy Efficiency Ratio), wie auch den $COP_{Kälte}$ an. Beide Bezeichnungen beschreiben die Leistungszahl der Kältemaschine und können nahezu synonym verwendet werden. In diesem Fachbuch verwenden wir den EER nur in Bezug zur SIA Norm und der Definition des ESEER.

Leistungszahl einer Kältemaschine
Die ideale Carnot-Leistungszahl $\varepsilon_{C\ Kälte}$ (vergleiche Kapitel Grundlagen, Gleichung 3-1) zeigt, dass die Leistungszahl das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand abbildet. Auf die reale Kältemaschine angewandt, kann die Leistungszahl aus den aufgenommenen und erzeugten Energieleistungen (Kälte) berechnet werden. Sie wird als $COP_{Kälte}$ (Coefficient of Performance) oder EER (Energy Efficiency Ratio) bezeichnet:

$$COP_{Kälte} \text{ oder } EER = \frac{\dot{Q}_{Kälte}}{P_{el}}$$

Gleichung 10-1

mit

$\dot{Q}_{Kälte}$ Kälteleistung in kW
P_{el} effektive elektrische Anschlussleistung (Klemmenleistung) in kW[1]

Als Grenzwert des $COP_{Kälte}$ kann die Carnot-Leistungszahl $\varepsilon_{C\ Kälte}$ betrachtet werden. Sie stellt das Potenzial des $COP_{Kälte}$ unter idealen Bedingungen dar (unerreichbar). Wie dicht die Realität am Idealzustand liegt, kann über das Verhältnis von $COP_{Kälte}$ und $\varepsilon_{C\ Kälte}$ ausgedrückt werden. Dieses Verhältnis wird als Carnot-Gütegrad η_C bezeichnet:

$$\eta_c = \frac{COP_{Kälte}}{\varepsilon_{c\ Kälte}}$$

Gleichung 10-2

Der $COP_{Kälte}$ wird aus den Leistungsdaten von stationären Betriebspunkten gebildet. Die Parameter dieser Betriebspunkte müssen entsprechend bekannt sein. Nur Kennzahlen gleicher Betriebspunkte dürfen miteinander verglichen werden. Die Anforderungen an die Leistungszahlen werden in SN EN 14511 und SIA 382/1 (2014)[2] definiert. Die nachzuweisenden Punkte entsprechen in der Regel nicht den Auslegungspunkten der Kälteanlage.
Bei der Beurteilung der Kältemaschine allein, d. h. unabhängig vom Kältenetz und vom Rückkühl-Kreislauf, stellt sich die Frage, wie die elektrischen Leistungen der

1 Der Klarheit halber wird hier auf die Leistung der Umwälzpumpen verzichtet, die anteilsmässig noch einzurechnen sind. Wird die Pumpenleistung mit eingerechnet – so wie es die Norm SN EN 14511 vorsieht – sinkt der $COP_{Kälte}$ um 5 % bis 10 %.

2 Die SIA 382/1 (2014) wird in absehbarer Zeit angepasst und der Teil zur Klimakälte wird voraussichtlich in die Normen-Reihe 384 verschoben. (Stand Mai 2021).

Systemgrenzen EER

Der Elektrizitätsbedarf der Pumpen im Kälte- und im Zwischenkreis nach Norm SIA 382/1 (2014).

1. EER bei luftgekühlten Kälteerzeugern

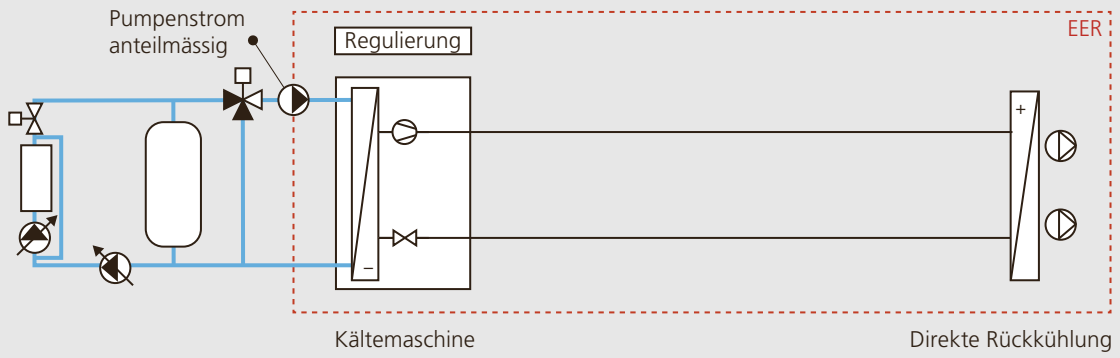


Bild 10.2: Systemgrenzen zur Berechnung des EER-Werts. Der Elektrizitätsbedarf der Verdampfer-Pumpen ist anteilig, jener der Ventilatoren im Rückkühlkreis ist zur Gänze einzurechnen.

2. EER bei wassergekühlten Kälteerzeugern ohne Wärmenutzung

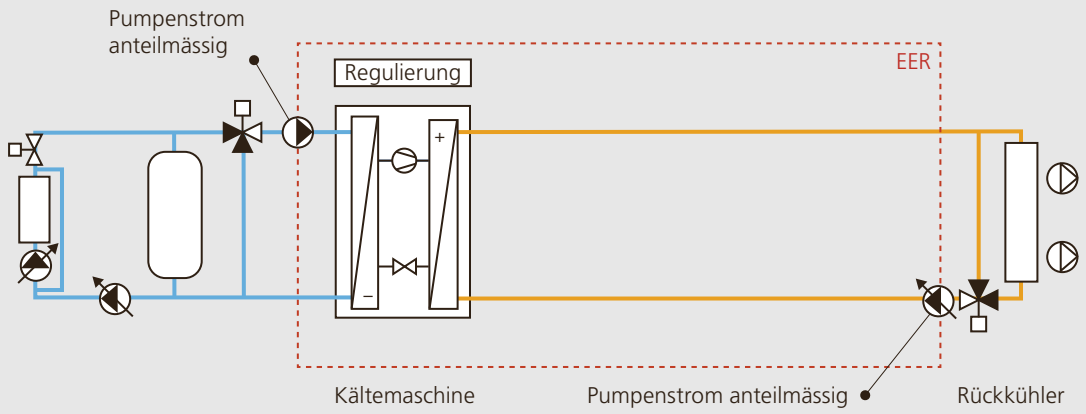


Bild 10.3: Systemgrenzen zur Berechnung des EER-Werts bei einer wassergekühlten Kälteanlage ohne Wärmenutzung. Der Elektrizitätsbedarf der Verdampfer- und Verflüssiger-Pumpen sind anteilmässig einzurechnen.

3. EER bei wassergekühlten Kälteerzeugern mit Wärmenutzung

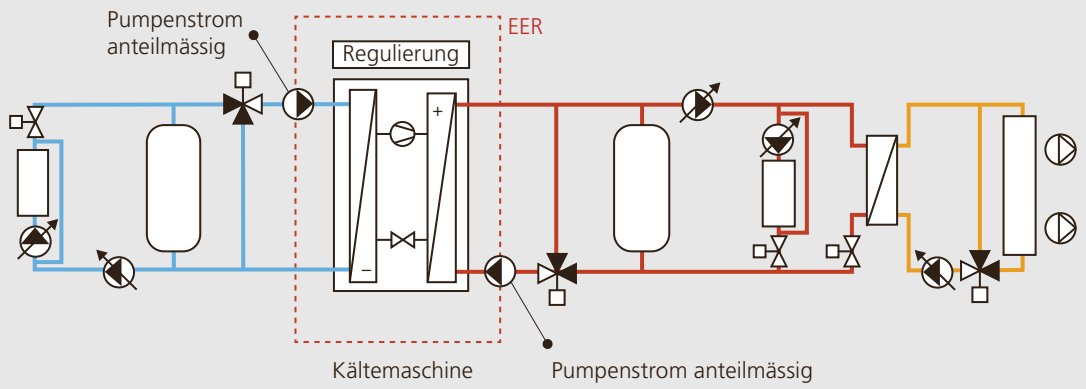


Bild 10.4: Systemgrenzen zur Berechnung des EER-Werts bei einer wassergekühlten Kälteanlage. Der Elektrizitätsbedarf der Verdampfer- und Verflüssiger-Pumpen sind anteilmässig einzurechnen.

Systemgrenzen EER⁺

1. EER⁺ bei luftgekühlten Kälteerzeugern

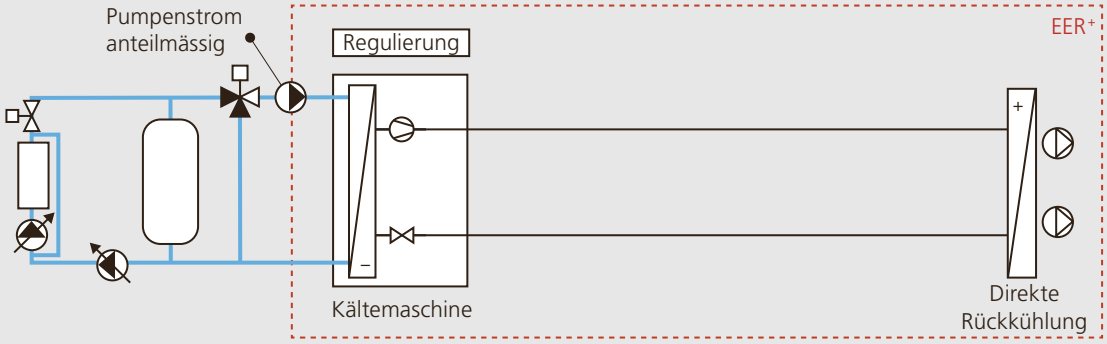


Bild 10.5: Systemgrenzen zur Berechnung des EER⁺-Werts. Der Elektrizitätsbedarf der Verdampfer-Pumpen ist anteilig, jener der Ventilatoren im Rückkühlkreis ist zur Gänze einzurechnen.

2. EER⁺ bei wassergekühlten Kälteerzeugern ohne Wärmenutzung

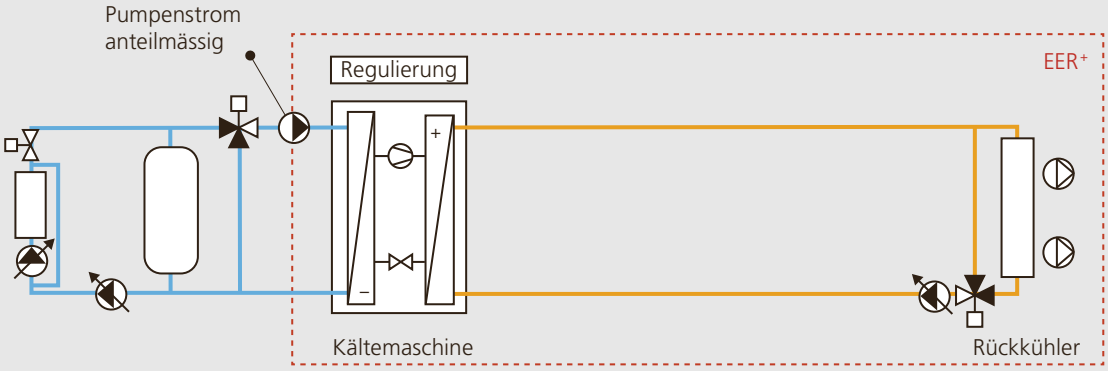


Bild 10.6: Bei wassergekühlten Kälteerzeugern ohne Wärmenutzung ist bei der Berechnung des EER⁺-Werts der Energieverbrauch des Rückkühlers mit Pumpen und Ventilatoren einzurechnen

3. EER⁺ bei wassergekühlten Kälteerzeugern mit Wärmenutzung

Bei wassergekühlten Kälteerzeugern mit einer Wärmenutzung ist die SIA 382/1 (2014) nicht direkt anwendbar und sie definiert für diesen Fall keine Systemgrenzen für den EER⁺.
Die Praxis zeigt jedoch, dass einige Kunde nur Anlagen bestellen, bei denen der Planer einen EER⁺-Wert angeben kann. Anstelle nun auf die sinnvolle Wärmenutzung zu verzichten – nur damit der EER⁺-Wert-Nachweis erbracht werden kann – empfiehlt sich die in Bild 10.7 dargestellte Systemgrenze zu wählen. Grundlage für die Berechnung bildet der Betriebszustand, bei dem keine Wärmenutzung erfolgt.

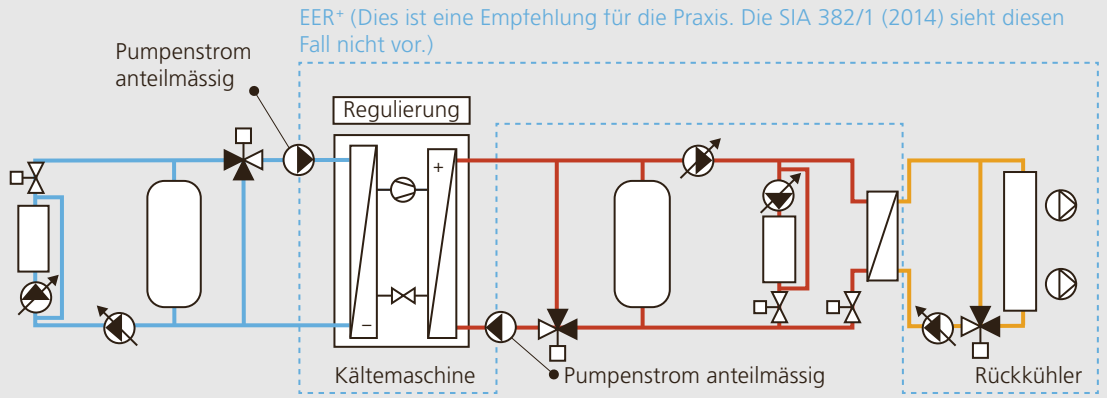


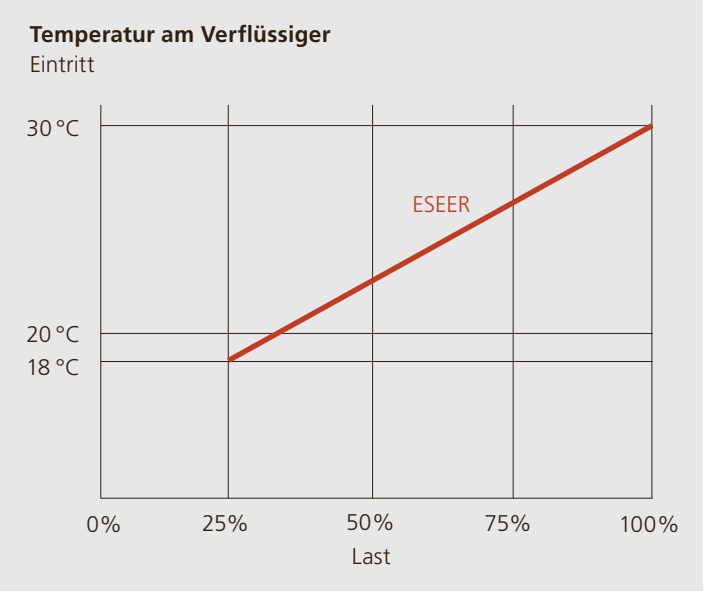
Bild 10.7: Empfehlung wie bei wassergekühlten Kälteerzeugern mit einer Wärmenutzung die Systemgrenze für den EER⁺ sinnvoll gewählt werden könnte.

Pumpen auf diesen Seiten (Kältenetz und Rückkühl-Kreislauf) zu berücksichtigen sind. Da die Druckverluste und Volumenströme im Kältenetz und im Rückkühlkreis mitverantwortlich für den Energieverbrauch sind, bestimmt SIA 382/1 (2014), dass die Verbräuche der Pumpen im Verhältnis der Druckverlustanteile der Kältemaschine und der Wärmeübertrager zugeschlagen werden (siehe Bild 10.2 bis Bild 10.7).
Für wassergekühlte Kälteanlagen muss der Rückkühler in die Effizienzbeurteilung komplett miteinbezogen werden. Zu diesem Zweck definiert SIA 382/1 (2014) den erweiterten EER mit der Bezeichnung EER^+. EER^+ erweitert die Systemgrenze so, dass alle Energieverbräuche des Rückkühlsystems komplett mit einberechnet werden. Die Abgrenzungen von EER und EER^+ wird im in Bild 10.2 bis Bild 10.7 verdeutlicht.

