



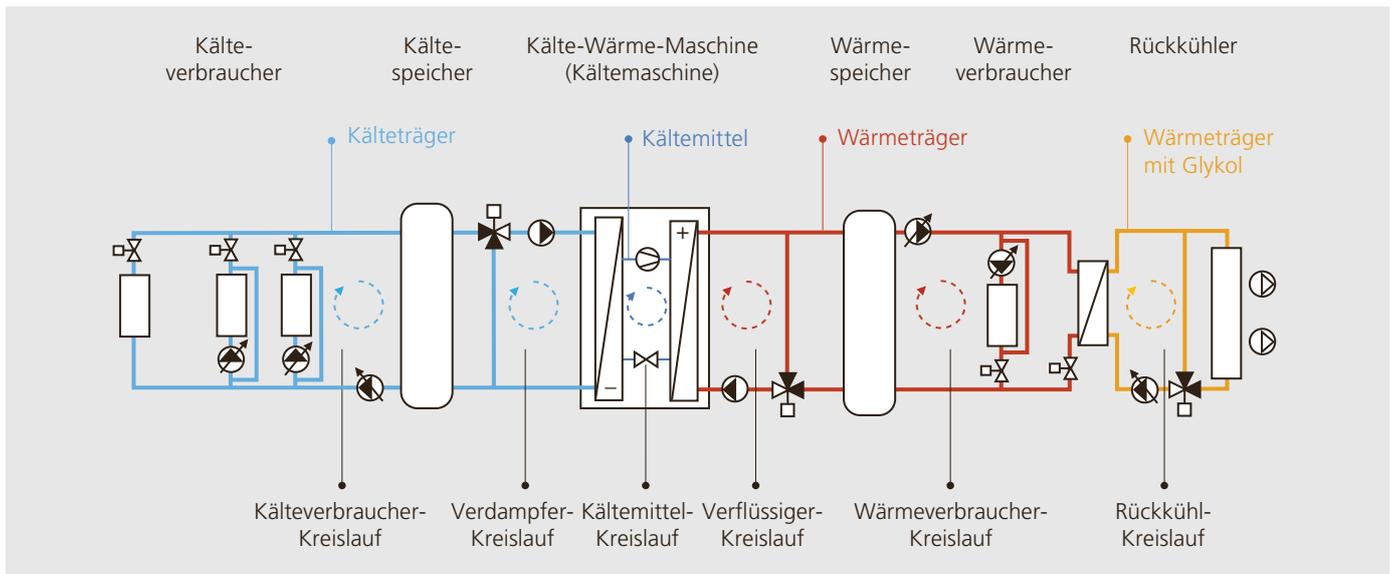
Brunner | Kriegers | Prochaska | Tillenkamp

Klimakälte heute

Kluge Lösungen für ein
angenehmes Raumklima

Überblick 1

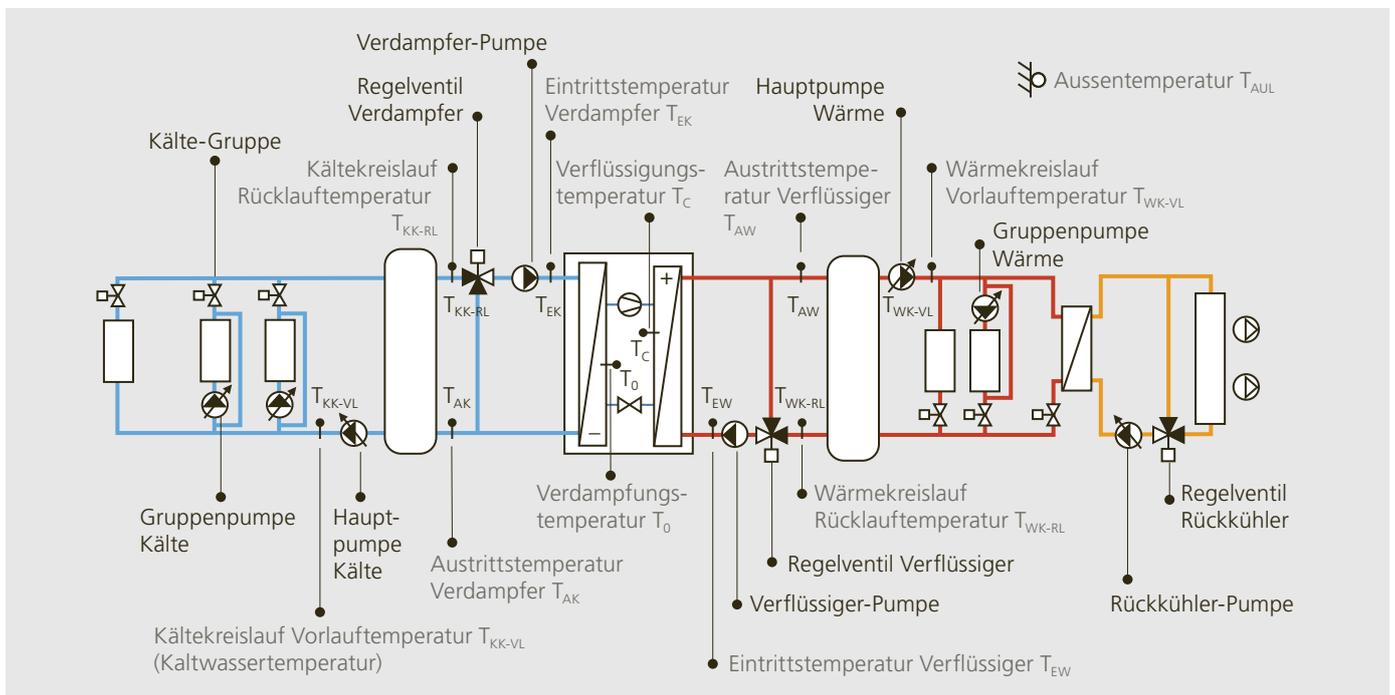
Medien und Kreisläufe



Farben Leitungen

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

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.

Pumpe mit Motor vs. Pumpe mit Motor und FU

- | | | |
|--|--|---|
| | | |
| | | Symbole |
| | | Im Fachbuch verwendete, vereinfachte Symbole |
| | | Pumpe: kann drehzahl-geregelt sein oder nicht |

Inhalt

1. Zeitreise durch die Klimakälte	7	5. Bauarten und Komponenten	75
2. Übersicht Gesamtsystem	11	5.1 Der Kältekreis und seine Komponenten	75
2.1 Systemdenken bei Klimakälteanlagen	11	5.2 Verdichtertypen und ihre Funktion	75
2.2 Die vier Systeme	12	5.3 Verhalten des Verdichters	78
2.3 Sicht aufs Ganze	13	5.4 Verdichterbauarten	82
2.4 Prinzip der Energie-Umlagerung	15	5.5 Zweistufige Verdichtung	86
2.5 Konzeptionelle Überlegungen	15	5.6 Allgemeines zu Wärmeübertragern	88
2.6 Trends in der Klimakälte	20	5.7 Verdampfer	92
3. Grundlagen	25	5.8 Verflüssiger	95
3.1 Kälteprozess	25	5.9 Expansionsventil	98
3.2 Das log p,h-Diagramm	28	5.10 Weitere Komponenten	99
3.3 Carnot-Prozess als idealer Vergleich	30	5.11 Systemaufbau nach Verdampferart	101
3.4 Aggregatzustandsänderung nutzen	31	6. Wärmeaufnahme	107
3.5 Energieflüsse in der Kältemaschine	32	6.1 Konzeptionelle Überlegungen	107
3.6 Auswahl von geeigneten Kältemitteln	36	6.2 Wärmeaufnahme-Systeme	109
3.7 TEWI-Bewertung	39	6.3 Übersicht Kühlsysteme	114
3.8 Kältemittel in der Klimakälte	39	6.4 Zuluft kühlen und entfeuchten im Lüftungsgerät	115
4. Der Planungsprozess	45	6.5 Hydraulische Einbindung	118
4.1 Generelle Anforderungen	45	6.6 Alternative Kühlsysteme	120
4.2 Einflussfaktoren	45	7. Wärmeabgabe	123
4.3 Aufstellung und Zugänglichkeit	48	7.1 Konzeptionelle Überlegungen	123
4.4 Anlagen mit Propan und Isobutan	52	7.2 Wärme direkt nutzen	131
4.5 Normen und Vorgaben	59	7.3 Kurzzeitige (Tag-Nacht-) Wärmespeicher	135
4.6 Vorgehen bei der Planung	61	7.4 Wärme saisonal speichern	136
4.7 Häufige Stolpersteine bei der Planung	66	7.5 Wärme direkt abführen	137
4.8 Vorgaben an die Lieferanten	67	7.6 Rückkühlung: Wärme indirekt abführen	138
4.9 Was ist bei Inbetriebsetzung und Abnahme zu beachten?	69		
4.10 Wartung und Instandhaltung der Klimakälteanlage	71		

8. Hydraulische Systeme	147	11. Direktverdampfungs- und Direktverflüssigungs-Systeme	225
8.1 Allgemeines	147	11.1 Funktion von DX-/DV-Systemen	225
8.2 Elemente der Hydraulik	149	11.2 Split-Anlagen	226
8.3 Einbindung Kältemaschine	151	11.3 Multi-Split-Systeme	226
8.4 Einbindung Kälteverbraucher	156	11.4 VRF/VRV-Systeme	227
8.5 Wärmeaufnahme	159	11.5 HVRF-Systeme	228
8.6 Kaltwasserspeicher	163	11.6 Wandklimaanlagen	228
8.7 Einbindung Rückkühlung	167	11.7 Mobile Raumklimageräte	229
8.8 Aktives Free-Cooling mit Kaltwasser	169	11.8 Aufstellung einer Ausseneinheit	230
8.9 Wärmeabgabe	172	11.9 Platzierung der Inneneinheit	231
8.10 Kälte-Wärme-Nutzung als Gesamtsystem	173	11.10 Richtiger Einsatz ist ausschlaggebend	231
8.11 Verteilsystem	175		
9. Steuerung und Regelung	183	Anhang	
9.1 Allgemeines	183	A Autoren	233
9.2 Ansätze der Schnittstellen- definition	184	B Dokumentation	234
9.3 Regelung der Kältemaschinen- leistung	186	C Sicherheitsanforderungen	235
9.4 Regelung der Verdampferseite	187	D Kältemittel: Ersatz und Dichtigkeitskontrolle	236
9.5 Regelung des Kälteverbraucher- Kreislaufs	190	E Unterkühlung	237
9.6 Regelung der Verflüssigerseite	193	F Dämmung von Kälteleitungen und Speicher	240
9.7 Zu- und Abschalten der Kälte- maschine	195	G Bemessung des Kältespeichers	243
9.8 Kältemaschinensicherheit	197	H Modell-Wirtschaftlichkeits- berechnung	246
9.9 Regel-Ventile und Messfühler	200	I Nahtstellen zur Gebäude- automation	251
9.10 Beispiele zur Kombination von Regelungen	202	J Gesamtsystem mit Kälte- und Wärmenutzung	252
9.11 Monitoring des Betriebs	203	K Pumpenauslegung und Pumpencharakteristik	260
10. Energieeffizienz und Teillastverhalten	205	L Turbo-Verdichter (Strömungs- verdichter)	262
10.1 Anlageneffizienz verstehen	205	M Stichwortverzeichnis	265
10.2 Energiebilanz einer Klima- kälteanlage	206		
10.3 Energetische Beurteilung von Klimakälteanlagen	207		
10.4 Effizienter Betrieb von Klimakälteanlagen	211		
10.5 Anforderungen an die Effizienz des Kälteerzeugers	213		
10.6 Speichermanagement	219		
10.7 Kombinierte Kälte- und Wärmenutzung	219		
10.8 Energieeffizienz verschiedener Verdampfer	221		
10.9 Energieeffizienz von Raumklimageräten < 12 kW	223		

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: SWKI, Urtenen-Schönbühl

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

Die Experten Robert Dumortier und Beat Schmutz haben ihr Fachwissen beigesteuert und so zum guten Gelingen der aktualisierten Version 2026 beigetragen.

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 Verlag AG,
Zürich

Die Auszüge aus der SIA 384/4 (2025) unterstehen dem Copyright © 2025 by SIA Zurich.

Titelbild: 123rf.com

Bezug als PDF-Dokument:
EnergieSchweiz
Gratis-Downolad: [Fachbuch Klimakälte](#)
Bezug als Buch: Faktor Verlag,
www.faktor.ch

3. aktualisierte Auflage, Januar 2026
ISBN: 978-3-905711-89-9

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 gehört die SIA 384/4 Klimakälteanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen (2025).

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 11 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 Klimälösungen. 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 Regelung der Klimakälteanlage und im Kapitel 10 gehen wir auf das Thema Energieeffizienz und Teillastverhalten ein. Abgerundet wird das Thema Klimakälte mit einem kurzen Blick auf die Direktverdampfungs- und Direktverflüssigungs-Systeme.

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 finanzielle Unterstützung. Einen bedeutenden finanziellen Beitrag haben auch die 29 Sponsoren aus der Privatwirtschaft geleistet. Sie haben damit das Projekt erst möglich gemacht.

Wir danken den Experten Robert Dumortier und Beat Schmutz für ihren wertvollen, kritischen Blick auf das Werk.

Ein herzliches Dankeschön geht an den SIA, dass wir Auszüge aus der SIA 384/4 (2025) Klimakälte nutzen dürfen. Und auch bei den Autoren der Kältemittelfibel, Robert Dumortier und Thomas Lang, möchten wir uns bedanken, dass wir ganze Passagen aus der Fibel übernehmen durften.

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

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, voll klimatisierten 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.

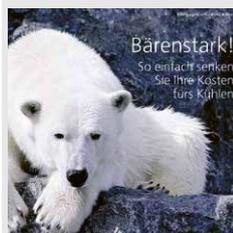
	1800	1930	1970	1980
Phase	Technische Machbarkeit: Pioniere wie Willis H. Carrier oder Carl von Linde bauen die ersten Kälteanlagen.	Sicherheit bei den Kältemitteln (Brennbarkeit, Toxizität)	Technologie	
Ereignisse	<p>Ab 1876 kühlen die ersten Brauereien mit Kältemaschinen und nicht mehr in kalten Höhlen oder in Eiskellern.</p> <p>USA: Die hohe Luftfeuchtigkeit in den Südstaaten macht die Gegend nur schwer besiedelbar. Es werden Lösungen gesucht, wie die Luft entfeuchtet werden kann.</p>	<p>30er-Jahre: Der Siegeszug des Kühlschranks ebnet auch der Klimakälte den Weg.</p> <p>60er-Jahre: Mit der grossen Verbreitung von Klimaanlage entwickelt sich «cool» als positiver Begriff.</p>	<p>Voll klimatisierte Gebäude kommen auf.</p> <p>1972: Der Club of Rome veröffentlicht den Bericht «Die Grenzen des Wachstums»</p> <p>1973: Erste Ölpreiskrise</p> <p>1979: Zweite Ölpreiskrise</p>	<p>Mit Luft voll klimatisierte Gebäude bekommen – zumindest in der Schweiz – ein negatives Image, da sie oft Mängel aufweisen (Zugluft, schlechte Luftqualität, grosser Energieverbrauch).</p> <p>1984: Kühldecken verbreiten sich allmählich (1. SWKI-Seminar zu diesem Thema).</p>
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 Kanalsystem			
Kältemittel	<div style="border: 1px solid green; border-radius: 10px; padding: 5px; display: inline-block;">natürliche Kältemittel</div>	<div style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 5px; display: inline-block;">FCKW</div>		<div style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 5px; display: inline-block;">HFCKW, F</div>
	<div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">Ammoniak, SO₂, CO₂</div>	<div style="background-color: #FF4500; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">R11, R12</div>		<div style="background-color: #FF4500; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">R22, R124, F</div>
	<div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">Ammoniak</div>	<div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">Ammoniak</div>		<div style="background-color: #008000; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">A</div>
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

2000	2010	2020	2030	Bemerkung
Erderwärmung und Energieeffizienz		Klimaerwärmung, Hitze und Gesundheitsschutz		

Erderwärmung: Die synthetischen Kältemittel weisen zum Teil ein sehr hohes Treibhausgaspotenzial auf (GWP).



Energieeffizienz, Wärmenutzung und Gesamtwirtschaftlichkeit rücken stärker in den Fokus.



Die Zunahme von Hitzetagen rückt die Diskussion über sinnvoll geplante und effiziente Klimakälteanlagen stärker in den Fokus. Zudem verschmelzen Heizen und Kühlen zunehmend durch den Einsatz moderner Kälte-Wärme-Maschinen.

Raumluftkonditionierung und Bauteiltemperierung

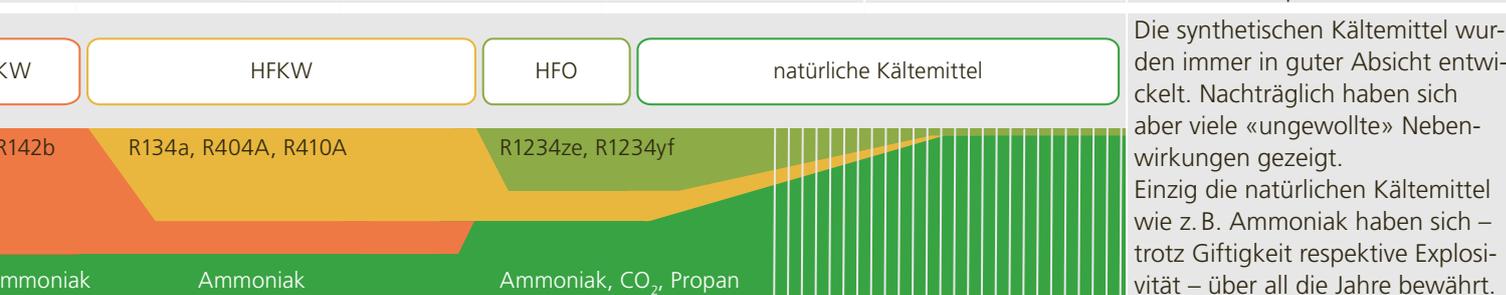
Da das Wort «Klimatisierung» heute eher negativ belastet ist, spricht man neu von Raumluftkonditionierung.

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.



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.

Turbo-Verdichter mit Drehzahlregelung
 300 kW
 120 kg
 bis 14

Kältemaschinen werden immer kleiner, leistungsfähiger und effizienter.

2003: SWKI-Richtlinie Rückkühlung
2004: Bewilligungspflicht für Kälteanlagen
2005: ChemRRV tritt in Kraft
2016: SN EN 378 «Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen für Kälteanlagen und Wärmepumpen» wird neu aufgelegt.
2017: BAFU «Vollzugshilfe Kälteanlage» wird veröffentlicht.
2025: SIA 384/4 «Klimakälteanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen» wird veröffentlicht.

Immer mehr Gesetze und Verordnungen regeln den Klimakältebereich und müssen vom Planer berücksichtigt werden.

Überblick 2

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

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

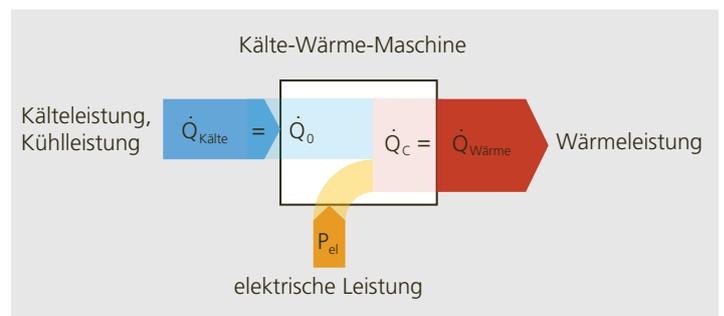
Vereinfachung bei der Berechnung des COP und EER

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 $\text{COP}_{\text{Kälte}}$ und $\text{COP}_{\text{Wärme}}$

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

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



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. Die Planerin 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.

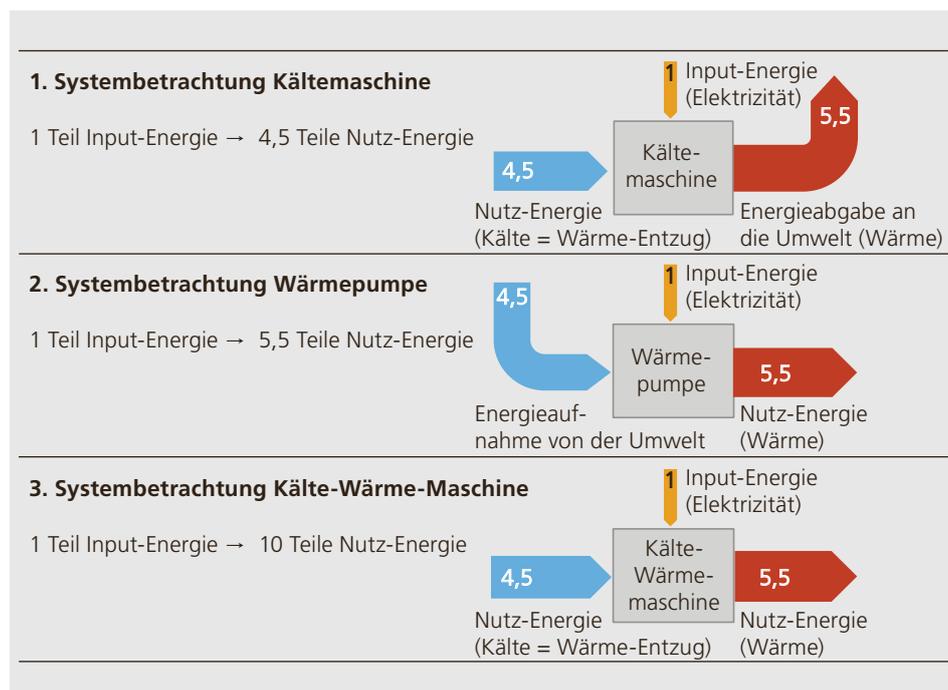


Bild 2.1: Die Systembetrachtungen einer Kältemaschine, Wärmepumpe und einer Kälte-Wärme-Maschine zeigen, dass die KWM die Input-Energie viel besser nutzt.

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 «Energievernichtung» statt. Zudem prägen die Aussengeräte an der Fassade die architektonische Gestaltung des Gebäudes, und die Ventilatorgeräusche können stören. Die beschriebenen Luft-Luft-Systeme werden in der Regel bei Kleinst-Klimakälteanlagen eingesetzt und in diesem Fachbuch nicht weiter beschrieben.

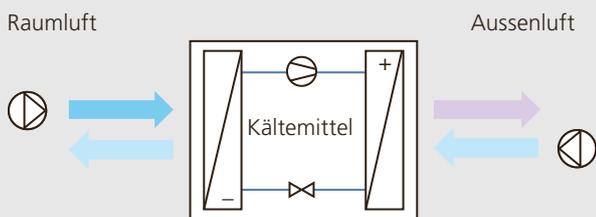


Bild 2.2: Schematische Darstellung eines Luft-Luft-Systems (z. B. Split-Kühlgerät).

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-Systeme zum Heizen nur bedingt.

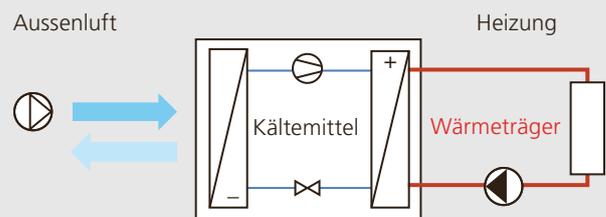


Bild 2.3: Schematische Darstellung eines Luft-Wasser-Systems (z. B. Luft-Wasser-Wärmepumpe).

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.

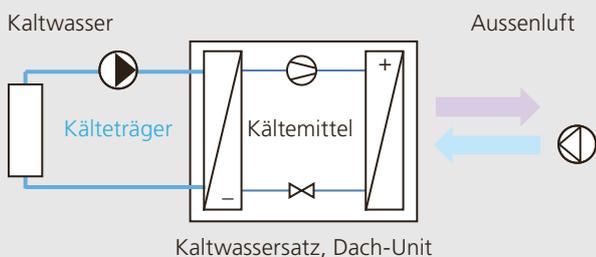


Bild 2.4: Bei einem Wasser-Luft-System wie der klassischen Kältemaschine wird nur die kalte Seite genutzt und die Wärme an die Aussenluft abgegeben.

4. Wasser-Wasser-Systeme (Kälte-Wärme-Maschine)

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.

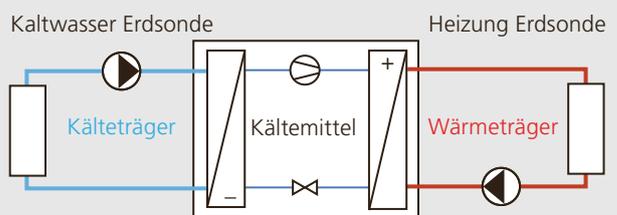


Bild 2.5: Bei einem Wasser-Wasser-System (z. B. Kältemaschine mit Wärmenutzung) werden sowohl die warme wie auch die kalte Seite des Systems genutzt.

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.

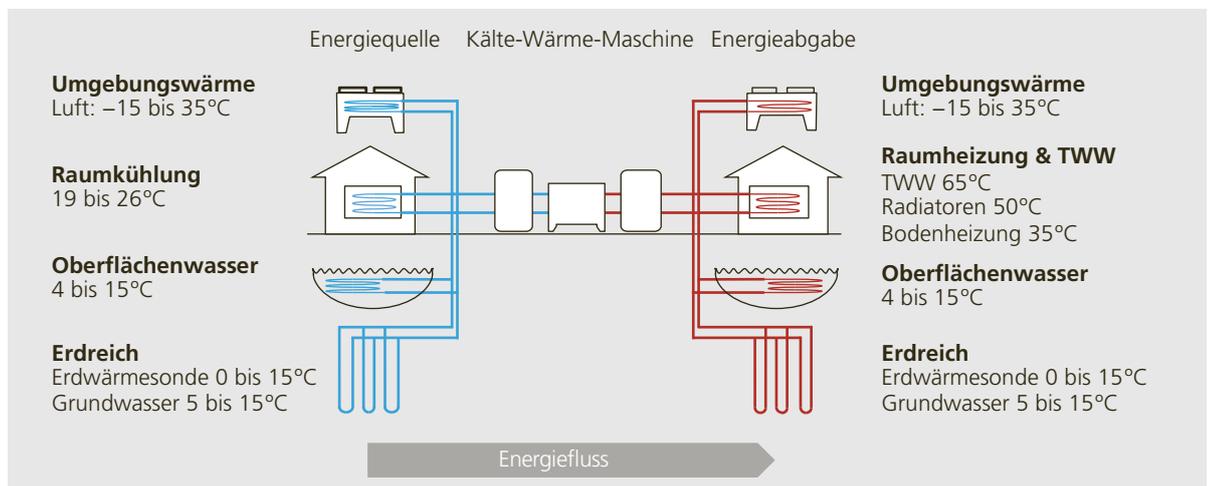


Bild 2.7:
Die anfallende Wärme aus der Raumkühlung wird für die Raumheizung und das TWW genutzt.

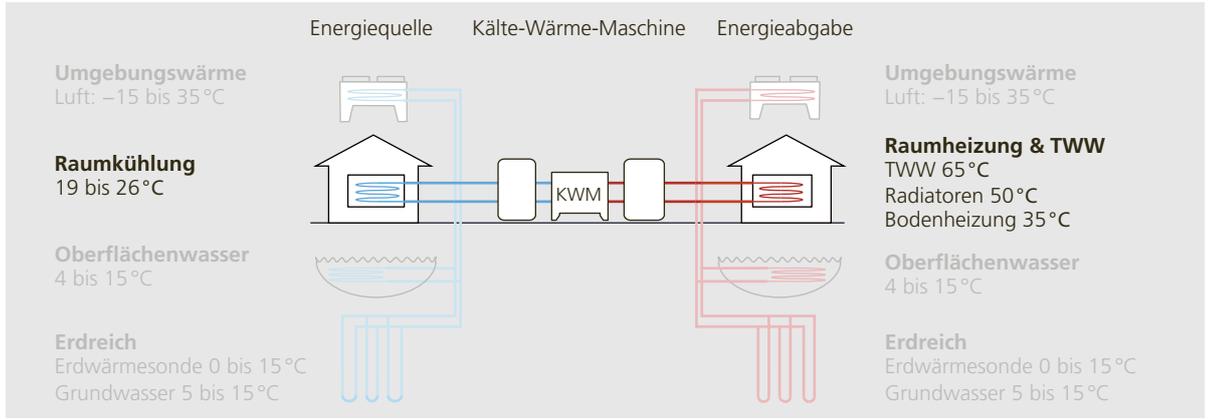


Bild 2.8:
Die anfallende Wärme aus der Raumkühlung wird für die Raumheizung und das TWW genutzt. Ist dieser Wärmebedarf gedeckt, wird die überschüssige Wärme über den Rückkühler an die Umgebung abgegeben.

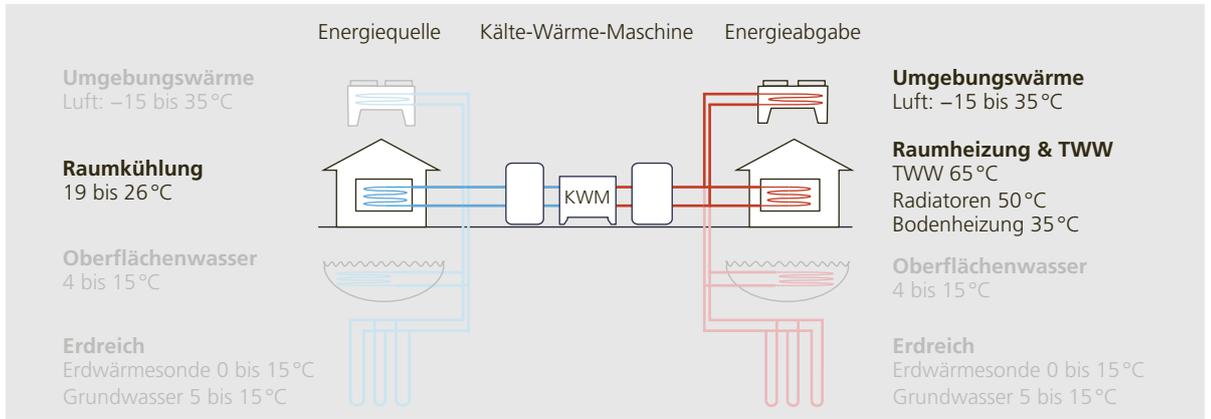


Bild 2.9:
Die anfallende Wärme aus der Raumkühlung wird für die Regeneration der Erdsonde genutzt und ins Erdreich abgegeben (Kühlung mit der Erdwärmesonde).