European Seasonal Energy Efficiency Ratio (ESEER)

Der Kältebedarf hängt in der Regel von der äusseren Last auf ein Gebäude und damit von der Jahreszeit ab. Das bedeutet, dass die Kältemaschine einen Grossteil der Zeit unter Teillast betrieben wird. Die Effizienz kann sehr genau beurteilt werden, wenn die gesamte Nutzenergie und die gesamte aufgewendete Energie gemäss EER-Definition während eines ganzen Jahres aufsummiert und ins Verhältnis gesetzt werden.

Bild 10.8: Schiebung der Verflüssigungstemperatur für die Berechnung des ESEER-Werts in den Teillastpunkten.



Um den Voraus-Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird das Jahr in vier Lastbereiche für $\dot{Q}_{Kälte}$ (100 %, 75 %, 50 %, 25 %) aufgeteilt. Jeder Lastbereich wird mit einem Gewichtungsfaktor entsprechend einer angenommenen Betriebszeit der Kältemaschine während eines Jahres versehen. Die Summation der gewichteten Lastfälle führt dann zu einem ganzjährigen Effizienzwert. In Europa wird dieser Wert mit ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) bezeichnet:

$$ESEER = 0{,}03\ EER_{100\,\%} + 0{,}33\ EER_{75\,\%} + 0{,}41\ EER_{50\,\%} + 0{,}23\ EER_{25\,\%}$$

Gleichung 10-3

Für die Berechnung der Lastfälle im Teillastfall wird zudem die Verflüssigungstemperatur gemäss Bild 10.8 geschoben.

Hinweis: Der ESEER gilt nur für klassische Klimakälteanlagen. Er ist nicht geeignet für Anlagen mit hohen internen Lasten (wie zum Beispiel Rechenzentren) sowie für Anlagen mit Wärmenutzung. Denn diese Anlagen weisen ganz andere Betriebszeiten auf als die, die der Berechnung des ESEER zugrunde liegen (vgl. Gleichung 10-3).

Für die Berechnung des Kälte- beziehungsweise Energieverbrauchs bei einfachen Anlagen kann eine Abschätzung aufgrund von jährlichen Volllaststunden und der durchschnittlichen Leistungszahl nach ESEER erfolgen. Hierfür gelten die entsprechenden Richtwerte für die jährlichen Volllaststunden:

- Ältere Anlagen (oft etwas überdimensioniert): 600 bis 800 Stunden
- Neuere Anlagen mit höheren internen Lasten (Kühlgrenze bei ca. 10 °C, knappere Auslegung): 1000 bis 1500 Stunden
- Rechenzentren: 2000 bis 4000 Stunden

Zum Energiebedarf der Kältemaschine muss der Energiebedarf der Rückkühlung und der Pumpen hinzugerechnet werden. Eine genauere Voraussage des Energiebe-

darfs einer gesamten Kälteanlage kann nur mit einer objektbezogenen Simulation berechnet werden. Eine andere Möglichkeit ist, den Energieverbrauch mit dem Kälte-Tool von EnergieSchweiz abzuschätzen (www.effizientekaelte.ch).

Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER)

Der SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) beschreibt die Kühleffizienz einer Kältemaschine übers Jahr. Dabei wird die Effizienz der Kältemaschine bei vier Aussentemperaturen (20 °C, 25 °C, 30 °C und 35 °C) ermittelt und die Perfomance-Werte entsprechend den Laufzeiten gewichtet. Mit diesem Berechnungsverfahren sollen die Betriebsbedingungen praxisnah abgebildet werden.

Seasonal Coefficient of Performance (SCOP)

Der SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) beschreibt die Effizienz einer Luft-Wasser Wärmepumpe im Heizbetrieb im Jahresverlauf. Die Effizienz wird bei vier Aussentemperaturen (12 °C, 7 °C, 2 °C und –7 °C) und für drei Klimazonen (Süd-, Mittel- und Nordeuropa) ermittelt und entsprechend gewichtet. In der Schweiz werden die Werte für die Klimazone Mitteleuropa beigezogen.

Kennzahlen richtig interpretieren

Mit dem $COP_{Kälte}$ lag in der Vergangenheit der Fokus bei der Beurteilung Energieeffizienz im Auslegepunkt der Kälteanlage. Die Praxis zeigt jedoch, dass eine Kälteanlage über ein Jahr gesehen nur 3 % ihrer Laufzeit bei Volllast arbeitet. Die meiste Zeit – die restlichen 97 % – arbeitet die Kältemaschine im Teillastbetrieb. Im Teillastbetrieb herrschen jedoch ganz andere Betriebsbedingungen (Temperaturen, Kältebedarf...) und die Kältemaschine arbeitet oft effizienter als im Auslegepunkt. Um die realen Betriebsbedingungen besser abbilden zu können, wurden mit dem ESEER (European SEER) und dem SEER zwei Kennzahlen eingeführt, welche den realen Betrieb (Teillast, Aussentemperatur, Laufzeiten...) praxisgerechter abbilden sollen.
Das Beispiel der Kennzahlen einer Kältemaschine mit einer Kälteleistung von 300 kW zeigt, dass die drei Kennzahlen erheblich auseinander liegen.

$COP_{Kälte}$	3,3
SEER	7,4
ESEER	8,2

Elektrothermischer Verstärkungsfaktor (ETV)

Die Rückkühlung und die Pumpen im hydraulischen Kreis müssen energetisch separat beurteilt werden. Dafür kann der elektrothermische Verstärkungsfaktor (ETV) genutzt werden. Der ETV resultiert aus dem Verhältnis der umgesetzten thermischen Leistung zur eingesetzten elektrischen Leistung. Für Rückkühler ergeben sich die beiden ETV-Formulierungen:

$$ETV_{\text{Rückkühlung (Ventilatoren)}} = \frac{\dot{Q}_{RK}}{P_{\text{Ventilatoren}}}$$

$$ETV_{\text{Rückkühlung (Pumpen)}} = \frac{\dot{Q}_{RK}}{P_{\text{Pumpen}}}$$

$\dot{Q}_{RK}$ thermische Rückkühlleistung in kW
$P_{Ventilatoren}$ elektrische Anschlussleistung (Klemmenleistung) in kW.
P_{Pumpen} elektrische Anschlussleistung (Klemmenleistung) in kW

Effizienz der Rückkühlung und der Kaltwasserförderung – Richtwerte gemäss Norm SIA 382/1 (2014) (bei Volllast)

	Rückkühl-ventilatoren	Rückkühl-pumpen	Kaltwasser-pumpen
Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor ETV	über 28	über 85	über 65
Anteil der elektrischen Leistung der Komponente an der Rückkühlleistung	höchstens 3,6 %	höchstens 1,2 %	höchstens 1,5 %

Bild 10.9: Die Anforderungen gemäss SIA 382/1 (2014) an ETV-Werte von Rückkühlanlagen.

10.4 Effizienter Betrieb von Klimakälteanlagen

Was beeinflusst die Effizienz einer Kältemaschine?
Schon die Definition der Carnot-Leistungszahl zeigt die Einflüsse der Temperaturen in Verdampfer und Verflüssiger auf. Eine hohe Energieeffizienz wird demnach erreicht, wenn:

- die Verdampfungstemperatur möglichst hoch liegt: Die Kaltwassertemperatur ist deshalb hoch zu wählen.

Faustregel Kaltwassertemperatur:
1 K höhere Kaltwassertemperatur reduziert den Energieverbrauch um ca. 3 %.

- die Verflüssigungstemperatur möglichst tief liegt: Die Wahl des Rückkühlsystems hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verflüssigungstemperatur und damit auf den Energieverbrauch der Kälteanlage.

Faustregel Kondensationstemperatur:
1 K tiefere Kondensationstemperatur reduziert den Energieverbrauch um ca. 2,5 %.

Dabei kann eine minimale Temperaturdifferenz zwischen Verdampfung und Verflüssigung technisch nicht unterschritten werden.
Die Energieeffizienz der Kältemaschine wird zudem beeinflusst durch:

- Prozesswahl (Sauggasüberhitzung, Unterkühlung)
- Systemwahl (einfache oder doppelte, parallele Ausführung des Kältemittelkreislaufs, Verdampferart)
- Komponentenwahl (Verdichter, Wärmeübertrager, Verdampferart etc.)

Der Stromverbrauch der Nebenaggregate beeinflusst die Gesamteffizienz einer Kälteanlage immens. Während die Leistungszahl der Kältemaschine bei Teillastbetrieb mit abgesenkter Verflüssigungstemperatur T_C steigt, nimmt der anteilige Einfluss des Pumpenstromverbrauchs zu.

Speziell bei Klimakälteanlagen ist die Aufbereitung der Zuluft von grosser energetischer Bedeutung. Die klimatischen Zustände können eine Entfeuchtung der Luft erfordern, bevor sie als Zuluft dem Gebäude zur Verfügung gestellt wird, da eine Kondensation innerhalb des Gebäudes (z. B. bei Kühldecken) verhindert werden muss. Deshalb wird die Entfeuchtung durch Kondensation gezielt ins zentrale Lüftungsgerät verlagert. Dabei wird die Luft unter ihre Kondensationstemperatur abgekühlt und die Feuchtigkeit «abgeregnet». Es resultiert trockene, aber kalte Luft, die wieder auf die gewünschte Temperatur erwärmt werden muss. Der Prozess der Entfeuchtung ist sehr energieintensiv. Die Kältemaschine benötigt mehr Leistung und sie muss bei tieferen Temperaturen fahren. Die Anforderungen an die Raumluft im Aufenthaltsbereich sind mit der Norm SIA 382/1 (2014) vorgegeben.

Teillastverhalten von Kältemaschinen

Der Begriff der Teillast einer Kältemaschine ist für Anwendungen in der Klimakälte genauer zu definieren. Die notwendige Nutztemperatur ist immer konstant. Teillast für eine Kältemaschine bedeutet also, dass weniger Kälteleistung angefordert wird, die Kälteträger-Temperatur aber konstant bleiben muss. Die Kältemaschine kann über eine Massenstromregelung für das Kältemittel bei ansonsten konstanten Prozessparametern darauf reagieren (vgl. z. B. Zylinderabschaltung, Drehzahlregulierung usw.). Die Gesamtanlage kann auch über einen Kältespeicher auf die Teillastanforderung reagieren. Das führt zu kürzeren Betriebszeiten der Kältemaschine.
Die Verdichter haben einen bedeutenden Einfluss auf den Verbrauch beim Teillastbetrieb. Zunehmend werden Frequenzumrichter für eine Drehzahlregulierung eingesetzt. Bei der Planung ist daher dringend vom Hersteller ein Verlauf über das Teillastverhalten der Verdichter im benötigen Leistungsbereich anzufordern.

Einfluss des Verdichtertyps auf die Teillastperformance

Die Kälteleistung einer allgemeinen Kältemaschine wird hauptsächlich über die Veränderung des Kältemittelmassenstroms einreguliert, wobei die Verdampfer-Austrittstemperatur grundsätzlich konstant bleibt. Eine Reduktion des Massenstroms führt dann zu einer verminderten Leistung (vergleiche Kapitel 3.5), auch Teillastzustand genannt.

Bei Klimakälteanwendungen wird jedoch zusätzlich die Verflüssiger-Eintrittstemperatur geschoben, wie es bereits in der Definition des ESEER erläutert ist und diese Massnahme hat einen ebenfalls dominanten Einfluss auf die Leistungszahl. Beide Einflüsse resultieren für die verfügbaren Verdichtertypen in unterschiedlich starken Anstiegen der Leistungszahl bei zunehmender Teillast. Speziell das Verhalten der Turbo-Verdichter ist im Anhang 11.3 eingehend präzisiert.

Hilfestellung bei der Verdichterwahl

Die zhaw hat im Auftrag von EnergieSchweiz eine Studie zu den verschiedenen Verdichterbauarten verfasst. In dieser werden die Bauarten verglichen.

In einem einfachen Tool kann man sich mit einigen wenigen Eingaben die einsetzbaren Verdichter und deren Effizienz (COP) zusammenstellt lassen.

Diverse ergänzenden Infoblätter liefern vertiefende Hintergrundinformationen für interessierte Fachleute.

Üblicherweise definiert der Planer die Randbedingungen für die Anlage. Der Maschinen Hersteller entscheidet auf Grund dieser Randbedingungen und auf Grund der verfügbaren Verdichter welche Verdichterart am besten passt. Der Planer bzw. der Kunde schreibt die Verdichterart nur in Ausnahmefällen vor.

Die Studie und das Verdicher-Tool wird ab Herbst 2021 auf www.energieschweiz.ch publiziert.

Übersicht der Anforderungen gemäss SIA 382/1 (2014)

Zusammenfassend stellt Bild 10.10 die energetischen Anforderungen von SIA 382/1 (2014) an Klimakälteanlagen zusammen.

Bei den in der SIA 382/1 (2014) vorgegebenen Grenzwerten (EER, ESEER) ist die Hilfsenergie (Anteil der Pumpenstrom und der Strom für die Regulierung) mit eingerechnet. Wird die im Fachbuch beschriebene, vereinfachten Berechnung (Messung Klemmenleistung ohne Anteil Pumpenstrom) angewendet, muss mit 5 bis 10 % höheren Grenzwerten gerechnet werden.

$COP_{Kälte} / 1{,}1 = ERR_{«SIA»}$

Speichermanagement

Systeme mit Kältespeicher erlauben es, mithilfe des Speichermanagements die Kältemaschinen – abhängig von der Kälteleistung und Verflüssigungstemperatur – im energetisch optimalen Leistungsbereich arbeiten zu lassen. Die Zahl im Betrieb stehender Maschinen sowie deren Leistungen können durch das Speichermanage-

Energetische Anforderungen an Kälteerzeuger bei Standardbedingungen					
Kälteerzeugerleistung der Kältemaschine	≤ 12 kW	100 kW	300 kW	600 kW	≥ 1000 kW
Wassergekühlte Kältemaschinen					
Grenzwert EER (Volllast)	3,85	4,25	4,65	5,05	5,50
Grenzwert ESEER (Voll- und Teillast)	4,30	4,80	5,50	6,10	6,70
Eurovent-Klasse nach EN 14511, mindestens	D	C	B	A	A+
Wassergekühlte Kälteanlagen, inklusive Rückkühlung (Pumpen und Ventilatoren)					
Grenzwert EER⁺ bei Volllast	3,10	3,20	3,30	3,50	3,70
Grenzwert EER⁺ bei 50 % Last	4,40	4,70	5,30	5,80	6,00
Luftgekühlte Kältemaschinen					
Kälteerzeugerleistung der Kältemaschine	12 kW	100 kW	300 kW	600 kW	≥ 1000 kW
Grenzwert EER (Volllast)	2,90	3,10	3,20	3,40	3,50
Grenzwert ESEER (Voll- und Teillast)	3,80	4,00	4,20	4,40	4,60
Eurovent-Klasse nach EN 14511, mindestens	B	A	A+	A++	A++

Bild 10.10: Energetische Anforderungen an Klimakälteanlagen nach SIA 382/1 (2014).