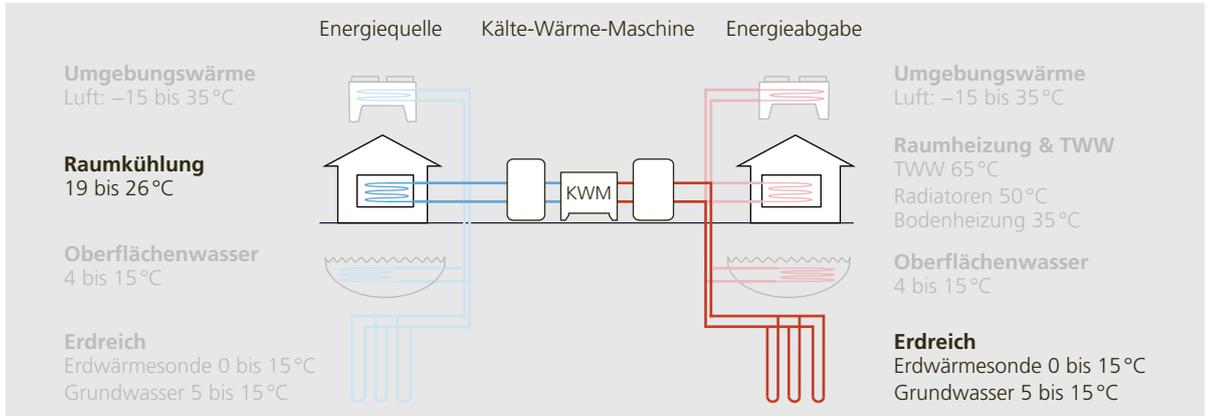
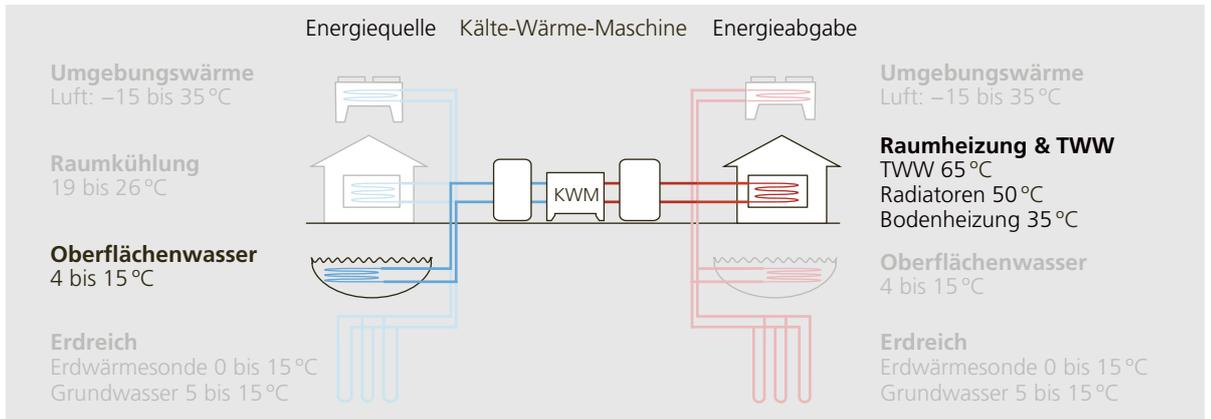


Bild 2.10:
Steht keine Wärme von der Raumkühlung zur Verfügung, kann mit Oberflächenwasser das Gebäude beheizt und das TWW erwärmt werden (Wärmepumpe).



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 2.11) sollte – über mehrere Jahre hinweg betrachtet – der eingelagerten Energiemenge entsprechen (Fläche 2 in Bild 2.11).

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 2.12 skizzierte Entscheidungsbaum aus der SIA 384/4 (2025) 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 Dienstleistungs- und Gewerbebetriebe sowie Wohnen kombinieren. Oder aber in komplexen Bauten wie Krankenhäusern. Die

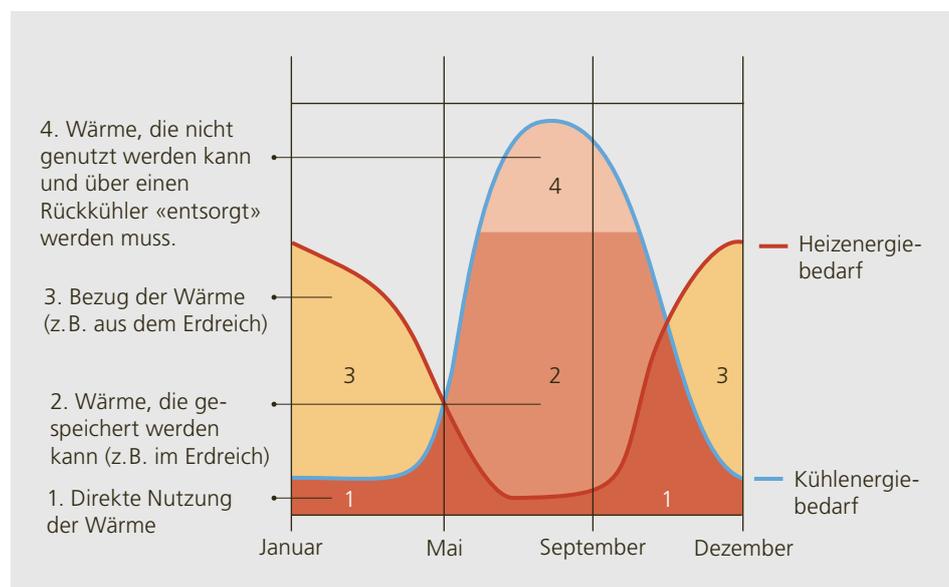


Bild 2.11:
Bei der saisonalen Speicherung wird (beispielsweise mittels Erdsonden) die Energie im Sommer in einem Geospeicher eingelagert und kann im Winter wieder bezogen werden.

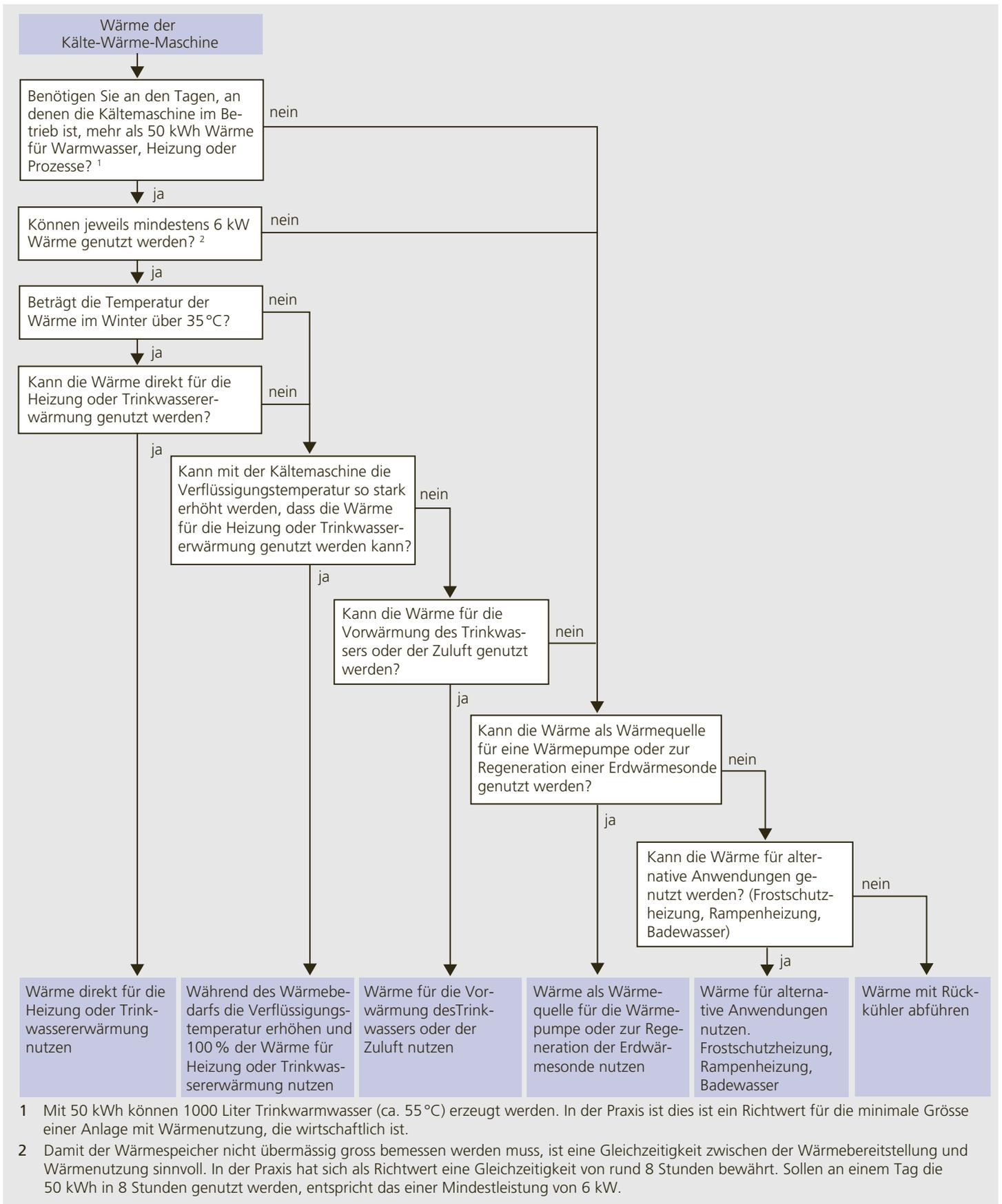


Bild 2.12: Entscheidungsbaum Wärmenutzung. Quelle: SIA 384/4 (2025)

Kälte-Wärme-Maschine funktioniert sowohl innerhalb eines Gebäudes wie auch in einem vernetzten Areal.

Konzeptionelle Überlegungen zur Erzeugung und Verteilung der Kälte

Abhängig von der Anwendung benötigen die Kälteverbraucher unterschiedliche Kaltwassertemperaturen. Bis vor wenigen Jahren wurde das ganze System oft auf eine Kaltwassertemperatur von 6°C ausgelegt und das Kaltwasser bei den Verbrauchern auf die notwendige Temperatur hochgemischt. Eine einfache Lösung mit einem gewichtigen Nachteil – ein solches System ist ineffizient. Es verursacht einen hohen Energieverbrauch und hohe Energiekosten. Darum regelt die SIA 384/4 (2025), bei welchen Bedingungen mehrere Kälteverteilssysteme erstellt werden müssen und wann mehrere Kälteerzeuger notwendig sind. Im Grundsatz gilt, dass ein Hochmischen von Kaltwasser möglichst zu vermeiden ist. Zudem darf die Kaltwasseraustrittstemperatur der Kälteerzeugung nicht tiefer sein als die Vorlauf-temperatur des Kälteverbrauchers mit dem tiefsten Temperaturniveau. Das Bild 2.13 zeigt, was bei der Systemwahl bei unterschiedlichen Kaltwassertemperaturen zu beachten ist.

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 selbstständig 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.

$$\begin{aligned} \text{Gesamtkosten} = & \text{Investitionskosten} \\ & + \text{jährliche Service-/Unterhaltskosten} \\ & \quad \text{während 15 Jahren} \\ & + \text{jährliche Energiekosten} \\ & \quad \text{während 15 Jahren} \end{aligned}$$

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

Investitions-, Service- und Unterhalts- sowie Energiekosten sind gewerkübergreifend zu erfassen und entsprechend zu op-

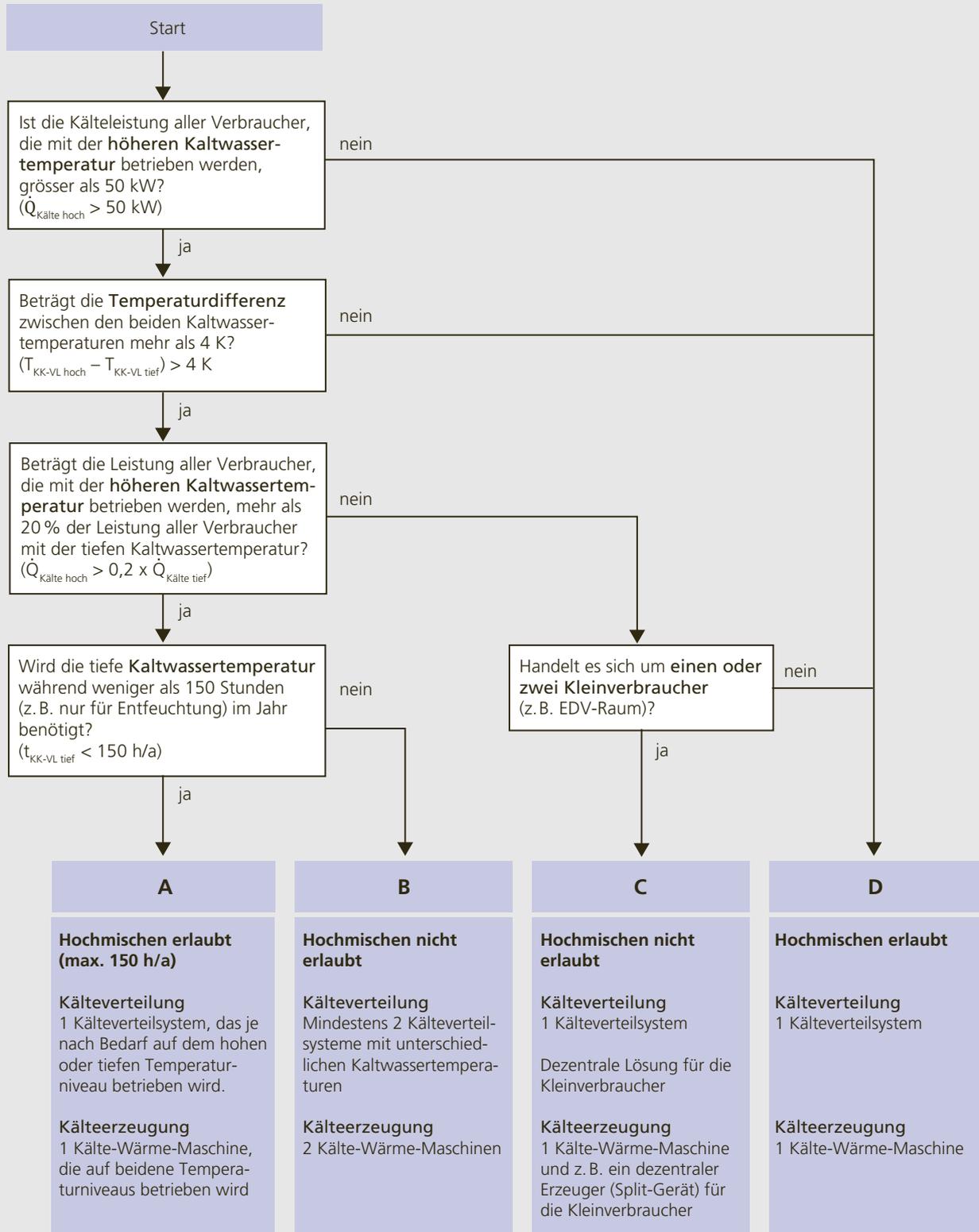


Bild 2.13: Systemwahl bei unterschiedlichen Kaltwassertemperaturen. Quelle: SIA 384/4 (2025)

timieren. 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).

Bei der Konzeption der Redundanz müssen bei Anlagen, die mit in der Luft stabilen Kältemitteln arbeiten, die Vorgaben des BAFU an die maximalen Kältemittelfüllmengen bei redundanten Systemen beachtet werden (siehe Vollzugshilfe).

Die Beurteilung der Verfügbarkeit soll sich jedoch nicht nur auf die Kältemaschine und die Verdichter beziehen. Auch andere Systeme, wie

- Kältemittelkreise
- Rückkühler
- Ventilatoren
- Umwälzpumpen
- Schaltschränke

und unter Umständen auch

- Elektroleitungen
 - Kälteverteilsysteme
 - Gebäudeautomation
- oder Konzeptionelles wie

- unterschiedlich Standorte der Kältemaschinen

müssen berücksichtigt werden, siehe auch SIA 384/4 (2025).

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).

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.

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 (NH₃, Ammoniak) und R744 (CO₂, 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. (siehe Exkurs «Photovoltaik und Klimakälte – eine ideale Kombination für die Schweiz» auf Seite 22). 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 104).