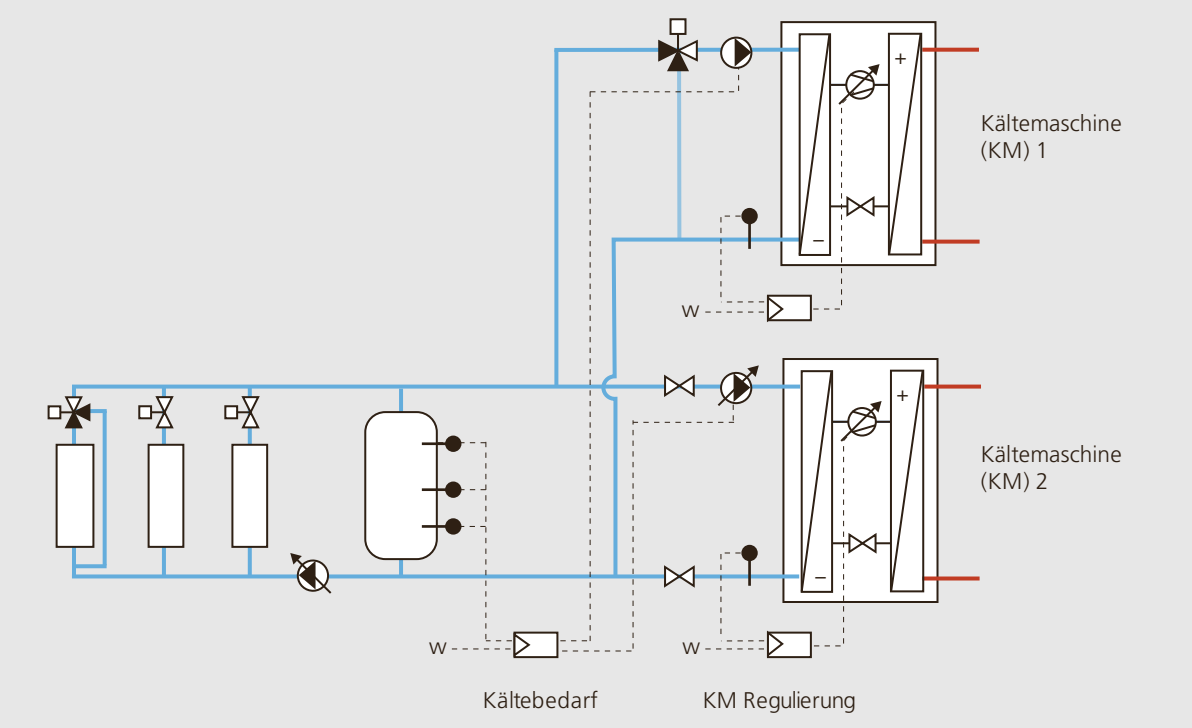


Bild 10.11: Zwei Kältemaschinen mit Kältespeicher.

ment je nach Ladezustand des Speichers und Ladetendenz vorgegeben werden. Die Lösung ist aus Bild 10.11 ersichtlich.

Bei mehreren Kältemaschinen können die einzelnen Einheiten über die Speicherladung zu- und abgeschaltet werden. Dies bedeutet, dass Kältemaschinen jeweils auf Volllast gefahren werden. Weil die Effizienz bei 100 % Leistung eher schlechter ist als bei Teillast, ist die Gesamtenergieeffizienz der Anlage schlechter.

Bei Kältemaschinen, die im Teillastbereich effizienter arbeiten als unter Volllast, ist es besser, die Speicherladung auf einem konstanten Wert (z. B. Speichermitte) zu halten und die Kältemaschinenleistung z. B. über den Verdampferdurchfluss vorzugeben. So arbeitet die Kältemaschine im effizienten Teillastbetrieb. Zudem hat dies den Vorteil, dass der Elektrizitätsverbrauch der Pumpen ebenfalls zurückgeht.

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Anzahl der An- und Abschaltungen zurückgeht. Abgesehen davon, dass eine zu grosse Anzahl von Anschaltungen die Lebensdauer der Kältemaschine beeinträchtigt, benötigt eine Kältemaschine aufgrund der thermischen Systemträgheit eine gewisse Anlaufzeit (abhängig von der Anlagengrösse – typischerweise grösser als 5 Minuten), bis der Betriebspunkt erreicht ist. Die Performance in dieser Zeit entspricht nicht der Volllastperformance.

Kombinierte Kälte- und Wärmenutzung

Für den Fall, dass die Kälte-Wärme-Maschine für Kühlen und Heizen genutzt werden kann, muss die Leistungszahl neu definiert werden. Die Nutzung (gleichzeitiges Kühlen und Heizen) setzt sich neu aus der Summe von $\dot{Q}_{Kälte}$ und $\dot{Q}_{Wärme}$ zusammen. Der Aufwand (Antriebsleistung des Verdichters) ist unverändert geblieben, woraus sich die Leistungszahl für Kälte-Wärme-Nutzung ($COP_{Kälte+Wärme}$) ergibt:

$$COP_{Kälte+Wärme} = \frac{\dot{Q}_{Kälte} + \dot{Q}_{Wärme}}{P_{el}}$$

$COP_{Kälte+Wärme}$	Leistungszahl für Kälte-Wärme-Nutzung
$\dot{Q}_{Kälte}$	nutzbare Kälteleistung in kW
$\dot{Q}_{Wärme}$	nutzbare Wärmeleistung in kW
P_{el}	elektrische Anschlussleistung (Klemmenleistung) in kW

Grundsätzlich können zur Wärmenutzung folgende Überlegungen gemacht werden:

- Kältemaschine fährt normal weiter, die Wärme kann genutzt werden (oder wird über den Rückkühler abgeführt), ohne dass die Verflüssigungstemperatur erhöht wird.
- Besteht ein Wärmebedarf auf einem höheren Temperaturniveau, arbeitet die Kältemaschine mit erhöhter Verflüssigungstemperatur. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung ist erforderlich.

Bild 10.12 analysiert den Nutzen einer Wärmenutzung für das Kältemittel R134a bei einer Verdampfungstemperatur von 0 °C. Mit einer Verflüssigungstemperatur von 20 °C kann die Wärme nicht genutzt werden – sie wird über den Rückkühler an die Atmosphäre abgegeben. Dieser Zustand gilt als Referenz mit Umgebungsbedingungen für die Übergangszeit und einem hohen Kältebedarf, wie z. B. bei Serverräumen. Durch eine höhere Leistung des Verdichters (höherer Stromverbrauch) können die Verflüssigung auf ein höheres Niveau gebracht und die Kondensationswärme genutzt werden. In Bild 10.12 ist die Grösse des Mehraufwandes ersichtlich.

Es muss darauf geachtet werden, dass bei einer Anhebung der Verflüssigungstemperatur die gesamte anfallende Wärme genutzt wird. Wenn nur ein Teil der zusätzlichen Wärme genutzt werden kann, dann steigen die Wärmenutzungskosten im Verhältnis zum effektiven Wärmebedarf. Können z. B. nur 50 % genutzt werden, wird die Wärmenutzungsenergie pro kWh das Doppelte kosten, bei 25 % kostet sie das Vierfache.
Vergleiche dazu auch ausführlich Kapitel 7, Wärmeabgabe.

Lesebeispiel: Eine Kältemaschine liefert 100 kW Kälte bei 0 °C (Verdampfungstemperatur) und kondensiert bei 20 °C. Nun kann ein Wärmeverbraucher bei 55 °C mit 144 kW bedient werden, wenn die Kältemaschine ihre Kondensation anhebt.
Dadurch sinkt der COP der Kältemaschine ($COP_{Kälte}$) von 6,8 auf 2,3. Die produzierte Wärme kostet dem Betreiber 3.23 Rp/kWh. Sie ist somit deutlich günstiger als eine Wärmelieferung durch einen Ölkessel (9.1 Rp/kWh).

Wärmenutzung durch Hochhaltung der Kondensationstemperatur										
Verdampfungstemperatur	T_O	[°C]	0	0	0	0	0	0	0	0
Kondensationstemperatur	T_C	[°C]	20	25	30	35	40	45	50	55
Kältemittel			R134a	R134a	R134a	R134a	R134a	R134a	R134a	R134a
$COP_{Kälte}$		[–]	6,7	5,6	4,8	3,8	3,3	2,9	2,6	2,3
Kälteleistung	$\dot{Q}_{Kälte}$	[kW]	100	100	100	100	100	100	100	100
Leistungsaufnahme	P_{el}	[kW]	15	18	21	27	30	34	39	44
Kondensationsleistung	$\dot{Q}_{Wärme}$	[kW]	115	118	121	127	130	134	139	144
Strompreis		[CHF/kWh]	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Ausgangslage ist eine Kondensation von 20 °C Wieviel Input und wieviel Kondensationsenergie erhalten wir, wenn von 20 °C auf 25 °C …bis...55 °C angeboben wird?										
Leistungsaufnahmedifferenz		[kW]		2,9	6,0	12,0	15,6	19,6	23,9	29,0
Kondensationsleistung		[kW]		118	121	127	130	134	139	144
Wärmenutzungs-Preis		[Rp/kWh]		0.40	0.80	1.52	1.92	2.33	2.76	3.23
Energiekosten Öl (90 CHF/100 l)		[Rp/kWh]		9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1

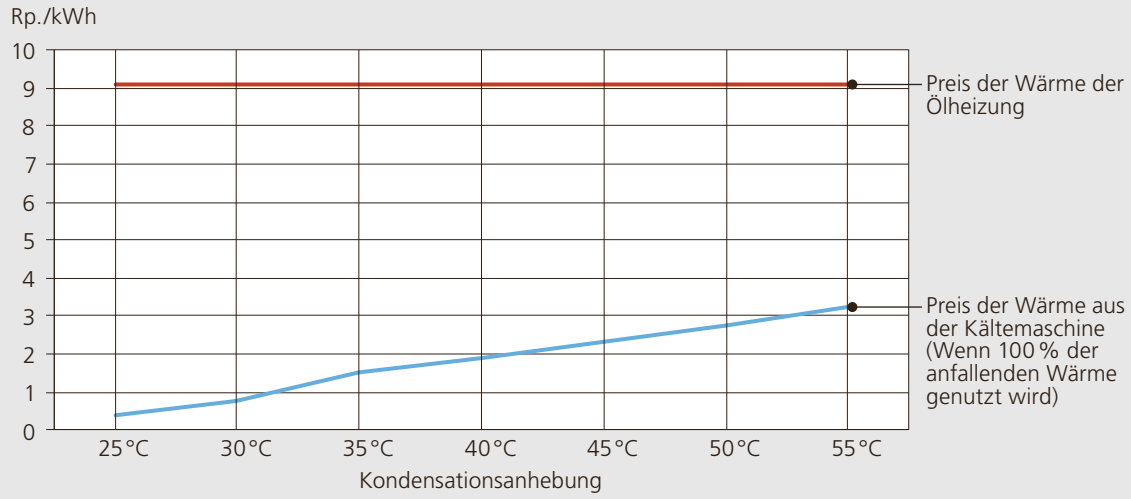
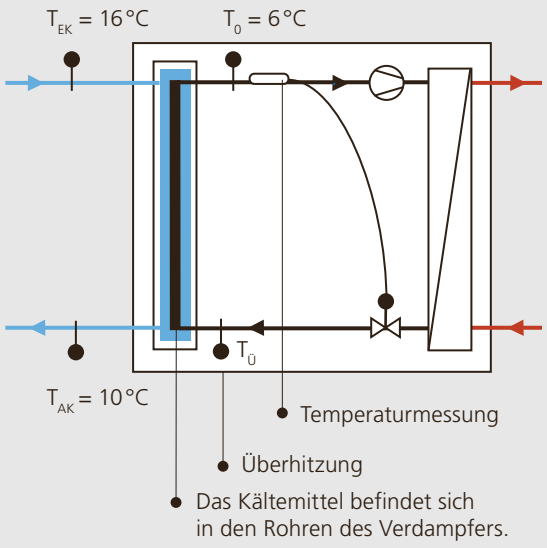
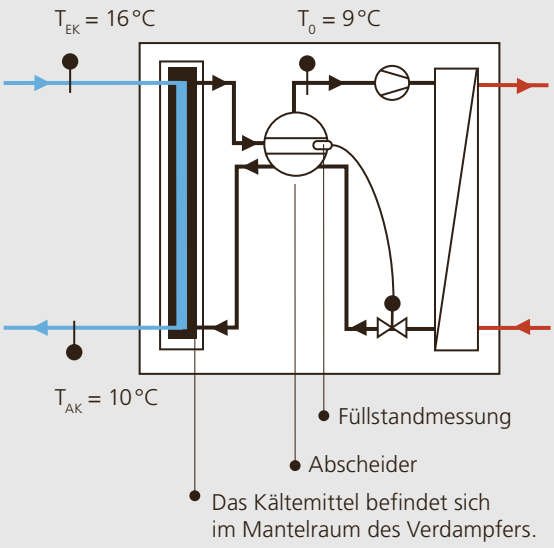


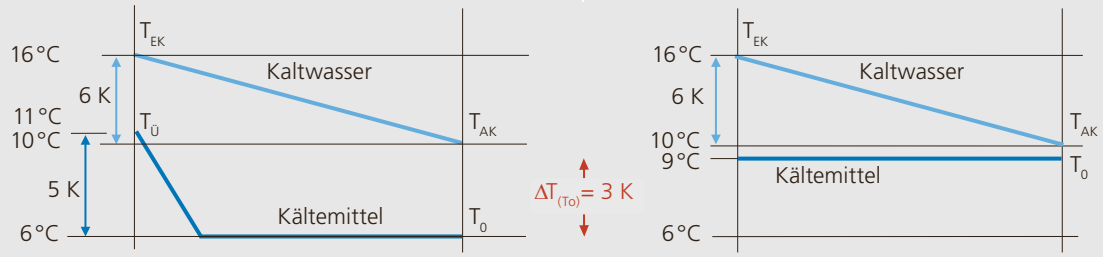
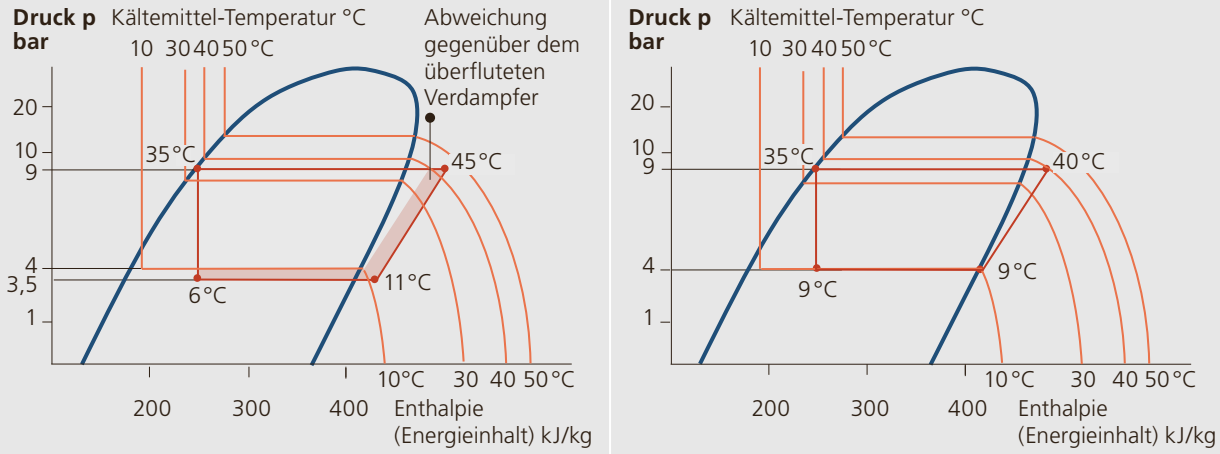
Bild 10.12: Energiekosten bei Anhebung der Verflüssigungstemperatur einer Kältemaschine. (Quelle: Leplan AG)

Energieeffizienzeinfluss von Trockenexpansion und überflutetem Verdampfer

Die Art des Verdampfers beeinflusst die Effizienz einer Kältemaschine deutlich. Der Vergleich einer Maschine mit Trockenexpansions-Verdampfer mit einer Maschine mit überflutetem Verdampfer soll dies verdeutlichen.

Beide Maschinen sollen Kaltwasser mit 10 °C zur Verfügung stellen, beide sollen mit R134a betrieben werden und bei 35 °C verflüssigen.

Prinzip	Trockenexpansion	Überfluteter Verdampfer
Beschreibung	Bei Verdampfer mit Trockenexpansion wird die Kältemittelmenge mit einem Expansionsventil so reguliert, dass das Kältemittel am Austritt vollständig verdampft und überhitzt ist. Das Kältemittel befindet sich in den Rohren des Verdampfers. Dadurch benötigt das System eine kleine Kältemittelmenge.	Der Verdichter saugt das vollständig verdampfte Gas aus dem oberen Bereich des Abscheiders ab. Anhand des Füllstandes im Abscheider reguliert das Expansionsventil das Niveau im Abscheider und stellt so sicher, dass nur vollständig verdampftes Kältemittel angesaugt wird. Da der Verdampfer mit Kältemittel überflutet ist, benötigt das System bei Rohrbündel-Verdampfer eine relativ grosse Kältemittelmenge. Bei Systemen mit Kassettenverdampfer ist die Kältemittelmenge nicht wesentlich grösser als beim Trockenexpansions-Verdampfer.
Übersicht		

Prinzip	Trockenexpansion	Überfluteter Verdampfer
System-temperaturen		
	Benötigt man 10 °C kaltes Wasser muss mit einem Trockenexpansions-Verdampfer mit einer Verdampfungstemperatur von 6 °C gearbeitet werden.	Benötigt man 10 °C kaltes Wasser kann in Kältemaschinen mit einem überfluteten Verdampfer – ohne Überhitzung – mit einer Verdampfungstemperatur von 9 °C gearbeitet werden.
	Mit einem überfluteten Verdampfer kann das System mit einer 3 K höheren Verdampfungstemperatur T_0 arbeiten und ist dementsprechend effizienter (Faustregel: 1 K höhere Verdampfungstemperatur führt zu einem rund 3 % tieferen Energieverbrauch). Dies lässt sich über den kältemittelseitigen Temperaturverlauf in den beiden Verdampfertypen erklären.	
Betrachtung log p,h-Diagramm		
	Aufgrund der notwendigen Überhitzung verschieben sich die Arbeitspunkte im log p,h-Diagramm.	
	Bemerkung: Dies ist eine vereinfachte Darstellung des log p,h-Diagramms. In der Praxis muss mit einer minimalen Unterkühlung gearbeitet werden, damit die Expansionseinrichtung richtig funktioniert und keine Kältemittelblasen vor dem Expansionsventil entstehen (siehe Kapitel 3).	
Performance	$COP_{Kälte}$ = 7,0 (gerechnet) (Energieverbrauch: 100 %)	$COP_{Kälte}$ = 8,0 (gerechnet) (Energieverbrauch: 87,5 %) Faustregel: 3 K mal 3 % = ca. 9 % tieferen Energieverbrauch
	Im Gesamtkontext zeigt dieses Beispiel: Überflutete Verdampfer sind verglichen mit den Trockenexpansions-Verdampfer deutlich effizienter. Gleichung 10-1 hilft, die Einsparung an elektrischer Energie zu berechnen. Jedoch nicht in jedem Fall kann ein überfluteter Verdampfer eingesetzt werden. Denn die notwendige Kältemittelmenge (ChemRRV) und die Kosten sind weitere Aspekte, die zu berücksichtigen sind.	

10 Merkpunkte zur Energieeffizienz von Klimakälteanlagen

1. Die Kälteanlage läuft nur, wenn die Kälteverbraucher oder der Kältespeicher Kälte benötigen.
2. Vorlauftemperatur der Kälte so hoch wie möglich definieren. Überprüfen, ob es die kälteste Kühlstelle rechtfertigt, die Vorlauftemperatur der Kälteverbraucher vorzugeben oder ob diese besser separat gelöst wird.
   Faustregel: 1 K höhere Kaltwassertemperatur reduziert den Energieverbrauch um ca. 3 %.
3. Die Verflüssigung bei möglichst tiefer Temperatur auslegen. Wenn die Verflüssigungstemperatur für eine Wärmenutzung angehoben wird, die Anhebung nur so lange vornehmen, wie Wärme benötigt wird.
   Faustregel: 1 K tiefere Kondensationstemperatur reduziert den Energieverbrauch um ca. 2,5 %.
4. Anfallende Wärme der Kältemaschine nutzen: für Trinkwasser-Erwärmung, für Heizung oder für Regenerierung der Erdsonden.
5. Einsatz von elektronischen Expansionsventilen prüfen.
6. Einsatz von effizienten und drehzahlgeregelten Verdichtern prüfen.
7. Druckverluste in Rückkühlnetz und Kühlstellennetz reduzieren.
8. Drehzahlgeregelte und effiziente Pumpen einsetzen.
9. Gesamtbetrachtung der Anlage für Voll- und Teillast durchführen.
10. Die Energieeffizienz bei der Inbetriebnahme der Kälteanlage und anschliessend mindestens einmal pro Jahr kontrollieren.

Kapitel 11

Anhang

11.1 Autoren

Arnold Brunner, dipl. Ing. FH/SIA, Professor für Gebäudetechnik
1978: Diplom Sanitärtechnikerschule Bern. Auslandsaufenthalte in Saudi Arabien und England. 1984: Diplom an der Hochschule Luzern T + A; 1984 bis 1987: Projektleiter Meierhans + Partner AG, Fällanden. 1988 bis 2011: Gründer und Geschäftsführer Brunner Haustechnik AG (BHT) in Wallisellen mit 27 Mitarbeitenden. 2010: Verkauf BHT an die Hälg-Gruppe (heute Vadea AG). 2011 bis heute: Senior Consultant bei Vadea (40 %). 2012 bis 2017: hauptamtlicher Dozent für Gebäudetechnik an der Hochschule Luzern, Abteilung Technik & Architektur. 2017 bis 2018: Lehrbeauftragter an der HSLU. Aktiv im nationalen und internationalen Normenschaffen (SIA, SWKI, VDI, CEN, ISO).

Michael Kriegers, Dipl. Ing. FH HLK
1994: Projektleiter HLK bei Meierhans + Partner AG, Schwerzenbach. 1999: NDS Bau Energie und Umwelt FH, 2006: NDS Wirtschaftsingenieur FH. 1999 bis 2005: nebenamtlicher Berufsschullehrer für Haustechnikplaner an der Baugewerblichen Berufsschule Zürich (BBZ). 2000 bis heute: Nebenamtlicher Lehrer NDS Energie und Diplomexperte an der Höheren Fachschule der BBZ. Zudem seit 2006 bis heute: nebenamtlicher Lehrer an der Höheren Fachschule der BBZ. 2007 bis 2017: Mitarbeit im SWKI-Vorstand und Delegierter für die Richtlinien. 2008 bis heute: Als Partner bei Meierhans + Partner AG verantwortlich für die Leitung komplexer Gebäudetechnik-Projekte und Mitglied der Geschäftsleitung.

Vladimir Prochaska, dipl. Ing. TU
1971 bis 1981: Sulzer AG, Planung und Ausführung von Klima- und Lüftungsanlagen. 1981 bis 1987 Sulzer Friotherm: Projektierung, Verkauf und Ausführung von Wärmepumpen und Kälteanlagen bis 30 MW Kälteleistung. 1987 bis 1997: Sulzer Infra, Leiter Fachstelle für Mess-, Regelung- Gebäudeleittechnik, später in der Technik. 1997 bis 2007: Friotherm AG, Leiter Verkauf Schweiz, Kälte- und Wärmepumpen-Anlagen. 1997 bis 2016: Beratung und Schulung im Kältebereich (ab 2007 selbstständiger Kälteexperte). 1990 bis 2016: zuerst Diplomexperte an der HSLU, dann Lehrbeauftragter für Kälte- und WP-Technik. Aktiv im nationalen und internationalen Normschaffen (SIA, SWKI, CEN).

Frank Tillenkamp, Dr.-Ing., Professor für Energiesysteme
1994 Diplom im allgemeinen Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt. 2000 Promotion im Bereich der Zweiphasenströmungen. 1999 bis 2002: Entwicklungsingenieur bei Sulzer Innotec. 2002 bis 2009: verschiedene Aufgaben bei Axima, u. a. als Leiter des Technologiezentrums Axima Lab und Niederlassungsleiter. 2009 bis heute hauptamtlicher Dozent an der ZHAW School of Engineering in Winterthur. 2010 Aufbau und Leitung des Instituts für Energiesysteme und Fluid-Engineering. Aufbau der Kälteaktivitäten und des Kälteprüfstands am Institut. Mitarbeit in SIA, SVK und brenet (Building and Renewable Energies Network of Technology).

11.2 Dokumentation

SIA-Normen

- **SIA 180** Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden (2014)
- **SIA 380/1** Heizwärmebedarf (2016)
- **SIA 382/1** Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (2014)
- **SIA 382/2** Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf (2011)
- **SIA 384/6** Erdwärmesonden (2010)
- **SIA 384/7** Grundwasserwärmenutzung (2015)

SWKI-Richtlinien

- Rückkühlung, 2003-3
- Wasser-Wärmespeicher, 2002-1
- Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen, BT102-01

SIA-Merkblätter

- Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz, Nr. 2021
- Klimadaten für Bauphysik, Energie und Gebäudetechnik, Nr. 2028
- Klimatisierte Gebäude – Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf, Nr. 2044
- Integrale Tests von Gebäudetechniksystemen, Nr. 2046

Schweizer Norm (SN) und Europäische Norm (EN)

- Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen für Kälteanlagen und Wärmepumpen, SN EN 378-1 bis 378-3, und Teil Wartung der Norm SN EN 378-4
- Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement, (EN) 15232
- Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung- und kühlung, SN EN 14511

Kältemittel

- Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV), SR 814.81, Anhang 2.10
- Anlagen mit Kältemitteln: vom Konzept bis zum Inverkehrbringen, Vollzugshilfe Kältemittel, BAFU
- Ausnahmebewilligung durch das BAFU. «Gesuchsformular für eine Ausnahmebewilligung von Kälteanlagen», www.bafu.admin.ch
- Richtlinie zu Lagerung und Umgang mit Ammoniak, Richtlinie Flüssiggas Nr. 6517 (EKAS)
- Kälteanlagen und Wärmepumpen sicher betreiben, SUVA-Merkblatt 66139
- Kältemittel-Fibel für Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Fachleute, EnergieSchweiz

Energie und Sicherheit

- Kälte effizient erzeugen: Das Wichtigste zur Kälteerzeugung nach SIA 382/1 (2014), EnergieSchweiz
- Energiegesetz – Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich, (MuKEn)
- Verordnung über die Sicherheit von Druckgeräten (Druckgeräteverordnung), SR 819.121
- Kälte-Tool von EnergieSchweiz: Energiebedarf, TEWI und Wirtschaftlichkeit von Kälteanlagen abschätzen

11.3 Vertiefung 1: Strömungs-Verdichter

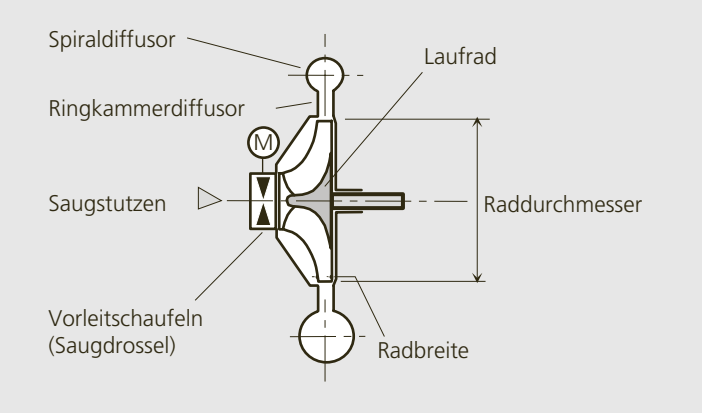
Der Turbo-Verdichter ist eine Strömungsmaschine. Im **Verdichterrad** wird das zu verdichtende Gas auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt und die so gewonnene kinetische Energie in einem Diffusor in statischen Druck verwandelt. Das Verhalten des Turbo-Verdichters kann mit dem Verhalten einer Pumpe verglichen werden. Der Turbo-Verdichter hat im Vergleich zum volumetrischen Verdichter ganz andere Eigenschaften.

Der Laufraddurchmesser und die Drehzahl beeinflussen die Druckdifferenz, welche der Verdichter erzeugt. Die Radbreite ist bestimmend für den Durchsatz, d. h. für die Kälteleistung des Verdichters.

Eine bedeutende Innovation in den letzten Jahren im Klimabereich stellt der halbhermetische Turbo-Verdichter mit integriertem Frequenzumformer und mit Magnetlager dar. Dieser Verdichter zeichnet sich durch hohe Energieeffizienz aus. Bei richtiger Auslegung können bei Teillast und bei abgesenkten Rückkühlmedium-Temperaturen Leistungszahlen von über 10 erreicht werden.

Bild 11.1 (oben): Prinzip eines Turbo-Verdichters.

Bild 11.2 (unten): Halbhermetischer Turbo-Verdichter. (Bild: Danfoss)



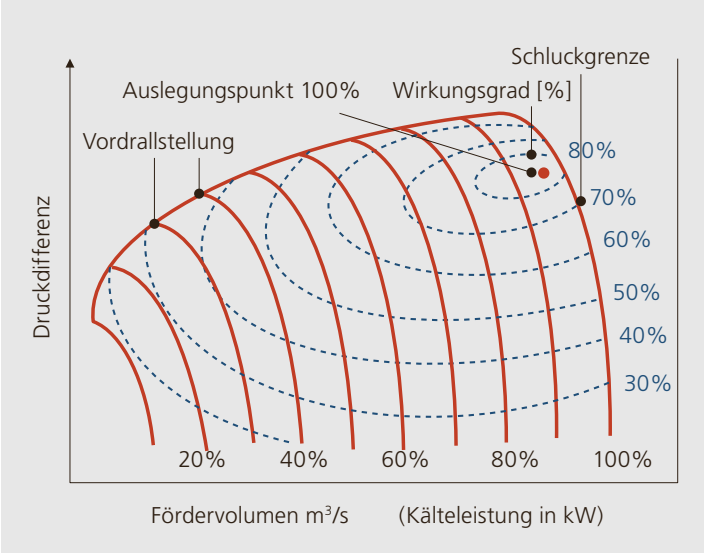
Charakteristik des Turbo-Verdichters mit fester Drehzahl

Der Turbo-Verdichter wird für eine bestimmte Druckdifferenz ausgelegt. Bild 11.3 zeigt eine typische Charakteristik: Mit zunehmender Leistung (Saugvolumen) steigt die erreichbare Druckdifferenz bis zum Maximum. Nach diesem Punkt verläuft die Charakteristik steil nach unten (Schluckgrenze).

Die so genannten «Muschelkurven» zeigen den Verlauf des Wirkungsgrades. Bei Anlagen mit konstanter Drehzahl, bei Volllast, steigt die Kälteleistung des Verdichters mit abnehmender Anlage-Druckdifferenz ($T_C - T_0$). Im Auslegungspunkt erreicht der Turbo-Verdichter in der Regel den höchsten Wirkungsgrad.

Mit der Reduktion der Leistung durch die Saugdrosselregulierung (Vordrallstellung) nimmt die maximal erreichbare Druckdifferenz ab. Bei starker Drosselung und zunehmend geschlossenen Vordrallschaufeln geht der Wirkungsgrad des Verdichters stark zurück.

Bild 11.3: Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit konstanter Drehzahl.



Das Verhalten eines Turbo-Verdichters

Der obere Teil der Charakteristik des Turbo-Verdichters entspricht dem höchsten Druck, den der Verdichter erzeugen kann. Wird von der Anlage her eine höhere Druckdifferenz verlangt (z. B. zu hohe Verflüssigungstemperatur), liegt der Betriebspunkt oberhalb der Charakteristik. In diesem Bereich kommt es im Laufrad zum Abriss der Strömung, der Verdichter beginnt zu «pumpen». Dabei handelt es sich um einen instabilen Betrieb, der aus folgenden Gründen unbedingt zu verhindern ist:

- Zu hohe Beanspruchung des Verdichters (kann zu seiner Beschädigung führen)
- Schlechter Wirkungsgrad
- Abfallende Kälteleistung

Ein Merkmal für den Betrieb nahe an der Pumpgrenze ist eine schwankende Leistungsaufnahme des Verdichters. Um einen sicheren Betrieb des Verdichters zu gewährleisten, muss der Betriebspunkt unterhalb der Charakteristik liegen. Dieser Sicherheitsabstand wird als Pumpgrenze definiert.

Anlagenkennlinie

Bei einer Kälteanlage fällt die Anlagenkennlinie mit der abnehmenden Kälteleistung ab, weil die Verflüssigungstemperatur bei kleinerer Leistung entsprechend reduziert wird.

Bei einer Wärmepumpe oder einer Kältemaschine mit Wärmenutzung verläuft die Anlagenkennlinie annähernd waagrecht. Dadurch wird der Regelbereich entsprechend eingeschränkt. Um den Regelbereich des Verdichters zu vergrössern, muss im Auslegungspunkt der Abstand zur Pumpgrenze grösser gewählt werden. Dies führt zu einer Reduktion des Wirkungsgrades.