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».

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

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.

Vermeehrt 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.

Drehzahlgeregelte Verdichter

Die drehzahlgeregelten 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).

Exkurs

Photovoltaik und Klimakälte – eine ideale Kombination für die Schweiz



Bild 2.14: Die Klimakälteanlage kombiniert mit einer PV-Anlage. Bild CTA

Photovoltaik- (PV) und Klimakälteanlagen ergänzen sich in der Schweiz auf ideale Weise – sowohl technisch als auch energetisch. Die zeitliche Übereinstimmung von Stromproduktion und Kühlbedarf ist bestechend: Im Sommer, wenn die Sonneneinstrahlung am stärksten ist, liefern PV-Anlagen besonders viel Strom. Genau dann steigt auch der Bedarf an Kühlung in Gebäuden stark an (Bild 2.15). Auch über den Tagesverlauf passen die Kurven perfekt zusammen. PV-Anlagen erreichen ihre maximale Leistung am frühen Nachmittag – zur gleichen Zeit sind Klimakälteanlagen wegen der hohen Aussentemperaturen im Dauerbetrieb.

Im Winter, wenn der Strom knapp ist, brauchen Klimaanlage kaum Strom

Im Winter hingegen zeigt sich ein umgekehrtes Bild: Die Stromproduktion der PV-Anlagen ist tief, gleichzeitig besteht kaum Bedarf an Raumkühlung. Klimaanlage sind in dieser Zeit oft ganz ausgeschaltet, oder die entstehende Abwärme kann sogar zum Heizen genutzt werden. So belasten Klimaanlage in der kalten Jahreszeit das Stromnetz kaum – ein wesentlicher Vorteil für ein stabiles Stromsystem. Das ist ein deutlicher Unterschied zur Kombination von PV-Anlagen mit Wärmepumpen. Denn gerade im Winter, wenn die PV-Produktion gering ist, steigt

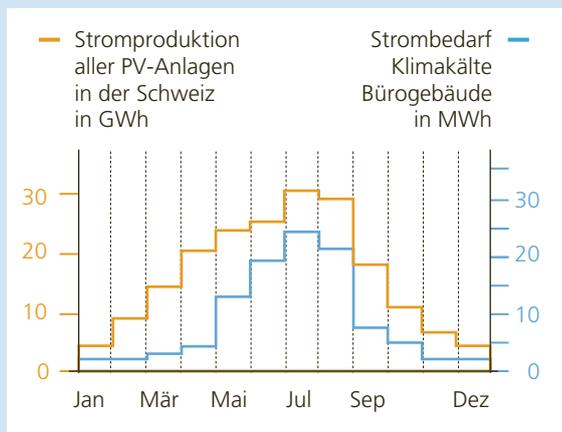


Bild 2.15: Die Stromproduktion aller PV-Anlagen in der Schweiz (2024) korreliert ideal mit dem Strombedarf eines typischen Bürogebäudes.

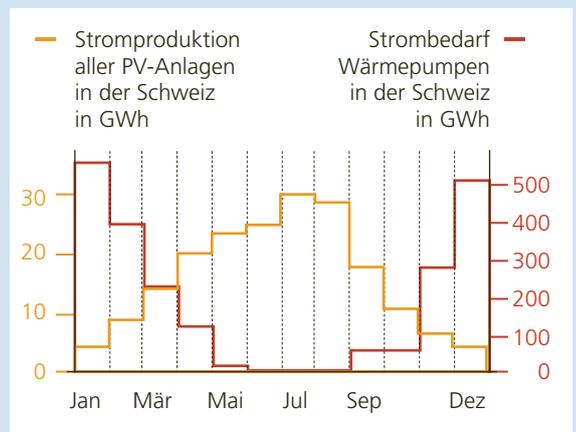


Bild 2.16: Damit der Strombedarf der Wärmepumpen in der Schweiz in den Wintermonaten mit PV-Strom gedeckt werden kann, müssen massiv PV-Anlagen zugebaut werden. Dadurch gibt es im Sommer auch massiv mehr Strom.

der Strombedarf für das Heizen stark an. In der Schweiz, wo die Versorgungssicherheit im Winter ohnehin angespannt ist, bedeutet dies eine zusätzliche Herausforderung. Wollen wir künftig unsere Wärmepumpen auch in den Monaten Dezember und Januar mit bis zu 100 % Solarstrom betreiben, müssen wir die PV-Produktion in diesen Monaten massiv erhöhen (Bild 2.16). Dadurch steigt aber auch die Produktionsmenge im Sommer. Klimaanlage wirken hier netzentlastend. Gleichzeitig erwärmen sie die Umwelt, sofern die Wärme nicht genutzt werden kann (vgl. Kälte-Wärme-Maschine). Der Bau einer PV-Anlage ist daher kein Freibrief für die Installation von Klimaanlage. Klimageräte – insbesondere auch Split-Systeme – erfordern stets sorgfältige Planung und einen verantwortungsvollen Betrieb.

Der Strompreis als Indikator für die Verfügbarkeit des Stroms

Auch ein Blick auf die Strompreise an der Strombörse EPEX Spot bestätigt das gute Zusammenspiel von PV und Klimakälte: Im Sommer sind die Marktpreise für Strom in der Regel tief – weil durch PV und Wasserkraft viel Strom verfügbar ist (Bild 2.17). Leider können die Konsumenten, von dieser Situation heute (noch) nicht finanziell profitieren.

Wer eine PV-Anlage auf dem eigenen Dach installiert hat, kann diesen Strom direkt nutzen, um Klimakälteanlagen zu betreiben. Damit senkt man die eigenen Stromkosten, kann die finanziell wenig attraktive Stromrücklieferung im Sommer deutlich senken und so den Eigenverbrauchsanteil erhöhen.

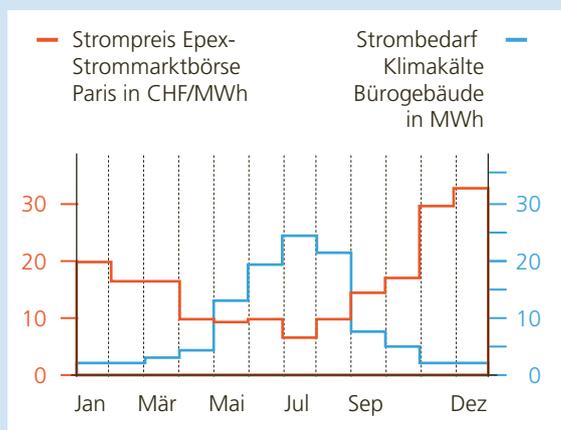


Bild 2.17: Der Strompreis an der Epex-Strommarkt Börse (2024) ist dann am tiefsten, wenn der Strombedarf der Klimakälteanlagen am grössten ist.

Die Kombination von Photovoltaik- und Klimakälteanlagen ist für die Schweiz eine gute Lösung. Dabei ist der Bau einer PV-Anlage kein Freibrief für die «wilde» Installation von Klimaanlage.

PV-Strom – ein Element einer klimafreundlichen Klimaanlage

Angesichts der immer heisser werdenden Sommer gewinnt die Klimatisierung in der Schweiz zunehmend an Bedeutung. Zwar wirken die negativen Erfahrungen mit voll klimatisierten Gebäuden aus den 1970er-Jahren noch nach – Klimaanlage gelten oft noch als unnötige Stromfresser. Doch letztlich geht es darum, in unseren Wohn- und Arbeitsräumen ein angenehmes und gesundes Raumklima zu schaffen. Während es völlig normal ist, die Gebäude im Winter mit Wärmepumpen auf 22°C zu heizen, wird das Kühlen eines Raumes auf 26°C im Sommer oft als Energieverschwendung wahrgenommen. Diese Haltung ist überholt: Mit moderner Technik kann die Raumkühlung heute effizient, nachhaltig und klimafreundlich gestaltet werden.

Entscheidend ist dabei die Art der Umsetzung. Eine moderne Klimakälteanlage nutzt idealerweise ihre Wärme, arbeitet mit einem natürlichen Kältemittel, begrenzt die Kühlung auf ein angenehmes, nicht übertrieben tiefes Temperaturniveau (zwischen 24°C und 26°C) und wird – zumindest teilweise – mit Strom aus der eigenen Photovoltaikanlage betrieben.

10 Merkmale 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.

Grundlagen

Der Kreisprozess ist der Schlüssel zum Verständnis der Kältemaschine. Die vier Phasen des Kreisprozesses nutzen die Temperatur-, Druck- und Aggregatzustandsänderungen 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 ge-

schlossenen Kreislauf nur von der Druckseite des Verdichters (Hochdruck) kommen.

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-Thomson-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 ($\dot{Q}_{\text{Kälte}}$) und eine heiße Seite, an der Wärme abgegeben wird ($\dot{Q}_{\text{Wärme}}$). Wenn

Sensible und latente Wärme

Eine Wärmezufuhr, die zu einer Änderung der Temperatur führt, das heisst 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.

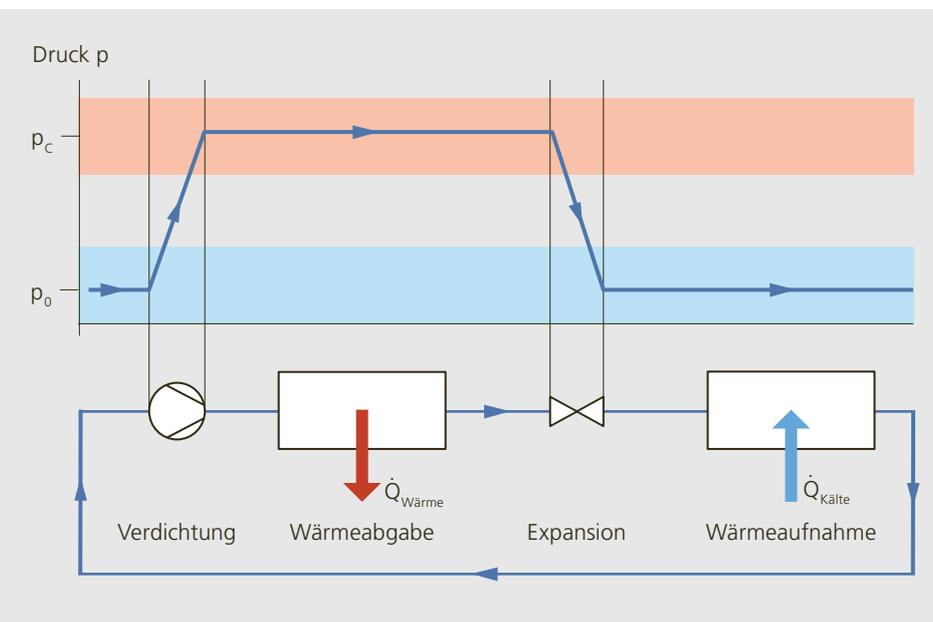


Bild 3.1:
Schema mit den vier Haupt-Komponenten des Kältekreislaufes und den beiden Druckniveaus innerhalb des Kreislaufs.

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, Wärmeaufnahme) 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).

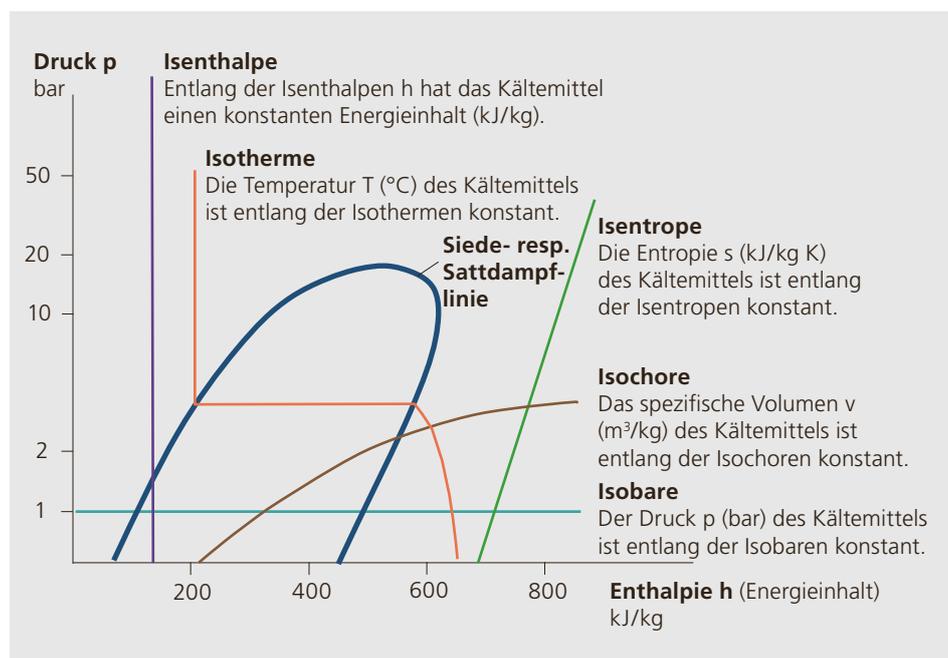
Anhand des Kältemittel-Energieinhalts kann der Kälteprozess nun über die Niveaus von Hoch- und Niederdruck und unter Angabe der Enthalpie berechnet werden. Es bietet sich daher an, den Kälteprozess in einem Druck-Enthalpie-Diagramm darzustellen (Bild 3.2). Hoch- und Niederdruck sind dann sofort zu erkennen 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 verschie-
denen Linien mit
konstanten Zustands-
grössen.



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 $\text{kJ}/(\text{kgK})$ 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 $A \rightarrow B$). 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 $B \rightarrow A$). 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.

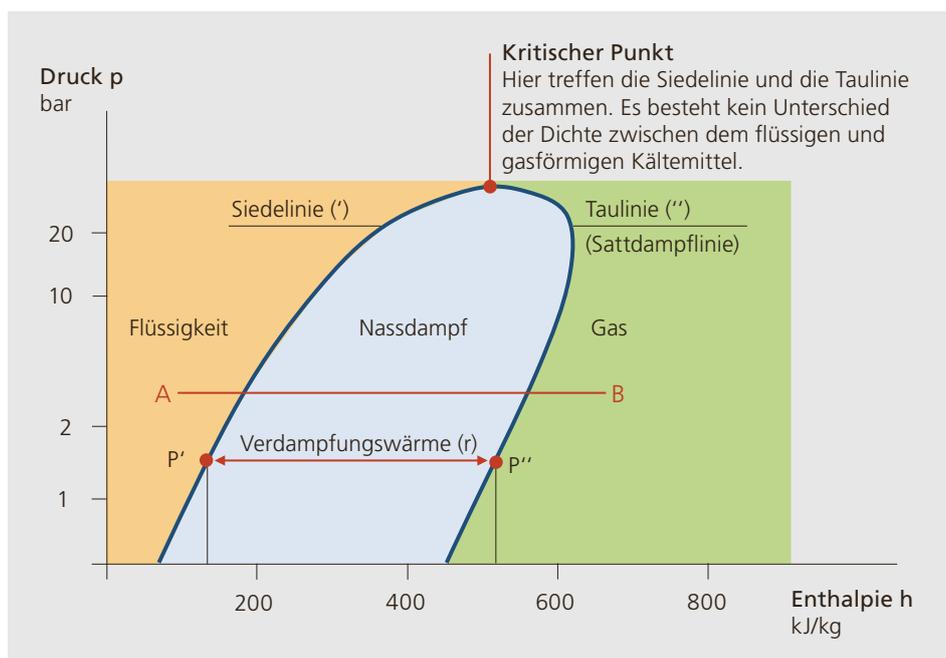


Bild 3.3:
Das $\log p, h$ -Diagramm mit dem Nassdampfgebiet, in dem Flüssigkeit und Dampf gleichzeitig vorliegen. Die Enthalpie-Differenz zwischen dem Punkt an der Siedelinie (P') und dem Punkt auf der Taulinie (P'') ist die Verdampfungswärme (r).