Bild 11.4: Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit Darstellung der Pumpgrenze.

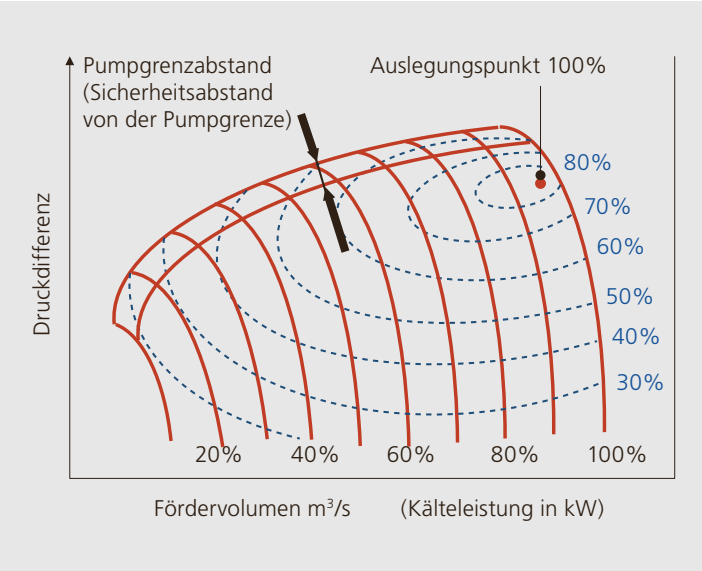
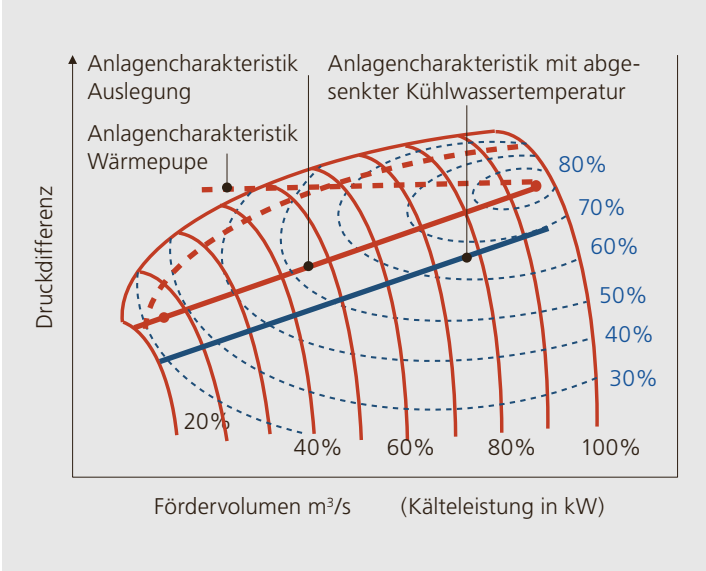


Bild 11.5: Anlagen- und Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit eingetragenen Anlagecharakteristiken.



Charakteristik des Turbo-Verdichters mit variabler Drehzahl

Das Bild 11.6 zeigt die Charakteristik für einen Verdichter mit Drehzahlregulierung. In der Teillast und bei reduzierter Leistung geht die Druckdifferenz ($T_C - T_0$) ebenfalls zurück. Mit der Drehzahlreduktion des Verdichters verschiebt sich der Betriebspunkt nach unten und nach links. In diesem Fall werden die Wirkungsgradkurven ebenfalls verschoben. Im neuen Betriebspunkt arbeitet der Verdichter immer noch mit einem hohen Wirkungsgrad. Dadurch wird die Effizienz der Kälteanlage in der Teillast, in der Zeit mit der höchsten Betriebsstundenzahl, wesentlich verbessert.
Eine weitere Erhöhung der Energieeffizienz kann mit der Reduktion der Kühlwassertemperatur erreicht werden. In diesem Fall sind Leistungszahlen über 10 möglich. Es ist allerdings zu beachten, dass in der Teillast, bei reduzierter Drehzahl, die Schluckgrenze des Verdichters nach links verschoben wird. Demzufolge kann in diesem Betriebspunkt die Auslegungsleistung nicht erreicht werden.

Bild 11.6: Anlagen- und Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit Drehzahlregulierung.

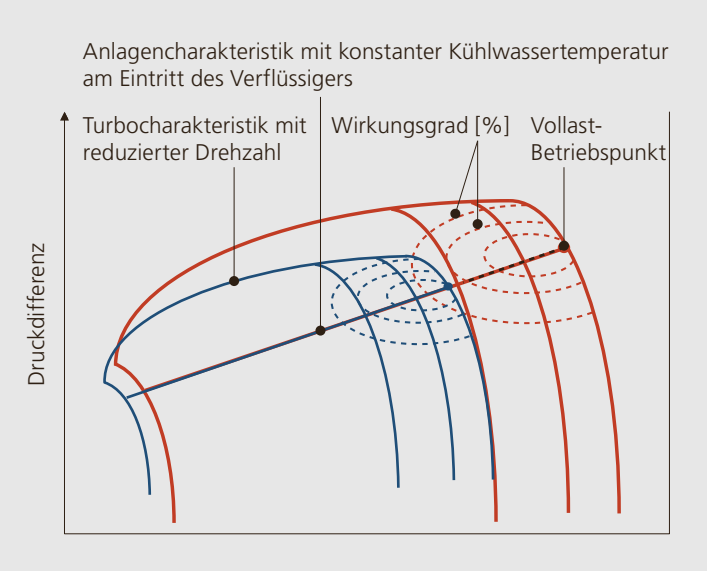
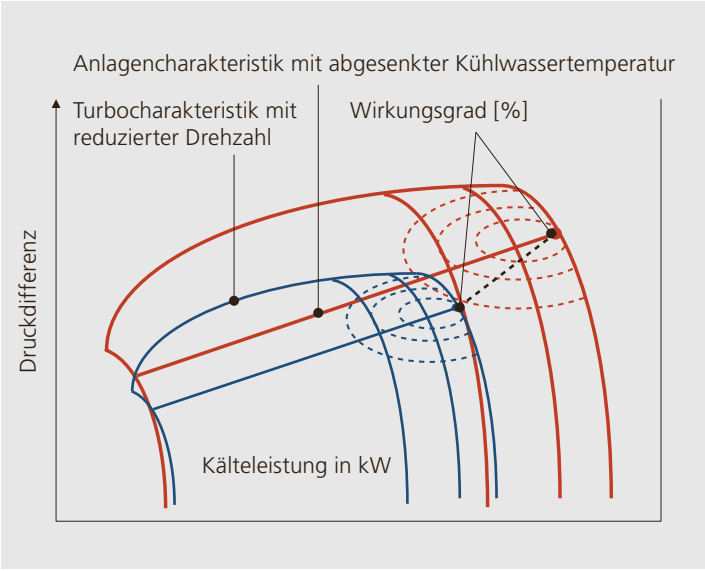


Bild 11.7: Anlagen- und Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit Drehzahlregulierung mit abgesenkten Rückkühlmedium-Temperaturen.



11.4 Vertiefung 2: Pumpenauslegung und Pumpencharakteristik

Die Pumpe liefert die hydraulische Energie. Die Förderleistung steht in direktem Zusammenhang mit der Drehzahl und der Charakteristik der Pumpe.
Bei konstanter Drehzahl bleiben die Grundwerte der Pumpe entsprechend der Kennlinie erhalten. Bei variabler Drehzahl ändert sich der Betriebspunkt in Abhängigkeit der Drehzahl und der Anlagenkennlinie.

Leistungsbedarf der Pumpe

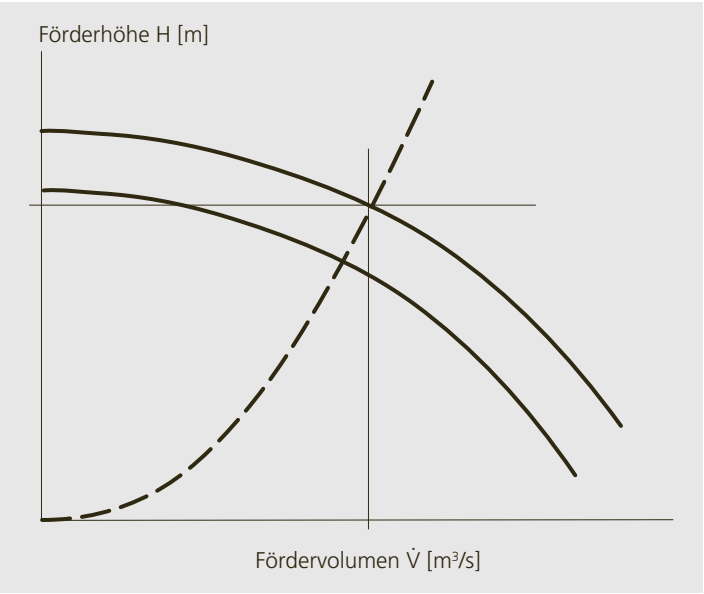
$$P = \frac{\dot{V} \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} \quad [W]$$

$\dot{V}$	m^3/s
H	m
ρ	kg/m^3 (Wasser 1000)
g	9,81 m/s^2

Für Wasser gilt:

$$P = \frac{9810 \cdot \dot{V} \cdot H}{\eta} \quad [W]$$

Bild 11.8: Pumpencharakteristik mit Anlagenkennlinie.



Die maximale Leistung einer Kälte-Wärme-Maschine wird normalerweise nur in wenigen Tagen im Jahr benötigt. Dies bedeutet, dass bei Anlagen, die mit konstanten Volumenströmen arbeiten, in der meisten Zeit unnötig viel Förderenergie für den Antrieb der Pumpen benötigt wird. Um die Energieeffizienz der Anlagen zu erhöhen, ist deshalb die Anwendung von variablen Volumenströmen sinnvoll. Hier liegt das bedeutende Potenzial für die Energieeffizienzsteigerung. Wieviel Pumpenantriebsenergie damit gespart wird, kann mit Hilfe der Proportionalitätsgesetze berechnet werden.

Proportionalitätsgesetze

Für die Pumpe gelten folgende drei Gesetze:

- Der Förderstrom ist proportional zur Drehzahl

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

- Die Förderhöhe ist proportional zum Quadrat der Drehzahl

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

- Die Leistungsaufnahme ist proportional zur dritten Potenz der Drehzahl

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \qquad P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

Der maximale Volumenstrom wird nur an einigen Tagen im Jahr benötigt. Bereits bei der Reduktion des Volumenstroms auf 70 %, ohne Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Pumpe und des Antriebs, geht der Leistungsbedarf der Pumpe auf 34 % der Nennleistung zurück.

Schlussfolgerung

Berücksichtigt man die Verluste des Frequenzumformers und die Verschlechterung der Wirkungsgrade, wird der Energiebedarf für den Antrieb der Pumpe mehr als halbiert! Da der Volumenstrom in den meisten Klimakälteanlagen unter 70 % der Nennleistung liegt, ist eine entsprechende Reduktion unbedingt zu prüfen.

Berechnungsbeispiel

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Einsparungen bei Energieverbrauch und Kosten durch die Reduktion des Volumenstroms im Teillastbetrieb ohne Berücksichtigung der Änderung des Wirkungsgrads der Pumpe und des Elektromotors.

Grunddaten:

- Wasservolumenstrom $\dot{V}$ 40 m³/h
  0,011 m³/s
- Förderhöhe Δp_t 8,6 mWS
- Betriebsstunden 4000 h/Jahr
- Kosten Strom 0.2 Fr./kWh
- Betriebsdauer 15 Jahre
- Pumpenwirkungsgrad 74 %

Leistungsbedarf der Pumpe an den Klemmen bei 100 %:

$$P = \frac{9810 \cdot 0{,}011 \cdot 8{,}6}{0{,}74} = 1254\ \text{W} = 1{,}25\ \text{kW}$$

Theoretischer Leistungsbedarf bei 70 % des Volumenstroms

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^3 \qquad P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

$$P_2 = 1254 \cdot \left(\frac{70}{100}\right)^3 = 430\ \text{W} = 0{,}43\ \text{kW}$$

Theoretische Einsparung beim Elektrizitätsbedarf:

- Betriebsstunden 4000 h/Jahr
- Betriebsdauer 15 Jahre
- Gesamtbetriebsstunden 60 000 h
- Leistung 100 % 1,25 kWh
- Leistung 70 % 0,43 kWh

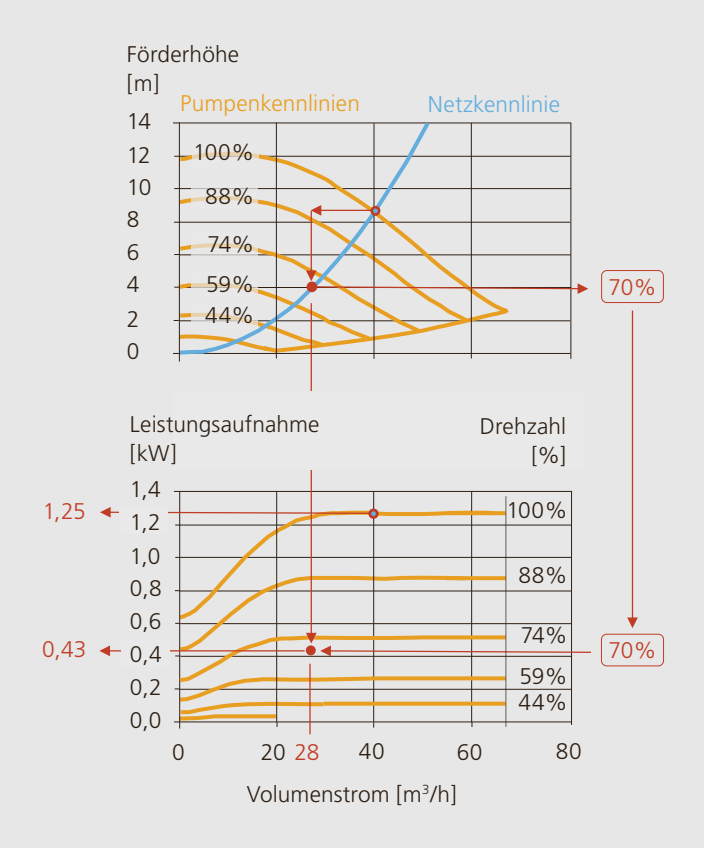
Einsparung = (1,25 kW – 0,43 kW) · 60 000 h = 49 200 kWh

Kosteneinsparung während der gesamten Betriebsdauer für eine Pumpe:

Einsparung = 49 200 kWh · 0,2 Fr./kWh
= 9840 Fr.

Die effektive Einsparung liegt infolge der Frequenzumformer- und Wirkungsgradverluste der Pumpe und des Elektromotors 15 – 20 % tiefer.

Bild 11.9: Pumpencharakteristik mit Betriebspunkt bei 70 % Volumenstrom.



11.5 Vertiefung 3: Gesamtsystem

Betriebszustände im Sommer, Herbst, Winter und Frühjahr
Im Kapitel Hydraulik wurde im Bild 8.27 ein Beispiel einer Anlage mit Kälte- und Wärmenutzung beschrieben. Das Beispiel beschreibt ein System, wie es eher bei grösseren Anlagen (ab 100 kW Kälte- und Wärmenutzung) anzutreffen ist. Für kleinere Anlagen (z. B. Anlage ohne Erdsondenfeld) entfallen die entsprechenden Elemente und Leitungen.

Auf den folgenden Seiten wird beschrieben, wie die Anlage in den vier Jahreszeiten (Sommer, Herbst, Winter und Frühjahr) arbeitet. In den Bildern 11-11 bis 11-14 sind die Systeme, Elemente oder Kreise, welche nicht im Betrieb sind halbtransparent dargestellt.

A: So arbeitet die Gesamtanlage im Sommer

Wärmenutzung der Kälte-Wärme-Maschine

1. Priorität:	für Trinkwasser-Erwärmung
2. Priorität:	für die Regeneration der Erdsonde
3. Priorität:	Abführen der Wärme über den Rückkühler

Erdsonde
Wärme mit hohem Temperaturniveau einlagern

Heizung und Trinkwarmwasser

Trinkwarmwasser:	Wird mit der Wärme der Kälte-Wärme-Maschine und der Wärmepumpe erwärmt
Heizung:	Kein Wärmebedarf. Öl- oder Gasheizkessel ist ausgeschaltet.

Kaltwasserseite Kälte-Wärme-Maschine

Maschine A:	Kaltwassertemperatur 16 °C
Maschine B:	Kaltwassertemperatur 10 °C

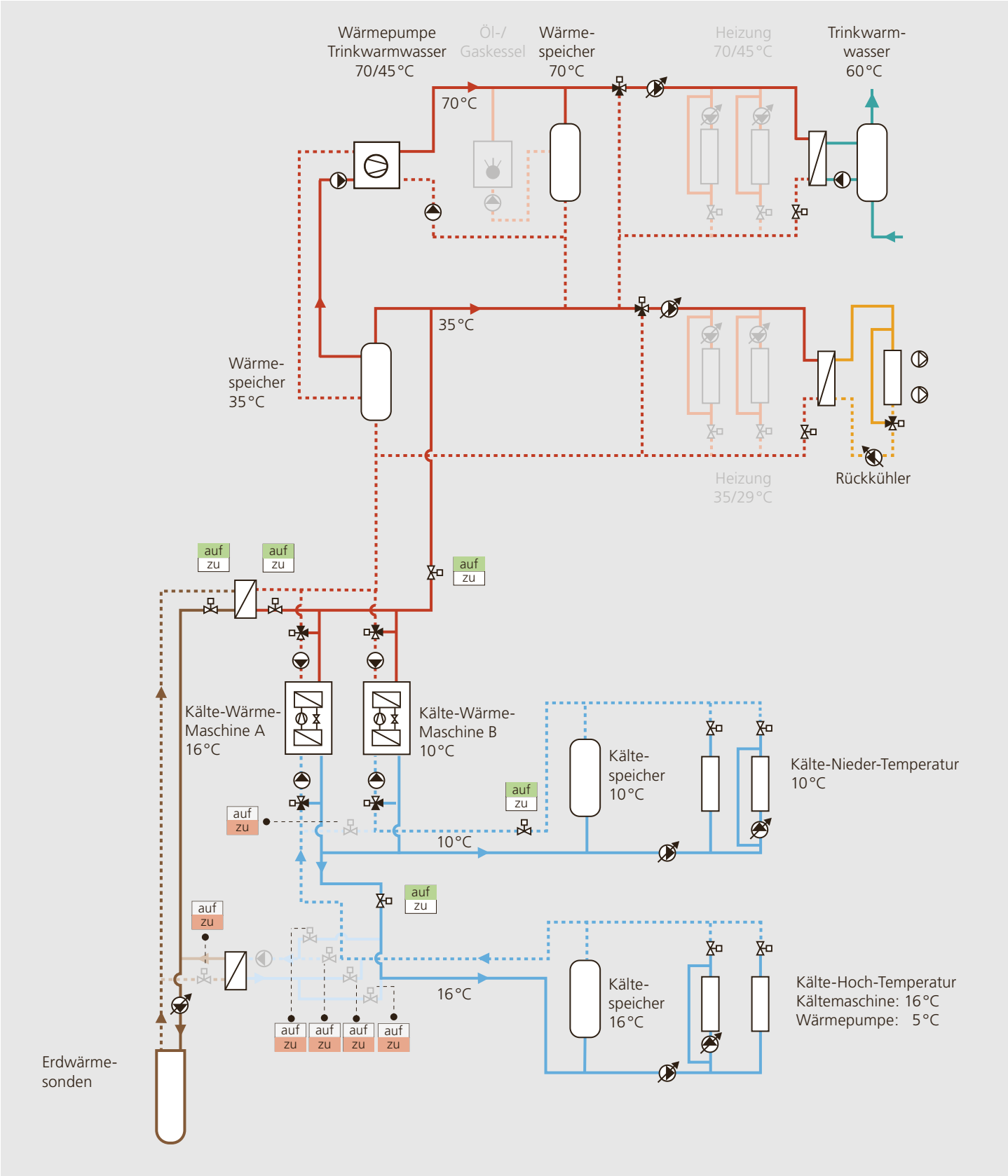


Bild 11.10:
Sommer-Betrieb.

B: So arbeitet die Gesamtanlage im Herbst

Wärmenutzung der Kälte-Wärme-Maschine

1. Priorität:	Für die Heizung 35 °C
2. Priorität:	Über Wärmepumpe für die Heizung 70 °C sowie die Trinkwasser-Erwärmung
3. Priorität:	Regeneration der Erdsonde Das Ziel ist, keine Wärme über den Rückkühler abzuführen.

Erdsonde

Wärme auf einem hohen Temperatur-Niveau einlagern.

Heizung und Trinkwarmwasser

1. Priorität:	Nutzung der Wärme der Kälte-Wärme-Maschine A: direkt durch das 35-°C-Heizsystem B: über die Wärmepumpe im 70-°C-Heizsystem
2. Priorität:	Möglichst auf den Öl- oder Gasheizkessel verzichten (ausschalten)

Kaltwasserseite Kälte-Wärme-Maschine

Maschine A:	Kaltwassertemperatur 16 °C
Maschine B:	Kaltwassertemperatur 10 °C

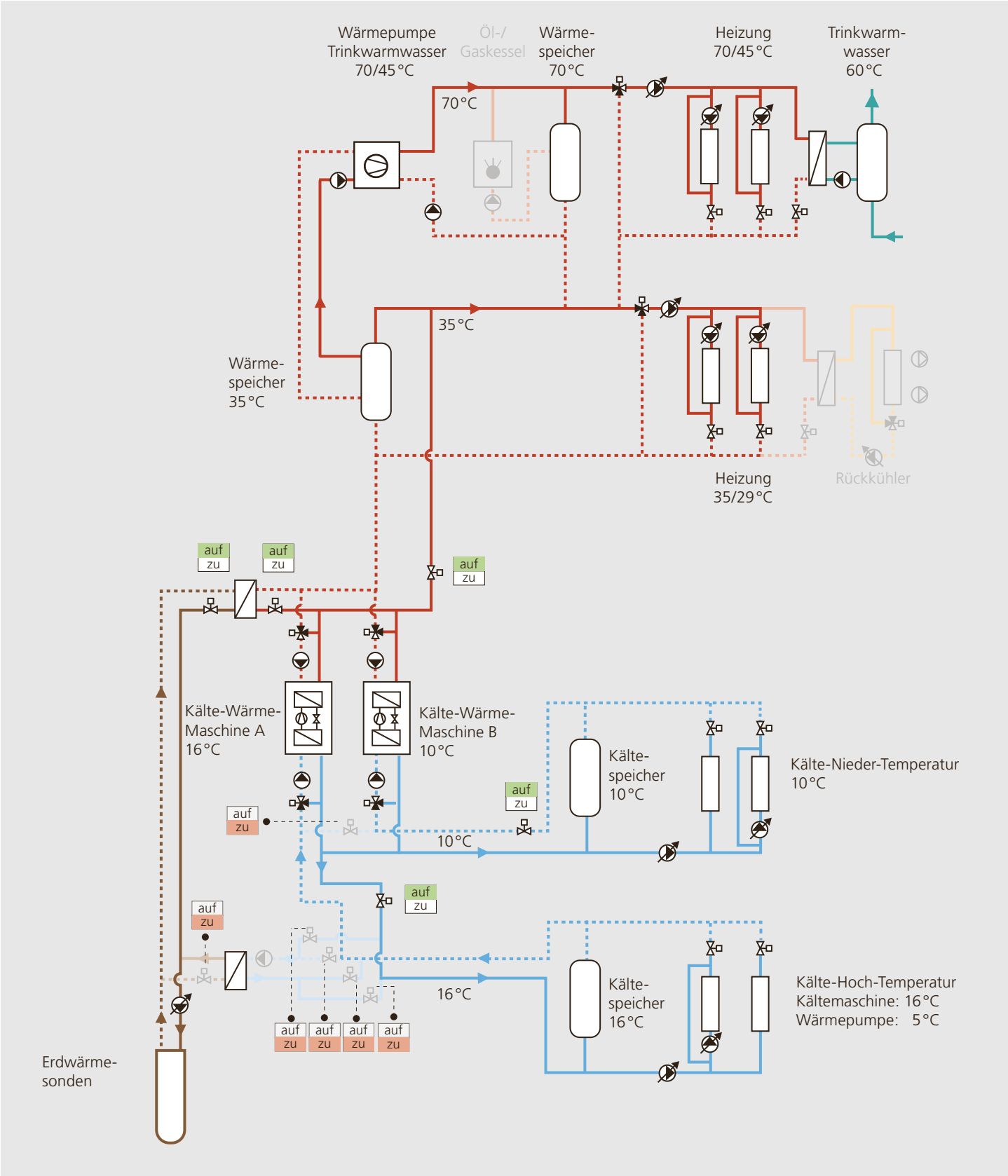


Bild 11.11:
Herbst-Betrieb.

C: So arbeitet die Gesamtanlage im Winter

Wärmenutzung der Kälte-Wärme-Maschine

1. Priorität:	Für die Heizung 35 °C
2. Priorität:	Für die Wärmepumpe für die Heizung 70 °C sowie Trinkwasser-Erwärmung
3. Priorität:	Für die Regeneration der Erdsonde Das Ziel ist, keine Wärme über den Rückkühler abzuführen.

Erdsonde

Wärmeentzug für die Kältemaschine A.

Heizung und Trinkwarmwasser

1. Priorität:	Wärme der Kälte-Wärme-Maschine 35 °C
2. Priorität:	Wärme der KWM über die WP für 70 °C
3. Priorität:	Öl- oder Gasheizkessel

Kaltwasserseite Kälte-Wärme-Maschine

Maschine A:	Als Wärmepumpe mit einer Kaltwassertemperatur von 5 °C betreiben. Die Erdsonde und die Kälteverbraucher dienen als Wärmequelle.
Maschine B:	Kaltwassertemperatur 10 °C

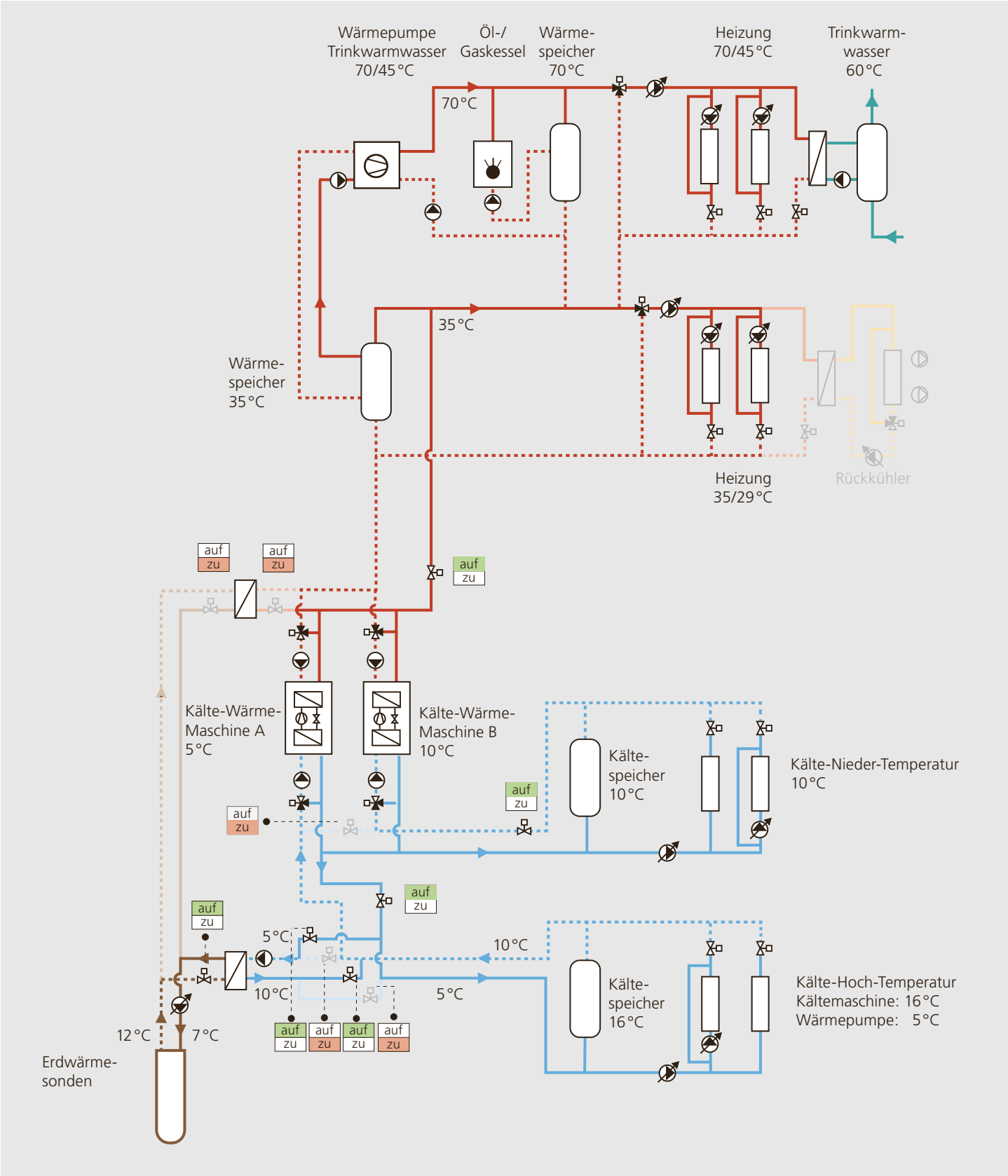


Bild 11.12:
Winter-Betrieb.

D: So arbeitet die Gesamtanlage im Frühling

Wärmenutzung der Kälte-Wärme-Maschine

1. Priorität:	Für die Heizung 35 °C
2. Priorität:	Über Wärmepumpe für die Heizung 70 °C sowie die Trinkwasser-Erwärmung Das Ziel ist, keine Wärme über den Rückkühler abzuführen.

Erdsonde

Wärme mit tiefem Temperaturniveau einlagern

Heizung und Trinkwarmwasser

1. Priorität:	Nutzung der Wärme der Kälte-Wärme-Maschine 35 °C
2. Priorität:	Nutzung der Wärme der Kälte-Wärme-Maschine über die Wärmepumpe im 70-°C-Netz für die Heizung oder die Trinkwasser-Erwärmung
3. Priorität:	Möglichst auf den Öl- oder Gasheizkessel verzichten (ausschalten)

Kaltwasserseite Kälte-Wärme-Maschine

Maschine A:	Ausgeschaltet Die Kühlung des Hochtemperatur-Kältenetzes (16 °C) erfolgt direkt über Erdsonden
Maschine B:	Kaltwassertemperatur 10 °C

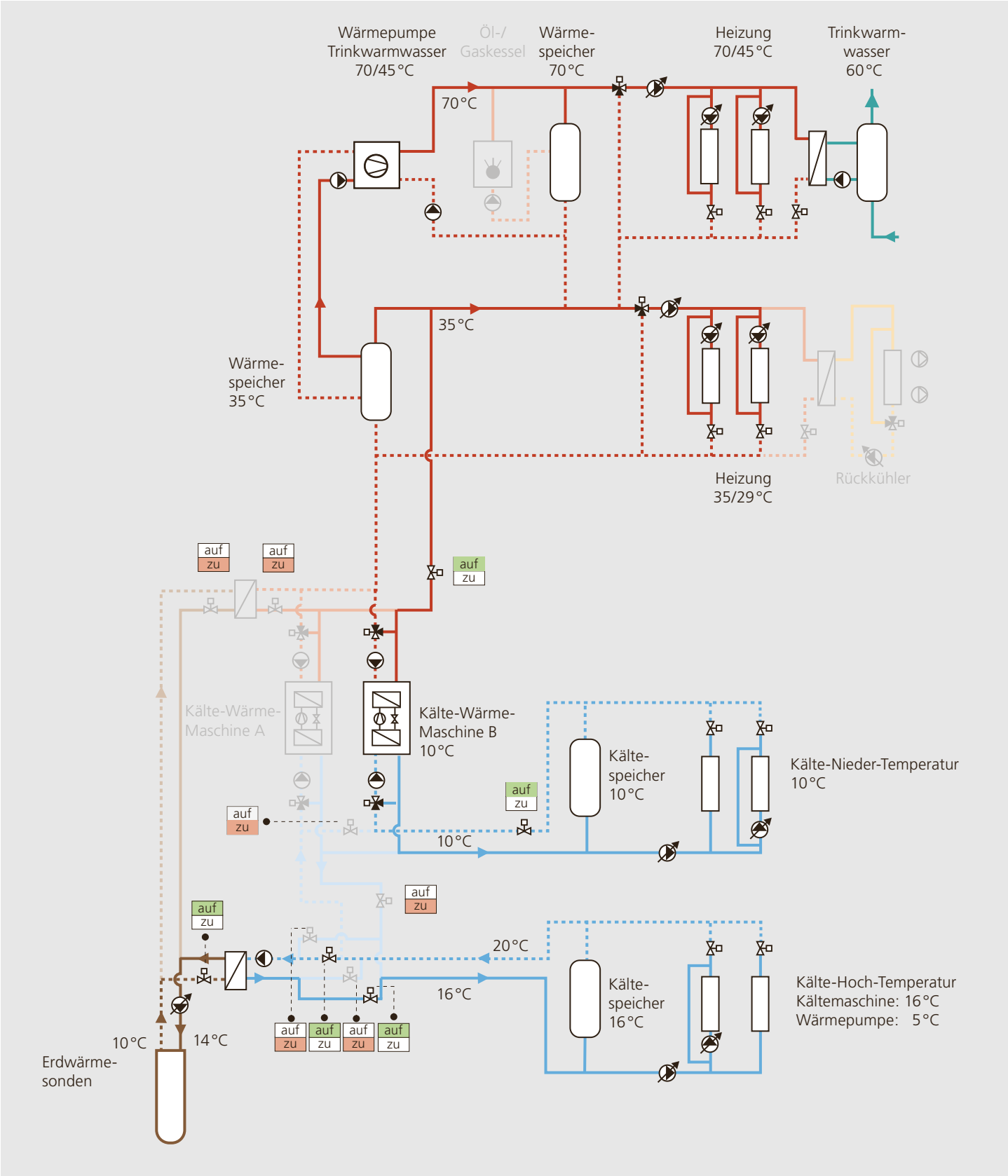


Bild 11.13:
Frühlings-Betrieb.