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 Dampfmaschine¹ existieren muss – quasi die Erfindung der Kältemaschine respektive der Wärmepumpe.

Der Carnot-Prozess besteht aus zwei Teilprozessen, die bei konstanter Entropie verlaufen (isentropie Verdichtung und isentropie 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 $\dot{Q}_{\text{Kälte}}$) – 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:

$$\epsilon_{\text{c Kälte}} = \frac{T_0}{(T_c - T_0)}$$

Gleichung 3-1

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

Die Temperaturen sind in der absoluten Temperaturskala Kelvin (K) einzusetzen ($0^\circ\text{C} = 273,15\text{ K}$).

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 Kühlttemperatur 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 ($\dot{Q}_{\text{Wärme}}$). Das hat zur Folge, dass die Carnot-Leistungszahl einer Wärmepumpe $\epsilon_{\text{c WP}}$ mit der Verflüssigungstemperatur T_c berechnet wird:

$$\epsilon_{\text{c WP}} = \frac{T_c}{(T_c - T_0)}$$

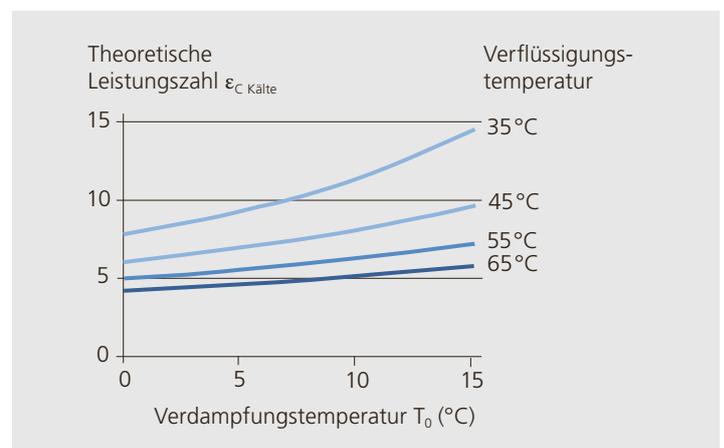
Gleichung 3-2

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

$$\epsilon_{\text{c Wärme}} = \epsilon_{\text{c Kälte}} + 1$$

Gleichung 3-3

Bild 3.4:
Theoretische Leistungszahlen einer Kältemaschine $\epsilon_{\text{c Kälte}}$ bei verschiedenen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen in $^\circ\text{C}$.



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 Aggregatzustandsänderung 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

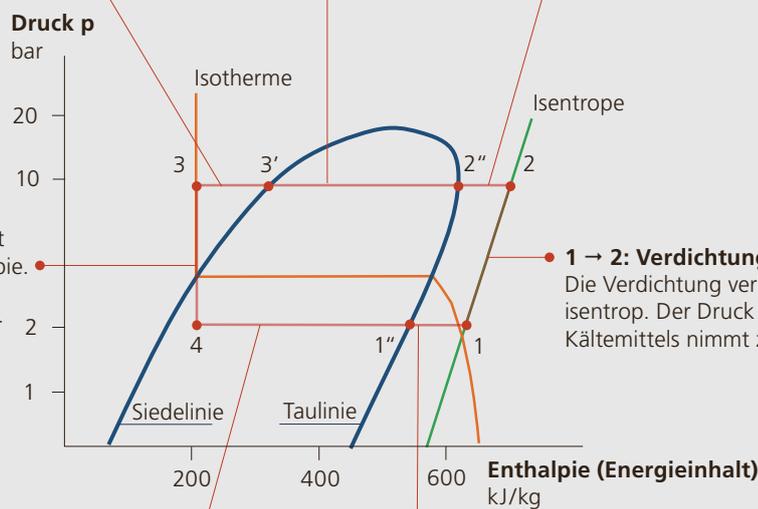
Im Verflüssigungsbereich wird bei konstanter Temperatur (hier ca. 60 °C) die Wärme abgegeben.

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.



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 Aggregatzustand 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 $\dot{Q}_{\text{Kälte}}$ die abgeführte Wärmeleistung $\dot{Q}_{\text{Wärme}}$ und die zugeführte

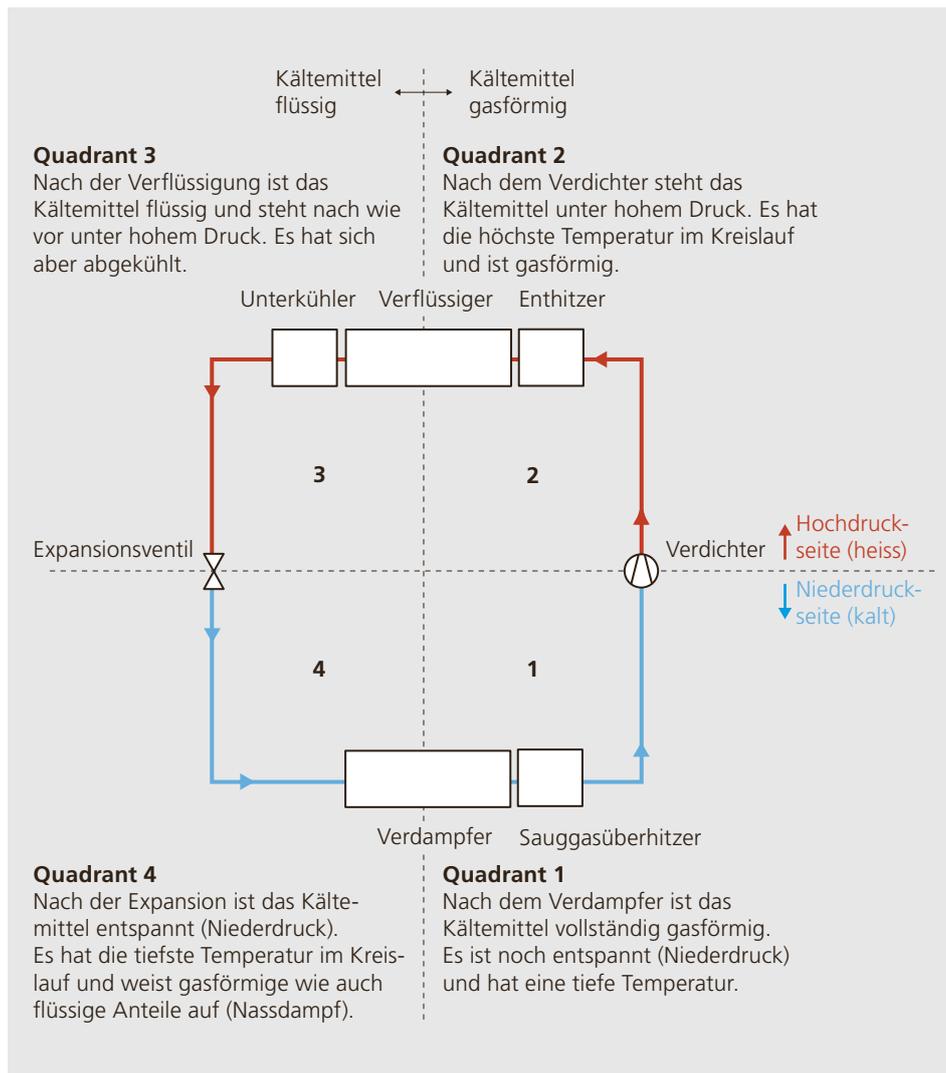


Bild 3.6:
Druck- und
Temperatur-
verhältnisse in der
Kompressions-
kältemaschine.

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

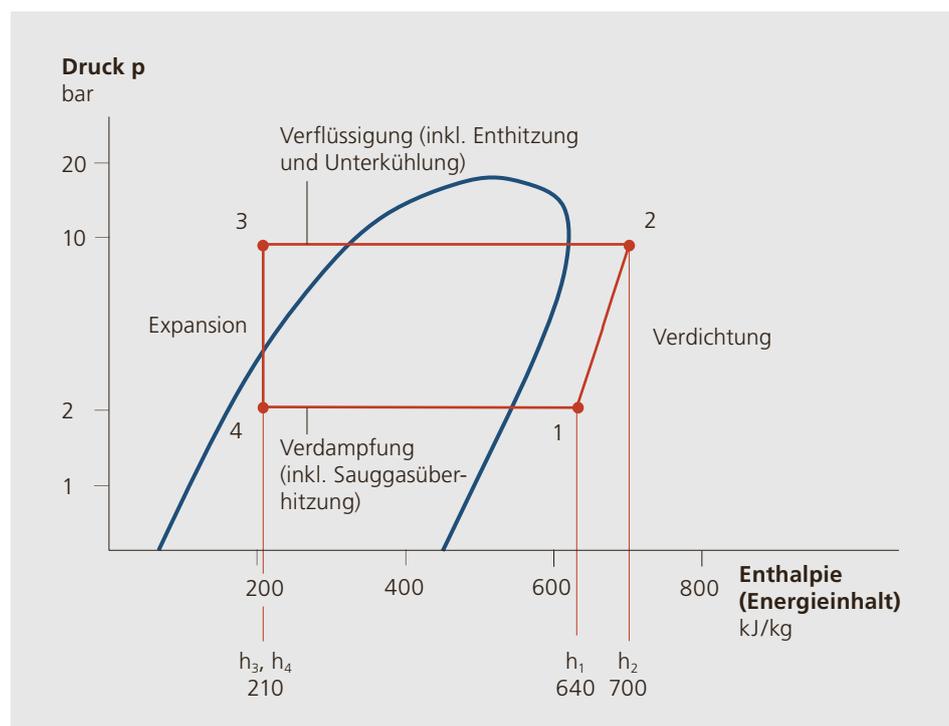


Bild 3.7:
Beispiel einer Leistungsbilanz über die gesamte Maschine. Berechnung gemäss Gleichung 3-5: $(640 \text{ kJ/kg} - 210 \text{ kJ/kg}) + (700 \text{ kJ/kg} - 640 \text{ kJ/kg}) = 700 \text{ kJ/kg} - 210 \text{ kJ/kg}$.

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 Kältemittel-seite 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

$$\dot{Q}_c \text{ Wärmeträger} = \dot{m}_W (h_{AW} - h_{EW})$$

Primärseite

$$\dot{Q}_c \text{ Kältemittel} = \dot{m}_K (h_{K \text{ ein}} - h_{K \text{ aus}})$$

Bilanz

$$\dot{Q}_c \text{ Wärmeträger} = - \dot{Q}_c \text{ Kältemittel}$$

Daraus folgt

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

Gleichung 3-6

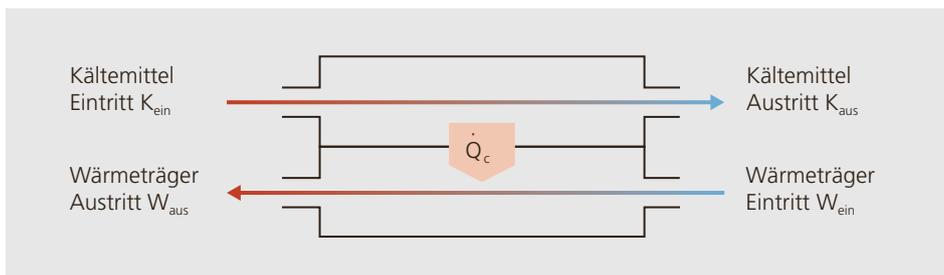
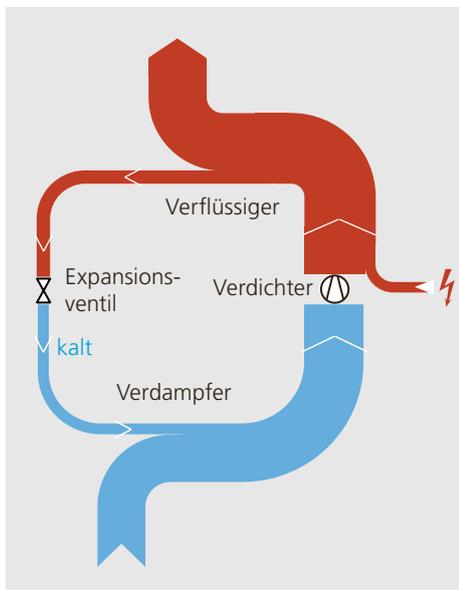
- h_{EW} Enthalpie Wärmeträger ein
- h_{AW} Enthalpie Wärmeträger aus
- \dot{m}_W Massenstrom Wärmeträger
- $h_{K \text{ ein}}$ Enthalpie Kältemittel ein
- $h_{K \text{ aus}}$ Enthalpie Kältemittel aus
- \dot{m}_K Massenstrom Kältemittel

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 Aggregatzustandsänderung stattfindet, kann eine Enthalpiedifferenz annähernd mit der Wärmekapazität c und der Temperaturdifferenz berechnet werden.

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.

Bild 3.8: Energieflussdiagramm der Kompressionskältemaschine.



Für die Wärmeträgerseite gilt somit:

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

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).

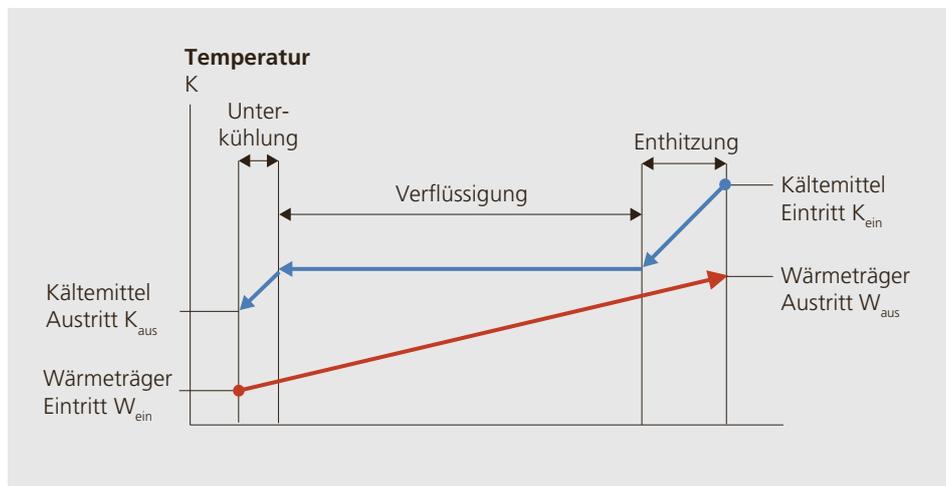


Bild 3.10: Beispiel für reale Temperaturverläufe im Verflüssiger: Kältemittel (rot) und das Wärmeaufnahme-medium (blau).

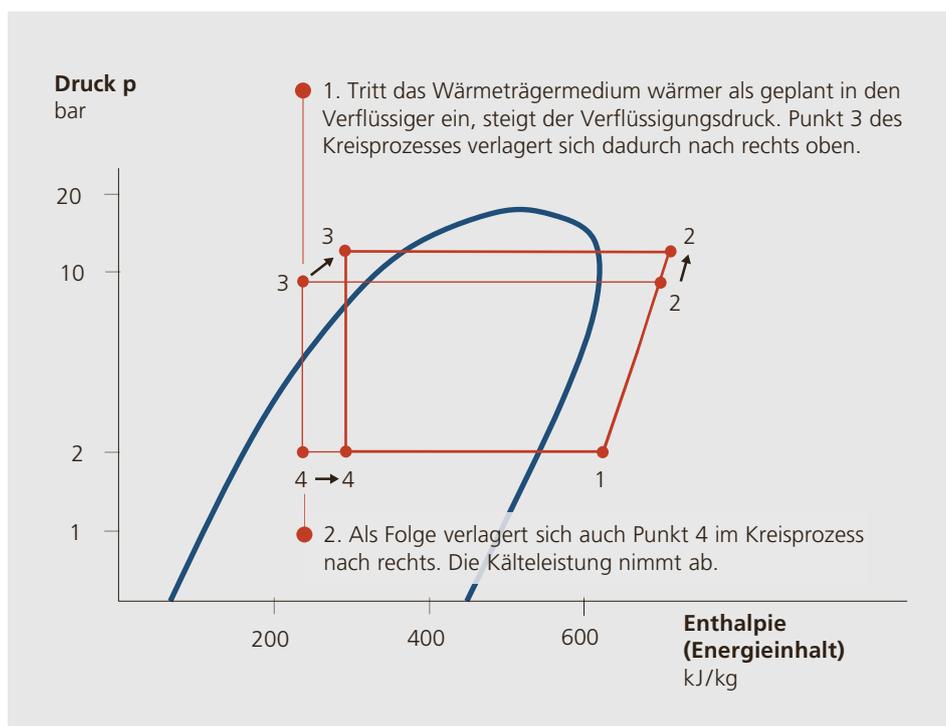


Bild 3.11: Beispiel der Auswirkung einer höheren Eintrittstemperatur des Wärmeträgers auf die Kälteleistung. Kann die Wärme nicht bei der optimalen Temperatur abgegeben werden, reduziert sich die Kälteleistung.

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, Kohlenwasserstoffe oder Ammoniak. Neben der technischen Beherrschbarkeit war die Dichtheit der Anlagen ein Problem. Erste gängige Kältemittel im 19. und frühen 20. Jahrhundert waren zum Teil giftig oder schnell entflammbar. Ein möglicher Austritt des Kältemittels in die Umgebung bedeutete daher eine Gefahr (ver-

gleiche 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: Ozonabbau-potenzial 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	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Verdampfungsenthalpie • Dampfdruck bei den Arbeitstemperaturen auf technisch gut beherrschbarem Niveau • Niedrige Viskosität
Chemisch	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische und thermische Beständigkeit • Gute Werkstoffverträglichkeit • Gute Verträglichkeit mit Maschinenölen
Ökologisch	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Ozonschichtzerstörung (ODP = 0) • Geringes Treibhauspotenzial (GWP = 0, kleiner TEWI)
Physiologisch	<ul style="list-style-type: none"> • Ungefährlicher Umgang
Ökonomisch	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Verfügbarkeit • Geringe Kosten

Bild 3.12: Anforderungen an das Kältemittel bei der Auswahl.

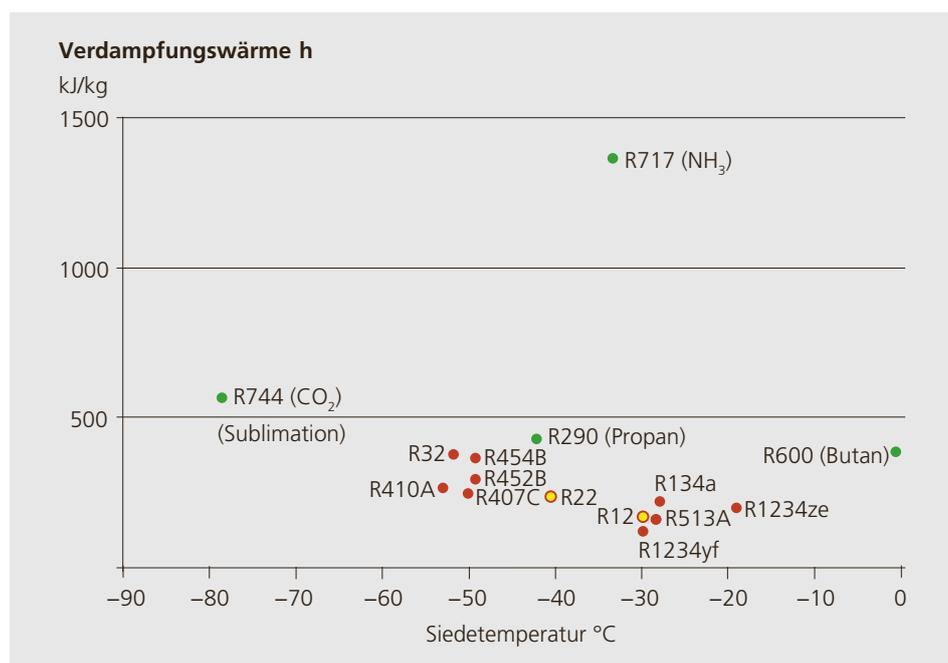


Bild 3.13: Verdampfungswärme und Siedetemperatur von Kältemitteln bei Umgebungsdruck (p = 1,013 bar). Achtung, die Kältemittel R12 und R22 sind verboten, sie werden jedoch häufig als Vergleichswerte beigezogen. Darum werden sie hier ebenfalls aufgeführt.

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 (mit Entfeuchtung) notwendige Verdampfungstemperatur 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 Beherrschung entsprechender Fertigungsverfahren.

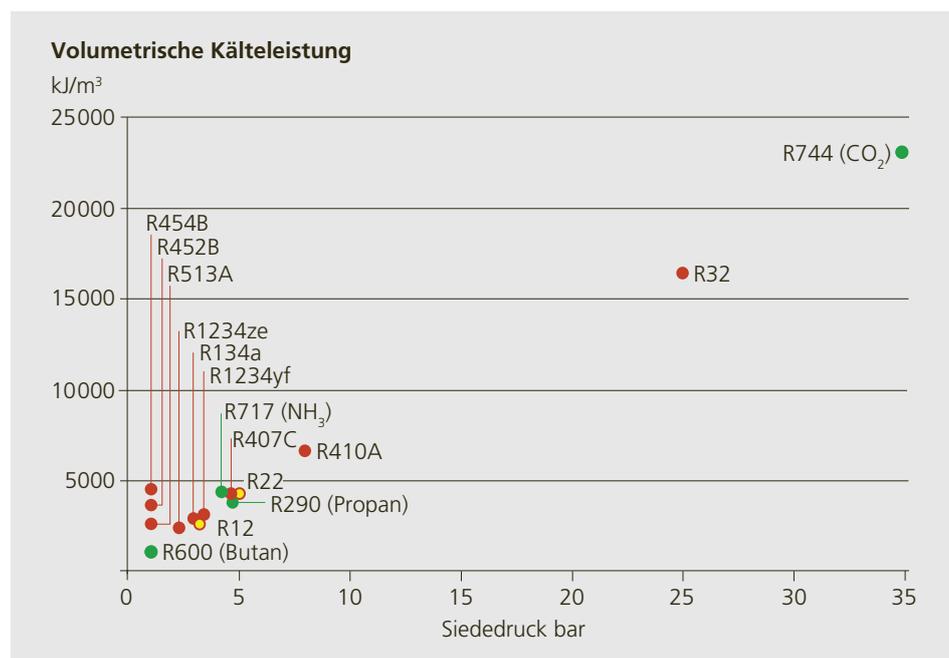


Bild 3.14: Maximale volumetrische Kälteleistung von verschiedenen Kältemitteln (theoretischer Wert mit $(h'' - h')$ bei 0°C). Je nach Betriebsbedingungen ändert die volumetrische Kälteleistung des Kältemittels. Werte, wie sie in der Praxis bei Klimakälteanlagen üblich sind, finden sich in Bild 3.17.

Ammoniak bietet eine rund dreimal grössere Verdampfungswärme als andere Kältemittel und ermöglicht daher grössere Kühlleistungen bei sinnvollen Kältemittel-massenströmen. 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 CO₂ auf, das allerdings höhere Betriebsdrücke benötigt. Zudem ist bei CO₂-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 4.2) erläutert.

Für die 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 CO₂ (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 CO₂ wird nicht künstlich erzeugt, sondern ist bereits in der Umwelt vorhanden. Damit kann es für die Auswirkung auf die Atmosphäre neutral bewertet werden.

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

Brennbarkeit		Toxizität	
		gering toxisch (geringe Toxizität) Klasse A	hoch toxisch (höhere Toxizität) Klasse B
hoch entflammbar	Klasse 3	A3	B3
entflammbar	Klasse 2	A2	B2
schwer entflammbar	Klasse 2L	A2L	B2L
nicht entflammbar	Klasse 1	A1	B1

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 CO₂-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 Rezyklierung beim Rückbau der Anlage. Der TEWI-Wert steht also für die äquivalente CO₂-Menge, die während der Lebensdauer einer Anlage freigesetzt wird. Der TEWI berechnet sich wie folgt:

$$\text{TEWI} = \text{GWP}_{\text{Betrieb}} + \text{GWP}_{\text{Leckage}} + \text{GWP}_{\text{Rückbau}}$$

Dabei ist der indirekte Anteil (CO₂-Ausstoss durch Elektrizitätsverbrauch) erfasst mit

$$\text{GWP}_{\text{Betrieb}} = n E b$$

- n Lebensdauer der Anlage (Jahre)
- E Energiebedarf der Anlage (kWh/Jahr)
- b CO₂-Inhalt des genutzten Strommixes (kg CO₂/kWh)

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

$$\text{GWP}_{\text{Leckage}} = \text{GWP}_{\text{KM}} L n$$

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

$$\text{GWP}_{\text{Rückbau}} = \text{GWP}_{\text{KM}} m (1 - a)$$

- 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 NH₃
- R290 Propan C₃H₈
- R744 Kohlendioxid CO₂

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 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
- R410A

Das Kältemittel R407C ist ein Gemisch 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 ($\text{CO}_2=1$; Ammoniak=0; Propan=3). Aufgrund der chemischen Eigenschaften von HFO sind ebenfalls Sicherheitsmassnahmen bei der Aufstellung zu treffen. Sie sind der Sicherheitsklasse A2L zugeordnet,

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 Februar 2025. Das Treibhauspotential 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).

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. Eine mögliche Einschränkung der Verwendung von HFO-Kältemitteln in den nächsten Jahren wird momentan (2025) diskutiert.

Für den beruflichen oder gewerblichen Umgang mit Kältemitteln braucht es eine Fachbewilligung.

F-Gas-Verordnung und ChemRRV

Das Hauptziel der F-Gas-Verordnung (EU) 2024/573 ist die schrittweise Reduktion von Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase), die vor allem als Kältemittel in Kühl- und Klimaanlage aber auch in Wärmepumpen eingesetzt werden. Dies soll durch Einschränkungen bei der Verwendung und dem Inverkehrbringen sowie durch die Förderung klimafreundlicher Alternativen erreicht werden.

In der Schweiz regelt die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) den Umgang mit F-Gasen. Sie wird laufend an die EU-Vorgaben angepasst – meist mit etwas strengeren Anforderungen, um zu verhindern, dass klimaschädliche Geräte, die in der EU nicht mehr zulässig sind, in die Schweiz gelangen.

Die EU gibt bei der Verschärfung der Vorschriften den Takt vor. Aktuell (Stand 2025) gelten folgende Vorgaben:

- ab 2027: Maximaler GWP von 750 bei Anlagen mit > 12 kW Leistung
- ab 2032: Verbot von F-Gasen in Klimakälteanlagen mit ≤ 12 kW Leistung

Die EU behält sich das Recht diese Termine zu ändern, wenn es zu Lieferschwierigkeiten bzw. Fertigkeitsprobleme kommt. Der Trend ist eindeutig: Der Einsatz von F-Gasen wird weiter eingeschränkt – mit dem Ziel, mittelfristig vollständig auf natürliche Kältemittel umzustellen.

Sicherheitsrelevante Kenndaten von Kältemitteln	
Praktischer Grenzwert	Die höchste Konzentration eines Kältemittels in der Luft in einem Personenaufenthaltsbereich, bei der weder die Flucht beeinträchtigt wird, noch eine Entzündungsgefahr besteht. Dieser Grenzwert wird in kg Kältemittel pro m ³ Luft angegeben.
ATEL	Acute Toxicity Exposure Limit (Akute Toxizitätsgrenze) Der ATEL ist die höchste Konzentration eines Kältemittels in der Luft, bei der eine kurzfristige Exposition (z. B. durch ein Leck) noch keine akuten gesundheitlichen Schäden beim Menschen verursacht. Wird dieser Wert überschritten, besteht akute Vergiftungsgefahr.
ODL	Oxygen Deprivation Limit (Sauerstoffverdrängungsgrenze) Der ODL-Wert beschreibt die Konzentration eines Kältemittels, ab der der Sauerstoffgehalt in der Luft so stark verdrängt wird, dass Erstickungsgefahr besteht. Viele Kältemittel wie Propan, Isobutan, R134a oder R410A sind schwerer als Luft und verdrängen den Sauerstoff – oft ohne Geruch oder sichtbare Warnzeichen, was sie besonders gefährlich macht.
ATEL/ODL	Da sowohl Toxizität (ATEL) als auch Sauerstoffverdrängung (ODL) lebensgefährlich sein können, wird zur Sicherheitsbewertung immer der jeweils niedrigere Wert herangezogen. Dieser wird als ATEL/ODL-Wert bezeichnet und dient als Grundlage für die Berechnung sicherer Kältemittel-Füllmengen.
LFL	Lower Flammability Limit (Untere Entzündbarkeitsgrenze) Der LFL ist die niedrigste Konzentration eines Kältemittels in der Luft, bei der ein entzündbares Gemisch entsteht. Dieser Wert ist entscheidend zur Bewertung von Brand- und Explosionsgefahren und wird insbesondere bei brennbaren Kältemitteln zur Bestimmung der maximal zulässigen Füllmenge verwendet.

Bild 3.16: Erläuterungen zu den sicherheitsrelevanten Kenndaten der Kältemittel.

Die wichtigsten Kältemittel in der Klimakälte

Kältemittel	GWP	Volumenstrombezogene Kälteleistung	Temperaturbereich einer wirtschaftlichen Abwärmenutzung	Praktischer Grenzwert	Sicherheitsklasse	Toxizität	Brennbarkeit
	[1]	kJ/m ³ [2]	°C [3]	kg/m ³ [4]	(Seite 16) [5]	(ATEL/ODL) [6]	(LFL) [7]

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

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

Synthetische, in der Luft stabile Kältemittel

Das Inverkehrbringen von Anlagen mit synthetischen, in der Luft stabilen Kältemitteln wird voraussichtlich ab 2027 nicht mehr erlaubt sein. Zudem ist die zukünftige Verfügbarkeit dieser Kältemittel ungewiss.

R32	675	5300	35–45 (max. 55)	0,061	A2L	gering toxisch	schwer 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
R454C	146	2875	30–45 (max. 55)	0,059	A2L	gering toxisch	schwer entflammbar
R513A	631	2050	30–40 (max. 75)	0,35	A1	gering toxisch	nicht entflammbar
R515B	287	1498	30–45 (max. 70)	0,29	A1	gering toxisch	nicht entflammbar

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

[2] Werte gelten für t₀ = 0°C, t_c = 40°C

[3] Richtwerte der Abwärmepotenziale, bei denen die Wärmeenergie zu einem Wärmepreis von weniger als 2 Rp./kWh ausgekoppelt werden kann. Je nach Verdichtertyp und Anlagekonzept sind auch nutzbare Abwärmepotenziale 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 Prozent 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 CO₂ ist die Rücklauftemperatur (Eintrittstemperatur des CO₂ in den Gaskühler/Verflüssiger) entscheidend. Diese muss möglichst tief sein (Faustregel immer unter 35°C).

10 Merkmale 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. Je näher zusammen die Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur liegen, desto effizienter wird der Kreisprozess. Dies gilt auch für steigende Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen 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 Kältemitteln ist gesetzlich reglementiert. Personen, welche mit Kältemitteln umgehen, bedürfen gemäss ChemRRV einer Fachbewilligung.

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: Baustatik-Ingenieurin, Bauphysikerin und Fassadenplanerin.

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 384/4 (2025) definiert, welche die Kälte-träger-Temperaturen aus energetischen Gründen vorgibt. Diese dürfen nicht un-

terschritten werden und liegen zwischen 10°C und 18°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 (siehe Kapitel 7.6 Rückkühlung).
- Der Legionellenschutz im Trinkwarmwasser ist entsprechend zu beachten.