11.6 Vertiefung 4: Schnittstelle zur Gebäudeautomation

Für die Einbindung der Kältemaschine in eine Gebäudeautomation müssen die Schnittstellen zwischen den beiden Systemen (Datenpunkt), deren Signal-Richtung (Eingang oder Ausgang) und deren Signaltyp (analog, digital, potenzialfreier Kontakt) definiert werden.
Bild 11.14 illustriert für eine Kältemaschine mit 200 kW Kälteleistung die wichtigsten Schnittstellen und deren Signale.

Legende

DO	Digital Output	Digital Ausgang
DI	Digital Input	Digital Eingang
AO	Analog Output	Analog Ausgang
AI	Analog Input	Analog Eingang
PFD	Potential free	potenzialfreier Kontakt

(in diesem Beispiel kommt kein PFD vor)

Schnittstellen-Bezeichnung	Signal	Bemerkung
Eingänge		
Freigabe	DI	
Umschaltung auf Wärmenutzung	DI	
Rückmeldung Hauptpumpe Kälte	DI	
Rückmeldung Rückkühler-Pumpe	DI	
Sollwertumschaltung Kältekreislauf Vorlauftemperatur	DI	z. B. Sommer-Winter-Eisspeicherbetrieb
Spannungsüberwachung	DI	nur bei Prozessanlagen üblich
Hauptschalterüberwachung	DI	
Strömungswächter	DI	teilweise in der Kältemaschine integriert
Notausschalter	DI	
Sollwertschiebung Kältekreislauf Vorlauftemperatur	AI	
Leistungsbegrenzung	AI	
Ausgänge		
Sammelalarm	DO	
Voralarm, informelle Warnung	DO	
Alarm pro Kältekreis	DO	
Alarm mit Handquittierung	DO	
Motoranlauf gestört	DO	
Hochdruckalarm	DO	
Alarm mit automatischer Quittierung	DO	z. B. Niederdruck, Strömung (Alarm mit Selbsthaltung und einer Kontrollleuchte, die nach dem Quittieren dokumentiert, dass es eine Alarmmeldung gab.)
Betriebsmeldung Kältemaschine (ev. je Verdichter)	DO	
Maximalleistung erreicht	DO	
Stromaufnahme	AO	in % von $I_{max.}$
Verdampfungsdruck	AO	
Verflüssigungsdruck	AO	

Bild 11.14: Beispiel von Schnittstellen und deren Signale. Die Schnittstellen zu anderen Anlagekomponenten sind analog zu behandeln.

11.7 Vertiefung 5: Unterkühlung

Bei Kompressionskältemaschinen muss grundsätzlich jedes Kältemittel unterkühlt werden, damit es vor dem Expansionsventil keine Gasblasen mehr enthält («normale» Unterkühlung).
Denn je nach Druckverhältnis verdampft bereits vor dem Expansionsventil etwas Kältemittel. Dabei spielen der Verflüssigerdruck, als auch die Leitungsführung zum Expansionsventil eine Rolle. Weiter kann ein Höhenanstieg der Flüssigkeitsleitung zum Expansionsventil zu einer spontanen Verdampfung führen.
Das vor dem Verdichter verdampfte Kältemittel – das sogenannte «Flashgas» – wird im Verdichter nochmals verdichtet. Da es bereits verdampft ist, leistet es keinen Beitrag zur Kälteleistung. Für die Verdichtung beansprucht es jedoch elektrische Energie, wodurch Anlage weniger effizient läuft (der $COP_{Kälte}$ wird kleiner). Damit die Anlage energieeffizient läuft, muss der «Flashgas-Anteil» so niedrig wie möglich gehalten werden. Indem nun das Kältemittel von der Entspannung zusätzlich unterkühlt wird, wird der «Flashgas-Anteil» minimiert. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Ventilsitze nicht durch Kavitationseffekte beschädigt werden.
Bereits mit der «normalen» Unterkühlung wird die Energieeffizienz automatisch um 1,5 bis 2,5 % verbessert. Darüber hinaus unterkühlen gewiefte Maschinenbauer und Planer das Kältemittel zusätzlich. Das erhöht die Kälteleistung (respektive es kann ein kleinerer Verdichter gewählt werden), verbessert die Effizienz und erlaubt es, mit kleineren Kältemittelmengen zu arbeiten. Zudem erhöht eine gezielte Unterkühlung die Betriebssicherheit.
Die zusätzliche Unterkühlung des Kältemittels zeigt jedoch nur Wirkung, wenn diese nach dem Kältemittelsammler erfolgt.

1. Mit einem internen Wärmetauscher (IWT)
Anhand des Isentropen-Exponenten erkennt man, wie gut sich ein Kältemittel für eine Unterkühlung mittels IWT eignet. Dies, da eine Unterkühlung auf der Hochdruckseite zu einer Überhitzung auf der Niederdruckseite führt, von wo aus ja die Verdichtung startet. Je höher der Isentropen-Exponent ist, desto höher wird die Verdichtungs-Endtemperatur mit allen damit verbundenen Problemen und desto weniger eignet sich ein Kältemittel dafür. Eine Faustregel besagt, dass sich Kältemittel mit einem Isentropen-Exponenten nahe gegen 1,0 für eine Unterkühlung besonders
eignen.
Leider haben viele der heute in der Klimakälte eingesetzten Kältemittel bedeutend höhere Isentrope-Exponenten (T = 0 °C): 1,10 (R134a) oder 1,30 (CO_2). Diese Kältemittel eignen sich aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften nur bedingt für eine Unterkühlung mit einem IWT.

Unterkühlung verbessert die Effizienz
Erfolgt die Unterkühlung mit einem internen Wärmetauscher, kann die Anlageeffizienz um 2,5 bis 5 % gesteigert werden. Mit einer externen Unterkühlung um bis zu 23 %.
Beispiel Kältemittel R513A: Eine Unterkühlung um 5 K bei einer Verflüssigungstemperatur von 45 °C und einer Verdampfungstemperatur von 7 °C erhöht den COP um 5 %.

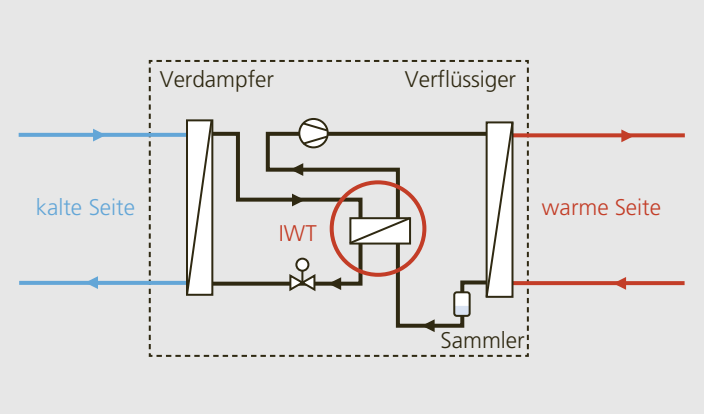


Bild 11.15: Unterkühlung mit einem internen Wärmeübertrager.

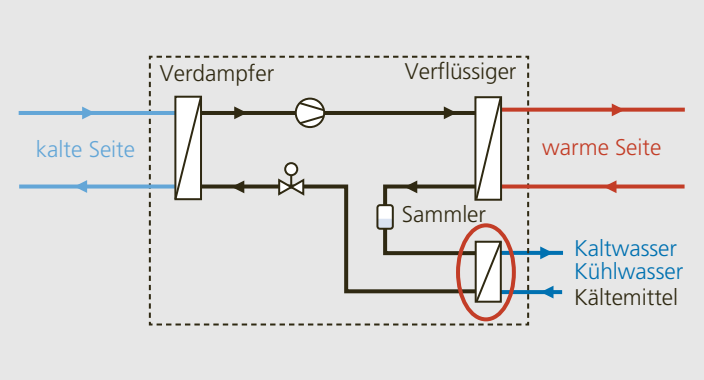
2. Mit einer Economiser-Schaltung
Bei einer Economiser-Schaltung wird ein (kleiner) Teil des Kältemittels (Teilstrom) nach dem Verflüssiger abgezweigt und separat expandiert. Nach der Expansion hat das Kältemittel des Teilstroms eine tiefe Temperatur. Nun wird vor dem Verdampfer das Kältemittel des Hauptstroms mit dem kühlen Teilstrom weiter abgekühlt (unterkühlt).
Der expandierte Teilstrom wird vor dem Verdichter dem Hauptstrom (Sauggas) wieder hinzugefügt. Dadurch sinkt die Sauggastemperatur etwas. So kann die Problematik einer zu hohen Verdichtungs-Endtemperatur verhindert werden.

3. Mit einem externen Wärmetauscher
Was in der Klimakälte oft vergessen geht, ist die Unterkühlung mit einem externen Wärmetauscher. So kann mit Kalt- oder Kühlwasser das Kältemittel unterkühlt werden (z. B. Vorwärmung Warmwasser). Oder man platziert den externen Wärmetauscher im Freien oder direkt unter dem Verflüssiger (Rückkühler) und unterkühlt so das Kältemittel mit der Aussenluft. Und eine weitere Möglichkeit ist, mit einem integrierten Register vor dem Verflüssiger mit Luft zu unterkühlen.

Bild 11.17 (oben): Unterkühlung mit einem Wärmeübertrager, der mit Wasser oder einem Kältemittel kühlt.

Bild 11.18 (Mitte): Unterkühlung mit einem Wärmeübertrager, der mit Luft kühlt.

Bild 11.19 (unten): Unterkühlung mit integriertem Unterkühlungsregister, das mit Luft kühlt.



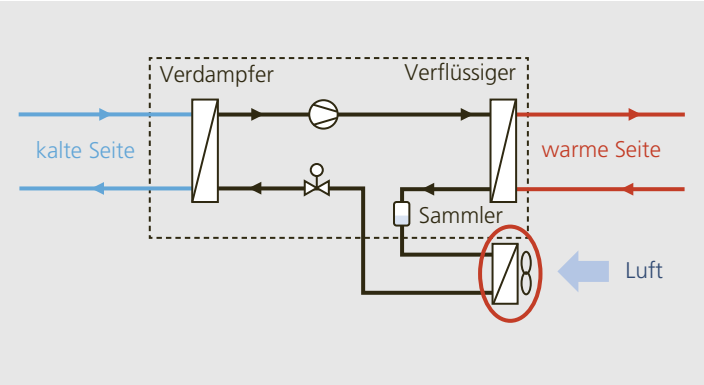
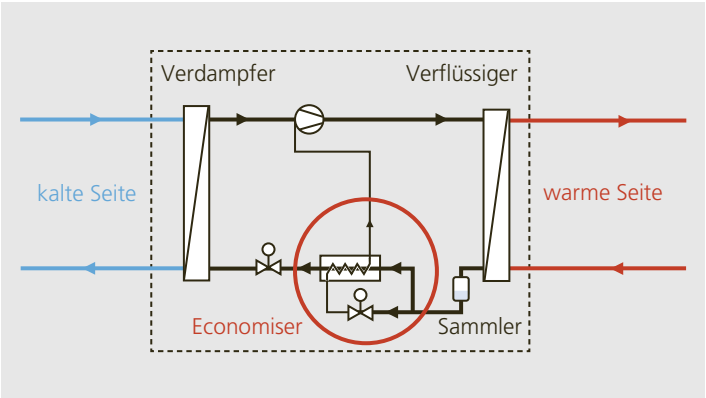
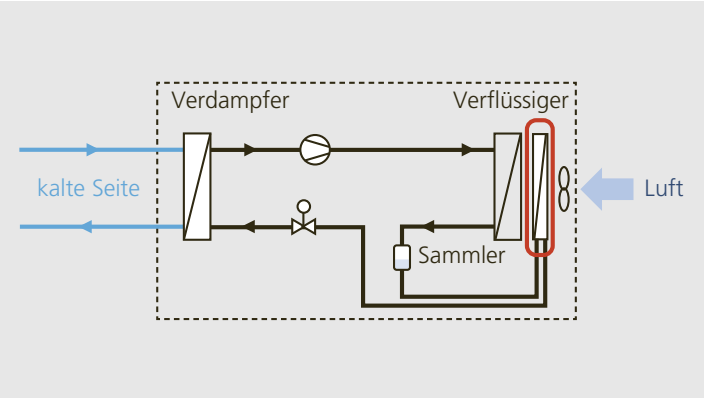


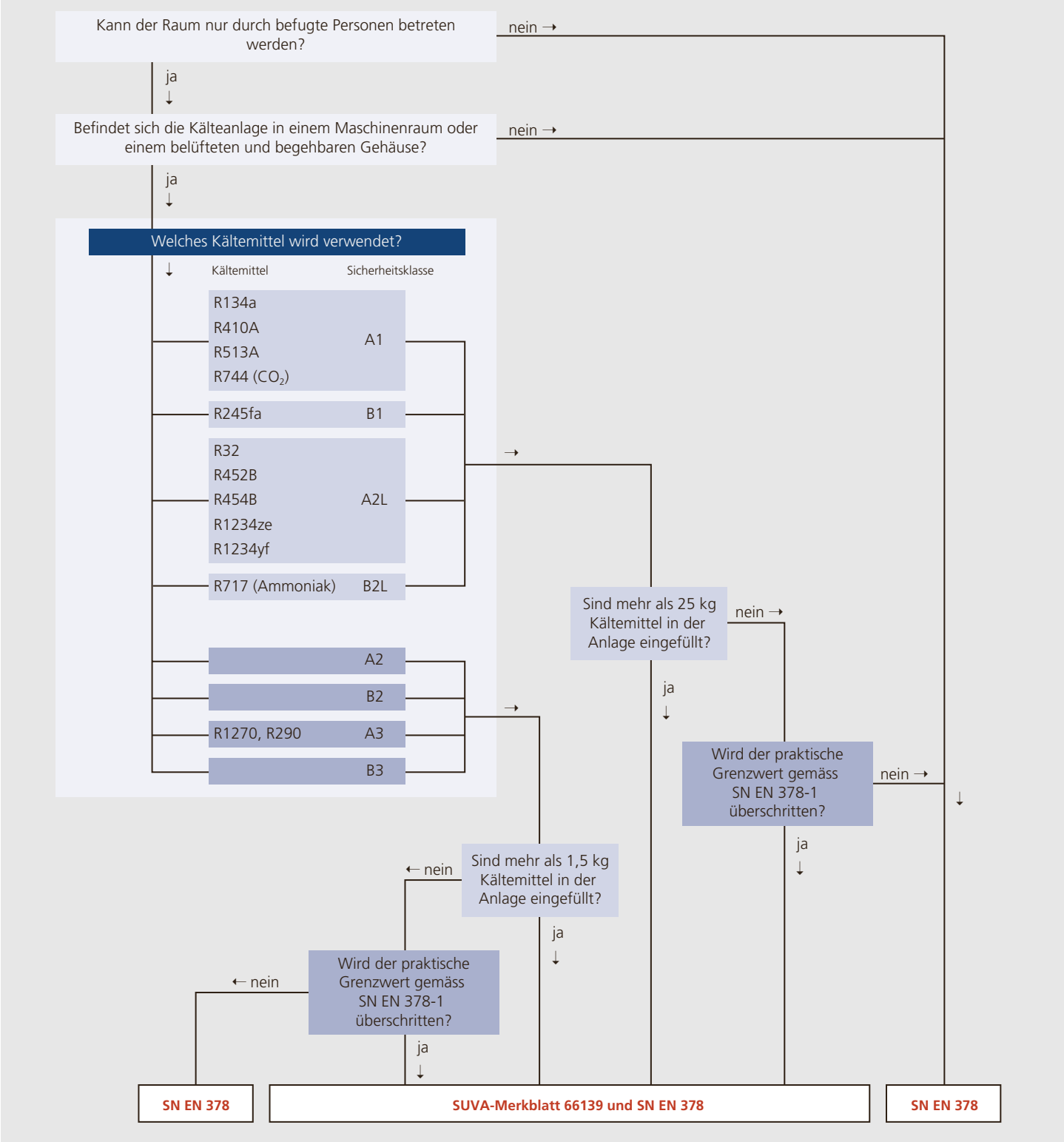
Bild 11.16: Unterkühlung mit einem Economiser.