Kälte-träger-Temperaturen der Norm SIA 384/4 (2025) richtig interpretieren

Für eine typische Gewerbeliegenschaft oder auch ein Krankenhaus im schweizerischen Mittelland ist es nicht unbedingt notwendig, eine Kälte-träger-Vorlauftemperatur gemäss Norm SIA 384/4 (2025) von genau 10°C zu planen. Folgendes Beispiel zeigt, wie auch höhere, optimierte Temperaturen zu guten Lösungen führen können.

Wird die Kälte-träger-Temperatur mit einer Vorlauftemperatur von 12°C definiert (statt 10°C), so ermöglicht dies einen Zuluft-Taupunkt von 14°C. Damit kann für die Kühldecken eine Vorlauftemperatur des Kühlmediums von 14°C durch eine Vorlauftemperatur-Regelung 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, wirtschaftlichen Leistungen pro Flächeneinheit (siehe auch Kapitel 6.4). Muss eine kon-

densatfreie 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 Kondensatfreiheit 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 Ausstemperaturen 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, CO₂) 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, 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 unterbrechungsfrei 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.) so-

wie 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. 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 Know-how 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.

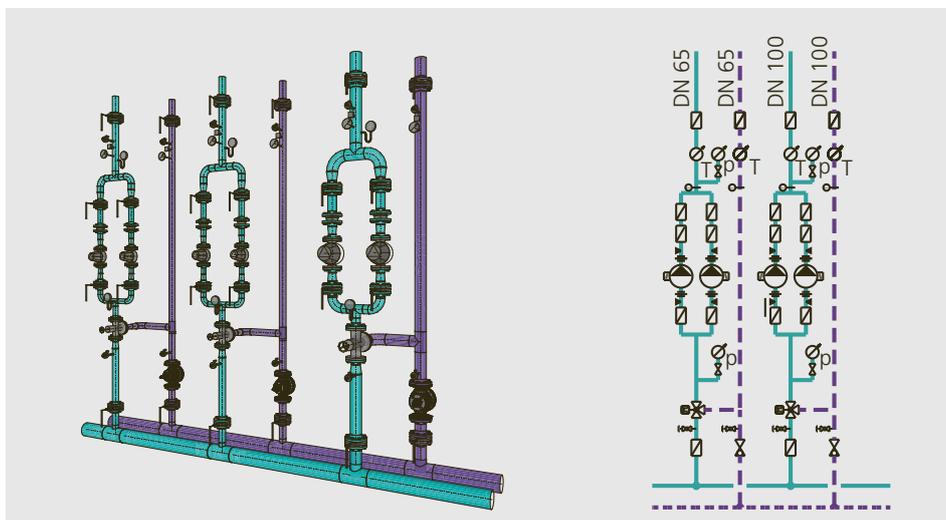


Bild 4.1:
Kälteverteiler mit redundant angeordneten Gruppenpumpen und im Rücklauf angeordneten Volumenstrom-Begrenzern. Die Komponenten sind so zu installieren, dass die Pumpen im Betrieb ausgewechselt werden können.

4.3 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.

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).

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 Kältemitteln direkt gekühlt werden.

Einige wichtige Grundsätze am Beispiel eines Maschinenraums

Für die Kältemittel der Klassen A1 und A2L sind unten die wichtigsten baulichen Massnahmen beschrieben.¹ 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 und am besten ein erfahrener Planer beigezogen wird. Zudem sind die in der SN EN 378 im nationalen Vorwort erwähnten Dokumente zu beachten (z. B. SUVA-Merkblatt 66139).

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.

* siehe SN EN 387-3

Notmassnahmen

Alle Maschinenräume müssen mit Kältemittel-Detektoren ausgerüstet werden, sofern der Toxizitätswert (ATEL) oder der untere Grenzwert der Brennbarkeit (LFL) gemäss SN EN 378 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*)

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

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

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/m^3), 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.

Aufstellen im Freien

Wird die Kälteanlage im Freien aufgestellt, sind bei den Kältemitteln der Klasse A1 und A2L unter anderem folgende Punkte zu beachten:

- Bei einem Leck darf das Kältemittel nicht in Bodenabläufe, Lüftungsöffnungen (z. B. Zuluftkanal), über Türen oder Dachöffnungen ins Gebäude eindringen (SN EN 378-3 Punkt 4.2).
- Kann sich austretendes Kältemittel ansammeln (z. B. Aufstellung in einer begehbaren Vertiefung), sind weitere Anforderungen wie eine Belüftung, Gas-Detektoren etc. einzuhalten (SN EN 378-3 Punkt 4.2)
- Bei Anlagen mit mehr als 25 kg Kältemittelfüllung (mit in der Luft stabilen Kältemitteln) sind zudem Detektoren, eine Alarmierung etc. erforderlich (BAFU-Vollzugshilfe, Abschnitt 4.4.3).

Voraussichtlich sind ab 2027 bei Anlagen mit einer Füllmenge von 500 Tonnen CO₂-Äquivalente und mehr Detektoren, Alarmierung etc. erforderlich.

Details zum Aufstellen im Freien siehe SN EN 378-3: 4.2.

Sicherheitstechnische Grundsätze am Beispiel eines Maschinenraums

Für die Kältemittel der Klassen A1 und A2L sind im Bild 4.2 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 eine Planerin oder einen 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 4.3 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.¹

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

¹ 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 Alles im Personen-Aufenthaltsbereich:** 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 Alles im Maschinenraum oder im Freien:** Alle kältemittelführenden Teile befinden sich in einem Maschinenraum oder im Freien.
- Klasse IV Belüftetes Gehäuse:** 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
2. Basis Brennbarkeit vergleiche Tabelle C2

Der kleinere der beiden Werte bestimmt die maximal erlaubte Füllmenge.

Mit der kostenpflichtigen elektronischen Planungshilfe SN EN 378 des SVK lassen sich die Anforderungen an die maximale Kältemittel-Füllmenge und die erforderlichen Sicherheitsausstattungen systematisch ermitteln.

Bild 4.3:
Die fünf Schritte, mit denen die maximal erlaubte Kältemittelfüllmenge für eine Klimakälteanlage bestimmt wird.

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.

4.4 Anlagen mit Propan und Isobutan

Propan und Isobutan sind natürliche Kältemittel, die künftig eine zentrale Rolle in Klimakälteanlagen spielen dürften. Mit einem Treibhauspotenzial (GWP) von nur 3 gelten sie als besonders klimaschonend. Ihr Nachteil liegt jedoch in ihrer Brennbarkeit – beide gehören zur Sicherheitsklasse A3. Deshalb ist beim Einsatz besonderer Wert auf den Brand- und Explosionsschutz zu legen, um Personen und Sachwerte zu schützen.

Neben ihrer hohen Entzündlichkeit sind Propan und Isobutan schwerer als Luft. Bei einer Leckage sammeln sie sich daher an tief liegenden Stellen. Dies ist sowohl bei der Aufstellung im Gebäude (z.B. im Untergeschoss) als auch im Freien zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an den Aufstellungsort sowie die nötigen Sicherheitsmassnah-

men sollten frühzeitig mit dem Lieferanten abgestimmt oder anhand der Norm SN EN 378-3 sowie der SUVA-Merkblätter 2153 und 66139 ermittelt werden.

Gefahrenbereich definieren

Es gibt keine einfache Standardlösung für die Platzierung von Anlagen mit Kältemitteln der Sicherheitsklasse A3. Die erforderlichen Schutzmassnahmen hängen wesentlich von der Füllmenge, dem Aufstellungsort (innen oder aussen), den in der Maschine respektive im belüfteten Gehäuse bereits implementierten Sicherheitselementen, dem Raumvolumen sowie der notwendigen Lüftung ab.

Rund um alle kältemittelführenden Komponenten sowie an den Austrittsstellen von Sicherheitseinrichtungen (z.B. an der Ablassleitung) ist ein Gefahrenbereich festzulegen (siehe Bild 4.5). Innerhalb dieses Bereichs dürfen sich keine Zündquellen befinden. Als Zündquellen gelten unter anderem elektrische Einrichtungen (z.B. Leuchten, Steckdosen), Fahrzeuge, offene Flammen oder funkenbildende Werkzeuge.

Zudem ist sicherzustellen, dass austretendes Kältemittel sich im Gebäude nicht verteilen oder in das Gebäude eindringen kann – weder durch Türen, Fenster, Lichtschächte, Lüftungsöffnungen (Zu- und Abluft), Dachabläufe noch über Einläufe der Kanalisation. Im Aussenbereich darf sich das Kältemittel auch nicht in Senken oder Vertiefungen ansammeln können. Zudem muss der Austritt der Ablassleitung und des Lüftungskanals aus dem Raum respektive dem belüfteten Gehäuse beachtet werden. Dieser Bereich gilt in der Regel

Kältemittel-Füllmenge Anlagen im Gebäude	Wichtige Anforderungen
unter 0,15 kg	Kältemittel-Füllmengen unter 0,15 kg (Propan 0,153; Isobutan 0,172 kg) gelten als «unbedenklich», und es sind keine zusätzlichen Schutzmassnahmen notwendig.
0,15 kg bis 1,5 kg	Hier ist eine standardisierte Gefahrenbeurteilung nötig, abhängig von Aufstellungsort (z.B. UG, Lüftung), Zugangsbereich (SN EN 378-Klassifikation).
über 1,5 kg	Hier gilt zwingend die EKAS 6517. Es ist eine vollständige Risikobeurteilung notwendig. Zudem ist ein Explosionsschutzdokument gemäss SUVA-Merkblatt 2153 erforderlich.

Bild 4.4:
Je nach Kältemittel-Füllmenge müssen bei den Kältemitteln der Klasse A3 unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden.

als ATEX-Zone 2 (eine explosionsfähige Atmosphäre tritt im Normalbetrieb selten oder kurzzeitig auf), darum müssen entsprechend Sicherheitsabstände zwingend auch hier eingehalten werden.

Der Gefahrenbereich und die notwendigen Sicherheitsabstände (siehe Bild 4.5, Masse x, y und z) muss die Planerin gemeinsam mit der Herstellerin/Lieferantin, der Brandschutzbehörde, der SUVA und der Umweltbehörde definieren.

Aufstellung im Freien

Bei aussen aufgestellten Anlagen ist sicherzustellen, dass bei Leckagen kein Kältemittel ins Gebäude eindringen kann. Zudem dürfen keine Personen und angrenzende Gebäude gefährdet werden. Speziell zu beachten ist zudem, dass sich in «Senken» kein Kältemittel ansammeln kann. Hier gelten die Vorgaben der SN EN 378.

Aufstellung im Gebäude

Bei Innenaufgestellten Anlagen muss die maximal erlaubte Kältemittel-Füllmenge bestimmt werden (Bild 4.3). Wird die maximal erlaubte Füllmenge überschritten, muss ist eine Risikoermittlung durchgeführt und Zusatzmassnahmen wie

- Erstellen eines Maschinenraums
- Belüftung des Aufstellbereichs
- Gaswarnanlage (Kältemittelüberwachung) usw. ergriffen werden.

In Anlagen in Untergeschossen muss in der Regel am tiefsten Punkt an dem sich Kältemittel ansammeln kann, ein Gasdetektor sowie ein akustischer und visueller Alarm vorgesehen werden.

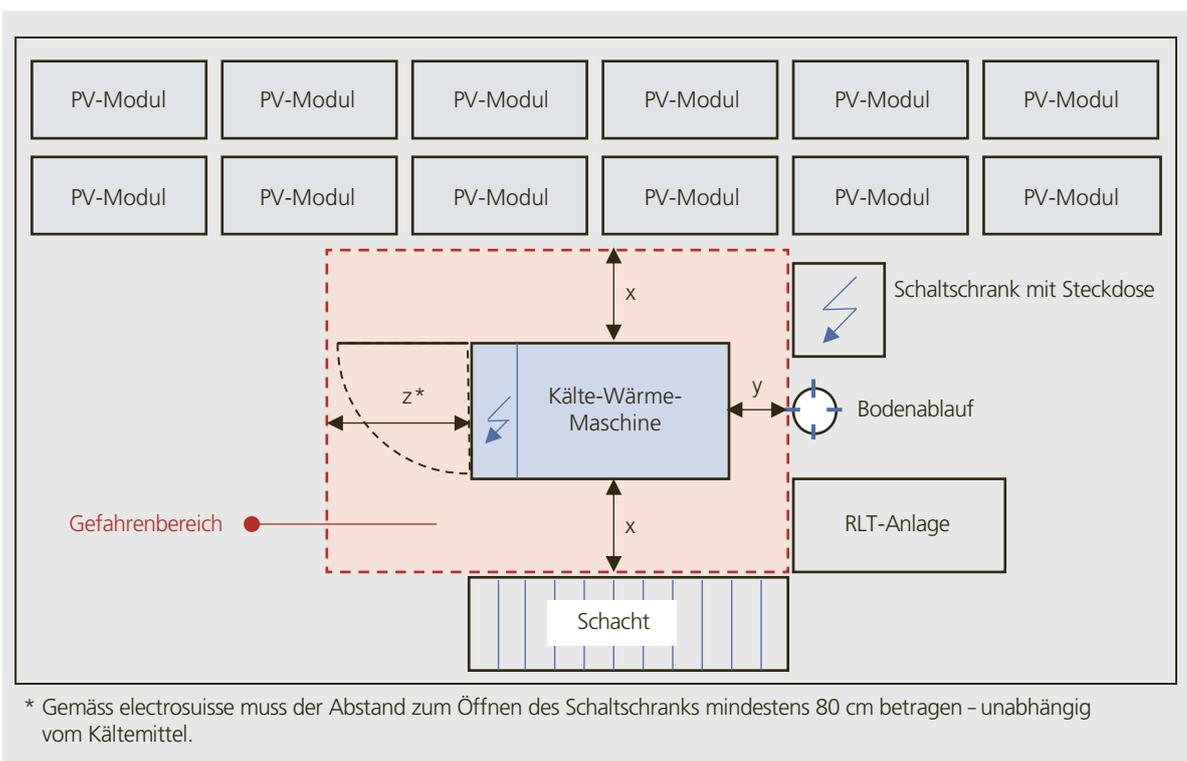


Bild 4.5:
Beispiel eines Grundrisses einer auf dem Dach aufgestellten Kälte-Wärme-Maschine mit den eingezeichneten Gefahrenbereichen rund um die Maschine.

* Gemäss electrosuisse muss der Abstand zum Öffnen des Schaltschranks mindestens 80 cm betragen – unabhängig vom Kältemittel.

«Belüftetes Gehäuse»

Eine gute Möglichkeit eine Propan- oder Isobutan-Kälteanlage sicher und regelkonform im Gebäude auszuführen ist die Platzierung in einem belüfteten Gehäuse nach SN EN 378-2. Dabei sind die Angaben des Herstellers und der SN EN 378-2 zu befolgen und insbesondere folgende Punkte zu beachten:

- Aufstellraum muss mind. das 10-fache Nettovolumen des Gehäuses aufweisen
- Lüftungskanäle (Grösse, Biegungen, Druckabfall, Dichtheitsklasse) gemäss den Vorgaben des Herstellers
- Luftstrom ins Gehäuse: direkt oder indirekt sicherstellen
- Explosionsgeschützter Ventilator
- Lüftung überwachen; bei Störung Alarm oder sichere Abschaltung
- Abluft sicher ins Freie führen, Gefahrenbereich am Austritt beachten

Achtung: Zur Schallreduktion werden Kälteanlagen häufig in Gehäusen installiert. Diese Gehäuse sind oft nur teilbelüftet und erfüllen die Anforderungen an ein technisch belüftetes Gehäuse nicht.