11.8 Vertiefung 6: Entscheidungsbaum zur EN 378 und SUVA-Merkblatt 66139

Je nach Raumsituation und Kältemittel werden die Sicherheitsanforderungen der SN EN 378 mit Anforderungen der SUVA (Arbeitssicherheit) verschärft. Der Entscheidungsbaum ist eine Orientierung, welche Anforderungen in welchem Fall zu beachten sind.



11.9 Vertiefung 7: Kältemittel – Ersatz und Dichtigkeitskontrolle

Ersatz nicht mehr zugelassener Kältemittel
Anlagen mit einem Kältemittel, das nicht mehr nachgefüllt werden darf (z. B. R22), dürfen weiterbetrieben werden, sofern sie dicht sind. Bei einem Kältemittelverlust (z. B. durch ein Leck) muss das Kältemittel vollständig zurückgewonnen und durch ein erlaubtes ersetzt werden. Das Alter der Anlage sowie absehbare Reparaturen sind massgebend, ob eine Umrüstung infrage kommt oder die Anlage ersetzt wird.

Umrüsten auf ein Ersatzkältemittel
Die Umrüstung auf ein geeignetes Ersatzkältemittel macht allenfalls Anpassungen im Kältekreis sowie den Austausch von Kältemaschinenöl und Einspritzventilen nötig. Zudem muss das Kältesystem gespült und gereinigt werden. im schlimmsten Fall droht der Ersatz des Verdichters.

Umbau der Anlage
Wird der Verdichter ersetzt, muss immer geprüft werden, ob die umgebaute Anlage nun als Neuanlage oder als bestehende Anlage eingeteilt wird. Je nachdem gelten die Vorschriften für neu erstellte oder bestehende Kälteanlagen. Bei folgenden Veränderungen erfolgt in der Regel keine Neubeurteilung:

- Reparaturen, inklusive des 1:1-Ersatzes von defekten bestehenden Komponenten;
- 1:1-Ersatz der ganzen Anlage als Garantieleistung;
- Verschieben einer Anlage an ihrem Standort um wenige Meter;
- Ersatz des Kältemittels durch ein anderes Kältemittel, einschliesslich des Ersatzes von Kleinteilen wie Dichtungen oder Expansionsventilen, wenn weder Verdichter, Verflüssiger noch Verdampfer der Anlage verändert werden.

Details dazu können in der BAFU-Vollzugshilfe (Abschnitt 2.3.6) nachgelesen werden.

Ausnahmen bei Umbauten zur Steigerung der Energieeffizienz
Massnahmen, mit denen die Energieeffizienz von Anlagen massgeblich gesteigert wird, führen nicht zu einer Neubeurteilung der Kälteanlage. Speziell betrifft dies:

- den Einbau eines Verdichters mit einem Frequenzumformer
- das Nachrüsten einer Wärmenutzung im Sekundärkreislauf
- den Einbau eines Kältemittelunterkühlers
- den Ersatz von Verdampfer oder Verflüssiger, durch energieeffizientere Komponenten
- den Einbau eines elektronischen Expansionsventils

Achtung: Für Anlagen mit Kältemitteln mit einem GWP von mehr als 1500 (z. B. R410A oder 407C) gilt diese Regelung nicht. Details dazu können in der BAFU-Vollzugshilfe (Abschnitt 2.3.6) nachgelesen werden.

Dichtigkeitskontrolle
Die Kontrollen sollten aus fachlicher Sicht mindestens in den folgenden Zyklen stattfinden (Quelle: Anlagen und Geräte mit Kältemitteln: Betrieb und Wartung, Vollzugshilfe des BAFU zu den Regelungen über Wartungsheft, Dichtigkeitskontrolle und Meldepflicht. Stand 2020)

	Am Standort zusammengebaute Anlagen	werksgefertigte Kompaktanlagen und -geräte
erste Kontrolle nach Inbetriebnahme	2 Jahre	6 Jahre
zweite Kontrolle nach Inbetriebnahme	1 Jahr nach der Erstkontrolle	4 Jahre nach der Erstkontrolle
weitere Kontrollen	jährlich	alle 2 Jahre

11.10 Schlagwörter

Symbole
(n+1)-Methode 39

A
Abnahme 55
Absorptionskältemaschine 83
Anhebung der Verflüssigungstemperatur 100
Aqua-Cooling 94

B
Bauen ohne Kühlung 58
Begehbares Gehäuse 40
Behaglichkeit 88
Beimisch-Schaltung 125
Betriebsoptimierung 57

C
Carnot-Prozess 24
Checkliste: Konzeption 48
$COP_{Kälte}$ 2, 173
$COP_{Kälte+Wärme}$ 181
$COP_{Wärme}$ 2, 173

D
Dachaufgestellte Kompakt-Kälteerzeuger 103
Dämmstoffe 145
Dichtigkeitsprüfung 57
Direktverdampfung 151
Direktverflüssigung 151
Drehzahlregulierte Pumpe 123
Drehzahlregulierung 67
Drosselschaltung 125
Druckentlastungseinrichtungen 78

E
EER+ 176
Einspritzschaltung 125
Eisspeicher 148
Elektronisches Expansionsventil 77
Elektrothermischer Verstärkungsfaktor (ETV) 177
Energieeffizienz 171
Energie-Messkonzept 44
Energiespeicher 132
Energy Efficiency Ratio (EER) 173
Entfeuchtung 178
Enthalpie 22
Enthitzung 25
Erdreich-Regeneration 108
European Seasonal Energy Efficiency Ratio (ESEER) 176
Expansionsventil 61, 164

F
Flächenkühlsysteme 90
Free-Cooling 95, 109
Freie Kühlung 138

G
Garantieabnahme 44
Geo-Cooling 94
Getrennte Kreisläufe 80
Global Warming Potential (GWP) 32
Glykol 147

H
Heissgas-Enthitzung 104
Hochdruck 26
Hybride Trockenrückkühler 114
Hydraulischer Abgleich 121
Hydraulische Schaltungen 119
Hydraulische Systemtrennung 128

I
Inbetriebsetzung 56
Isentrope 23

K
Kältebedarf 46
Kältemittel 28, 206
Kältemittel-Füllmenge 42
Kaltwasserspeicher 132
Kaltwassertemperaturen 46, 86
Klimakonvektoren 89
Kombinierte Kälte- und Wärmenutzung 181
Komfortkühlung 88
Kontrollierte Entfeuchtung 87
Kühldecken 90
Kühlquellen 85
Kurzzeitige Wärmespeicher 107

L
Latente Wärme 20
Laufzeit des Ventilantriebs 124
Legionellen 114
Leistungsregulierung 155
Leistungszahl ε 24
log p,h-Diagramm 22
Luftrezirkulationen 110
Luftverdampfer 72

M
Messfühler 165
Minimaltemperaturbegrenzung 158

N
Niederdruck 26
Nutztemperatur 85

O
Ohne Entfeuchtung 88
Ozonabbaupotenzial 32

P
Pufferspeicher 132
Pumpen 120

R
Rechenzentren 176
Redundanz 39
Regulierung 151
Rohrleitungen 144
Rohrleitungsnetz 120

S
Sauggasüberhitzung 25
Schallemissionen 50
Schnittstellen 152
Sensible Wärme 20
Sequenz-Regulierung 157
SIA-Phasen 50
Sicherheitseinrichtungen 162
Sicherheitsmassnahmen 42
Sollwert-Schiebung 157
Speicher 120
Spezifisches Volumen 23
Steuerung 151
Stolpersteine 52
Systemgrenzen 174

T
Technische Speicher 132
Teilentfeuchtung 87
Teillastverhalten 178
Temperaturregulierung 155
TEWI 33
Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) 90
Thermostatisches Expansionsventil 77
Trinkwarmwasser 101
Trockenexpansion 71
Trockenrückkühler 111

U
Überfluteter Wärmeübertrager 71
Umluftkühler 89
Unterkühlung 25, 203

V
Ventile 120
Verdampfer 61
Verdichter 61
Verdichterbauarten 66
Verdunstungsrückkühler 111
Verflüssiger 61
Verfügbarkeit 38
Verschmutzungsfaktor 70
Volumetrische Kälteleistung 32

W
Wärmenutzung 181
Wärmepumpenboiler 101
Wärme saisonal speichern 108
Wärmeträger 28
Wärmeübertrager 61
Wartung 57
Wasser-Glykol-Gemisch 144
Wirkungsgrad η 24

Reduzieren Sie Ihren Fussabdruck

Die konsequente Ausrichtung auf die Markt- und Kundenbedürfnisse macht uns zu einem Partner, der Ihnen einen einzigartigen Mehrwert bietet.

Wir helfen Ihnen Ihren Fussabdruck zu reduzieren.

Präzise Regelung der Komfortparameter Temperatur, Luftfeuchte und CO_2-Konzentration für einen möglichst energiesparenden Betrieb. Belimo setzt in diesem Bereich Massstäbe mit energieeffizienten Antrieben, dicht schliessenden Kugelhahnen oder dem Belimo Energy Valve™ für maximale Transparenz und direkte Leistungsregelung in Gebäuden.

Wir laden unsere Kunden und Partner aus der ganzen Welt ein, unser Experience Center in Hinwil zu besuchen. Anwendungsorientierte Workshops und praktische Trainings bringen uns gemeinsam weiter.

Planen Sie ein Bauprojekt? Lassen Sie uns im gemeinsamen Austausch mit Bauherren und Fachplanern die beste Lösung für Ihr Vorhaben finden.

BELIMO Automation AG
+41 43 843 62 12, verkauf@belimo.ch, www.belimo.ch

BELIMO®

Bei Kälte muss man zusammenstehen.

Aber auch bei Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär, Elektro, Gebäudeautomation, Brandschutz, Energieberatung und EnergyMonitoring. www.antecgroup.ch

BKW ANTEC GROUP

ahochn AG
Aicher, De Martin, Zweng AG
Balzer Ingenieure AG
enerpeak AG
LAMI SA
MRI Marcel Rieben Ingenieure AG

Umweltfreundlich Kältemaschinen mit Propan

cta.ch/propan-kaeltemaschinen

Hochwertige und sichere Propankältemaschinen und Grosswärmepumpen. Flexibel dank modularem System. Mit Hubkolben- oder Schraubenverdichter. Mit umweltfreundlichem Kältemittel. Bis 1200 kW Kälteleistung, luft- oder wassergekühlt. Standardprodukt oder massgeschneidert.

40 JAHRE Jubiläum

CTA
Klima Kälte Wärme

Energieeffiziente Gebäudetechnik-Lösungen

Heizung • Lüftung/Klima • Sanitär
Gebäudeautomation • Energieoptimierung

ENGIE

engie.ch/kaeltetechnik • Tel. 0800 888 788

#Act With ENGIE

ENIP AG

Klima-, Kälte- & Wärmepumpentechnik

Als Anbieter und Hersteller von Betriebs-, Gebäude-, Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Kältetechnik decken wir sämtliche Dienstleistungen in diesen Bereichen ab. Wir denken und handeln energieeffizient, nachhaltig, intelligent und leisten einen ganzheitlichen, professionellen Service.

Klimatechnik - Kältetechnik - Wärmepumpentechnik - Regeltechnik

IOT Plattform - Umweltschutz - Service und Instandhaltung

IMP Solutions

Mit dem IMP Regler erhalten Sie ein Intelligentes Gebäudemanagement System, welches sich schnittstellenlos betreiben lässt. Unser System ist so modular aufgebaut, dass es Ihnen somit überlassen wird, ob Sie nur ein Gerät oder gleich Ihr ganzes Gebäude damit steuern, regulieren und betreiben wollen.

Energieeffizient · Nachhaltig · Intelligent · Professionell

ENIP AG Bahnstrasse 60 - 8105 Regensdorf - www.enip.ch - +41 44 843 33 33

Johnson Controls

Kälte- und Klimatechnik mit natürlichen Kältemittel

Johnson Controls Systems & Service GmbH
Hauptsitz Zürich, Kältetechnik
Grindelstrasse 19, 8303 Bassersdorf, Schweiz
Tel: +41 44 838 44 11
E-Mail: info-switzerland@jci.com

YORK SABROE Frick

kapag

Seit 47 Jahren Experten für Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik.
www.kapag.ch

KAPAG Kälte-Wärme AG 8964 Rudolfstetten 044 918 72 50 **www.kapag.ch**

Wasser (R718) – das natürliche Sicherheits-kältemittel

eChiller
Kältetechnik mit Zukunft

Kosten?
- Kostengünstigstes Kältemittel
- Geringe Energiekosten

Gesetz?
- ChemRRV 814.81 keine Einschränkung
- SN EN387 1-4 Sicherheitsgruppe A1

Nachhaltigkeit?
- 100 % natürliches Kältemittel
- Öl-freier Betrieb

Mehr Infos unter:
Klima Kälte Kopp AG • 8953 Dietikon • Tel. +41 (0)43 322 32 32 • www.3-k.ch

KLIMA KÄLTE KOPP AG

UNSER FOKUS LIEGT AUF DER KÄLTE. Als Ingenieurbüro sind wir Ihr neutraler Partner für die Beratung von Eisbahnprojekten, Gesamtenergiekonzepten und Kältetechnik.

Leplan AG | 8400 Winterthur | 6004 Luzern | www.leplan.ch

Ihr Partner für die Planung von Kälteanlagen

- Bauherrenberatung und -begleitung
- Konzepterstellung
- umfangreiche Erfahrung im Grossdatacenter-Bau
- Vorprojekte
- Bau-Ausführungsprojekte
- QS-Mandate

smcooling gmbh
Geschäftsinhaber Sepp Manser
Brülisauerstrasse 51
9058 Brülisau

Tel. +41 (0)79 217 19 75
info@smcooling.ch
www.smcooling.ch

WOLF
INNOVATIVE PLANUNG - PRÄZISE AUSFÜHRUNG - WIR VERBINDEN - FÜR ZUFRIEDENE KUNDEN
www.wolf-klimatechnik.ch

WURM
SYSTEME
Wurm (Schweiz) AG
Industriestrasse 5 - CH-6034 Inwil
Tel +41 (0)41 455 61 61
info@wurm.ch / www.wurm.ch
Wir automatisieren Kälteanlagen und Gebäude