Explosionsschutzdokument

Bei Anlagen mit brennbaren Kältemitteln A3 muss mit einem Explosionsschutzdokument nachgewiesen werden, dass alle Explosionsrisiken bewertet und die erforderlichen Schutzmassnahmen getroffen wurden. Es ist vor Inbetriebnahme zu erstellen und dokumentiert unter anderem:

- Zoneneinteilung
- Sicherheitsmassnahmen (Lüftung, elektrische Installationen, Gaswarnanlagen, Kennzeichnung etc.).
- sicherer Betrieb und Wartung

Das SVK-Merkblatt (siehe unten) enthält ein Muster eines Explosionsschutzdokumentes.

Fluchtwege

Der Fluchtweg – der kürzeste Weg, zu einem sicheren Ort im Freien oder innerhalb des Gebäudes zu gelangen – muss definiert, dokumentiert und klar gekennzeichnet

sein. Dabei sind die Vorschriften der Suva einzuhalten.

Qualifiziertes Personal

Personen, die eine Kälteanlage mit Propan oder Isobutan bauen, müssen im Umgang mit brennbaren Kältemitteln geschult und sachkundig sein. Für Arbeiten am Kältekreis mit brennbaren Kältemitteln ist mindestens die «Fachbewilligung für den Umgang mit Kältemitteln» erforderlich.

Diese Bewilligung stellt sicher, dass Fachpersonen über die notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten verfügen, um Umwelt und Gesundheit zu schützen. Für die Fachbewilligung «Kältemittel – stationäre Kälteanlagen» ist der Schweizerische Verband für Kältetechnik (SVK) zuständig.

R290-Low-Charge-Kältemaschinen

R290 Low-Charge-Kältemaschinen mit Mikrokanalwärmetauschern sind speziell darauf ausgelegt, die Kältemittelfüllung pro kW drastisch zu reduzieren. Während konventionelle Kaltwassersätze 0,12 bis 0,2 kg Propan pro kW Kälteleistung benötigen, arbeiten Low-Charge-Ausführungen mit 0,01 bis 0,10 kg/kW, also erheblich weniger Propan. Sie unterscheiden sich von herkömmlichen R290-Anlagen durch kompaktere Wärmetauscher, mehrere kleine Kältekreisläufe und geringere Füllmengen. Dadurch sind sie sicherer, die untere Explosionsgrenze im Maschinenraum kann einfacher eingehalten werden und sie sind oft effizienter. Die Nachteile sind: Sie sind technisch anspruchsvoller und in der Anschaffung meist teurer.

Hilfreiche Dokumente zum Umgang mit brennbaren Kältemitteln

- Suva-Merkblatt 2153: Eine praxisnahe Anleitung für Anlagen mit brennbaren Kältemitteln zur Gefahrenbeurteilung, Zoneneinteilung und Schutzmassnahmen.
- SVK-Merkblatt: «Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln der Sicherheitsklasse A3 und A2L»

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.

Wärmenutzung mit hohen Temperaturen

Im Idealfall erfolgt die Verflüssigung anhand der Aussenluft. So liegt die anfallende Wärme die meiste Zeit mit einer Temperatur zwischen 20°C und 30°C vor. Wird Wärme mit einer höheren Temperatur benötigt, kann im «Heizfall» die Verflüssigungstemperatur T_c angehoben werden (siehe Bild 10.10).

Für Wärmenutzungen mit Temperaturen über 60°C zeigt die SIA 384/4 (2025), was bei der Konzeption der Kälteerzeugung zu beachten ist. Dabei spielen

- die Wirtschaftlichkeit (Anlagegrösse),
- Überlegungen zur Redundanz,
- die Art der hydraulischen Einbindung,
- die jährliche Laufzeit der Kälte-Wärme-Maschine auf hoher Temperatur und
- der Anteil der Verflüssigungswärme, der für «Heizzwecke» genutzt werden kann eine Rolle. Das Bild 4.6 zeigt mögliche Kombinationen von Systemen, mit denen Wärme von über 60°C bereitgestellt wird.

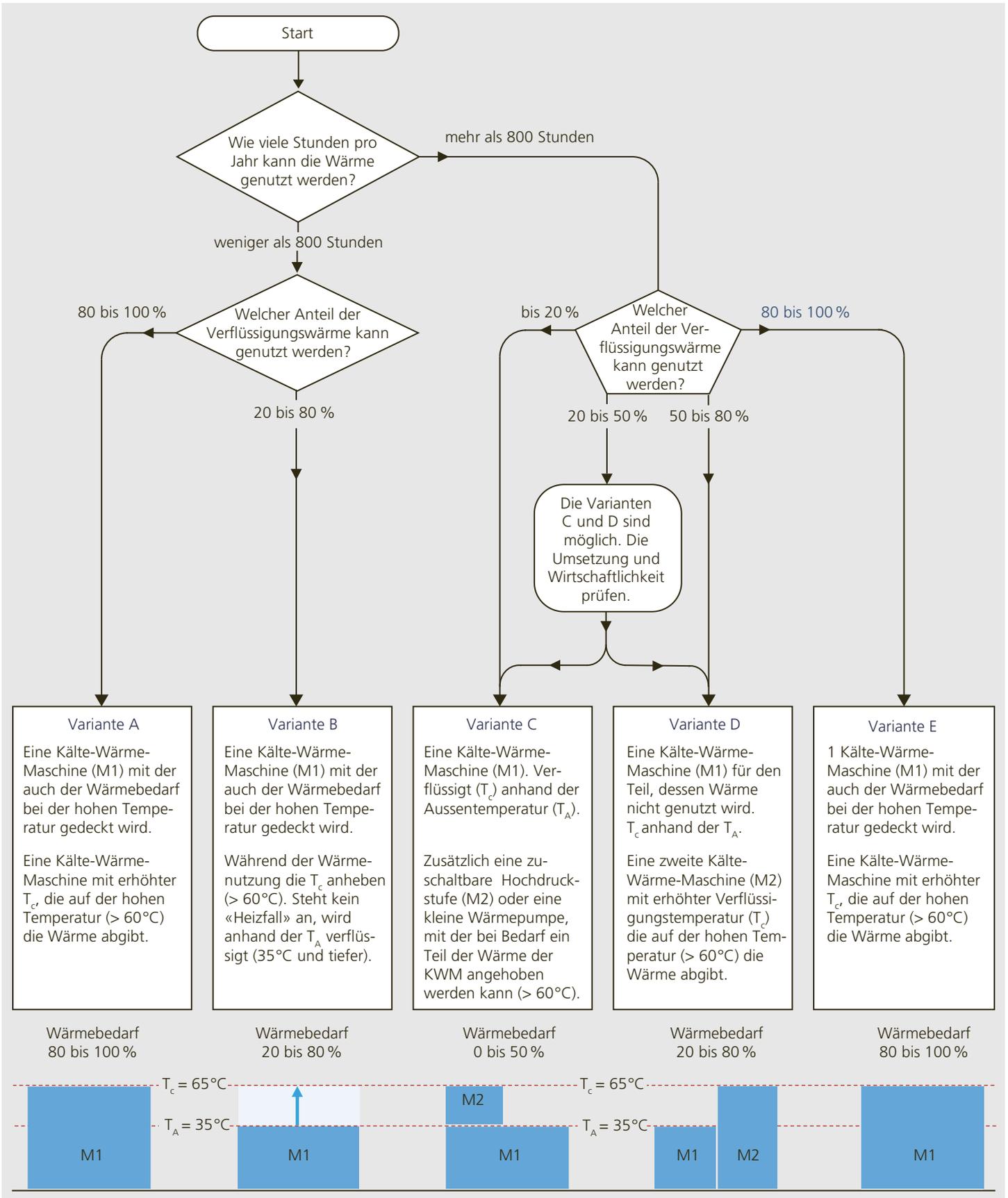


Bild 4.6: Mögliche Kombinationen, wie Wärme auf einer hohen Temperatur ($> 60^\circ\text{C}$) bereitgestellt werden kann. Grundlage: SIA 384/4 (2025)

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 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.

Die Norm SIA 384/4 (2025) legt fest, wie die erforderliche Messinstrumentierung bei Kälteerzeugern ausgestaltet werden muss.

Dabei gilt:

- Der Energie-, Wärme- und Wasserverbrauch muss mit geeigneten Zählern erfasst werden (Bild 4.8).
- Temperatur- und Druckwerte müssen entweder angezeigt oder kontinuierlich aufgezeichnet werden (Bild 4.9).

Bild 4.8 und Bild 4.9 zeigen die Messinstrumentierung bis zu einer Kälteleistung von 350 kW. Die Instrumentierung von Anlagen mit mehr als 350 kW können der SIA 384/4 (2025) Tabellen 1 und 2 entnommen werden.

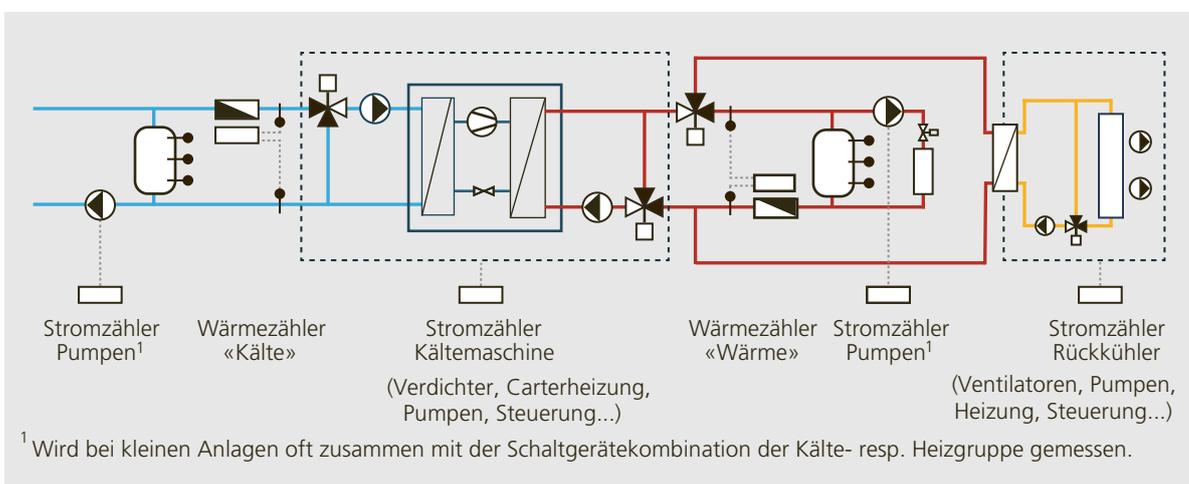


Bild 4.7:
Beispiel eines Messkonzepts einer Kälteerzeugung mit einer Wärmenutzung und Rückkühlung.

Instrumentierung (Messung mit Zählern)		Kälteleistung in kW	
		< 100	100 bis < 350
Kältezähler je Kälteverbraucher-Gruppe (Kühlgruppe)	kWh	–	ja
Kältezähler je Kälteerzeuger	kWh	ja ^{3,4}	ja ^{3,4}
Wärmezähler (bei Wärmenutzung)	kWh	ja	ja
Wärmezähler (bei freier Kühlung)	kWh	–	–
Stromzähler Rückkühler (mit Free-Cooling-Betrieb)	kWh	ja	ja
Stromzähler Kälteerzeuger	kWh	ja, ab 3 kW _{el}	ja
Stromzähler für Hilfsbetriebe (Sammelmessung) ¹	kWh	ja, ab 3 kW _{el}	ja, ab 3 kW _{el}
Stromzähler für Hilfsbetriebe, die von der Sammelmessung nicht erfasst werden ²	kWh	ja, ab 3 kW _{el}	ja, ab 3 kW _{el}
Betriebsstunden pro Verdichter	h	ja	ja
Startimpulse	Imp.	ja	ja
Wasserverbrauch (Rückkühler)	m ³	ja	ja

1 Alle Hilfsbetriebe des Kälteerzeugers, die von der gleichen Gruppenversorgung gespeist und mit einem Elektrozähler gemessen werden können (Sammelmessung).

2 Hilfsbetriebe, die von verschiedenen Gruppenversorgungen gespeist werden und nicht über die Sammelmessung erfasst werden können (z. B. wenn der Rückkühler auf dem Dach unabhängig vom Kälteerzeuger im Keller mit Strom versorgt wird).

3 Kältezähler müssen über einen Speicher für Monatswerte verfügen.

4 Es wird empfohlen, diese Werte aufzuzeichnen.

Bild 4.8:

Notwendige Messinstrumentierung, welche die Werte für Energie-, Wärme- und Wasserverbrauch aufzeichnet.

Quelle: SIA 384/4 (2025)

Instrumentierung (Anzeige oder Aufzeichnung)		Kälteleistung in kW	
		< 100	100 bis < 350
Vorlauftemperatur Kältekreis	°C	anzeigen	anzeigen ²
Rücklauftemperatur Kältekreis	°C	anzeigen	anzeigen ²
Austrittstemperatur Verdampfer	°C	anzeigen	anzeigen ²
Eintrittstemperatur Verdampfer	°C	anzeigen	anzeigen ²
Eintrittstemperatur Verflüssiger ¹	°C	anzeigen	anzeigen ²
Austrittstemperatur Verflüssiger ¹	°C	anzeigen	anzeigen ²
Vorlauftemperatur Wärmekreis	°C	anzeigen	anzeigen ²
Rücklauftemperatur Wärmekreis	°C	anzeigen	anzeigen ²
Ein- und Austrittstemperatur Rückkühler	°C	anzeigen	anzeigen ²
Betriebsdruck Kältekreis	bar	anzeigen	aufzeichnen
Betriebsdruck Wärmekreis	bar	anzeigen	aufzeichnen

1 Entweder muss die Eintritts- oder die Austrittstemperatur des Verflüssigers erfasst werden.

2 Es wird empfohlen, diese Werte aufzuzeichnen.

Bild 4.9:

Notwendige Messinstrumentierung, welche die Werte für Temperatur und Druck anzeigt oder aufzeichnet.

Quelle: SIA 384/4 (2025)

4.5 Normen und Vorgaben

Die Norm SIA 384/4 (2025)¹ enthält die Bestimmungen, um mit Lüftungs- und Klimaanlage 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 384/4 (2025) dazu beitragen, dass die Bedürfnisse der Nutzer klar erfasst und die relevanten Bedingungen quantitativ festgelegt und kontrolliert werden können.

Bauliche Anforderungen

In der SIA 384/4 (2025) 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 Klimaanlage 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 384/4 (2025) und dem Energiegesetz² 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/m²

in 12 Stunden oder 350 Wh/m² 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. Dies gilt insbesondere für ganzjährig betriebene Kälteanlagen. In jedem Fall sind Kälteanlagen bedarfsgerecht zu betreiben. Als wirtschaftlich tragbar gelten gemäss SIA 384/4 (2025) umwelt- und klimaschonende Anlagen, deren Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost, LCC) die einer herkömmlichen Anlage um nicht mehr als 5 Prozent übersteigen. Die SIA gibt für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit eine Modell-Wirtschaftlichkeitsberechnung vor (siehe Anhang I).

¹ Norm SIA 384/4 (2025): Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen

² Energienachweis EN-5: Kühlung/Befeuchtung

Anforderungen an die Kaltwassertemperaturen

Bei der Kälteerzeugung ist die Kaltwassertemperatur möglichst hoch zu wählen. Für Klimaanwendungen gelten folgende Werte nach SIA 384/4 (2025) (projektspezifisch sind auch höhere Temperaturen möglich):

1. Komfortkühlung (Flächenkühlung)
ab 18°C
2. Kühlung ohne Entfeuchtung
14°C bis < 18°C
3. Kühlung mit Teilentfeuchtung
10°C bis < 14°C
4. Kühlung mit kontrollierter Entfeuchtung (Prozesskälte)
6°C bis < 10°C

(Siehe dazu auch Kapitel 6.2)

Für Spezialfälle mit tieferen Kaltwassertemperaturen (unter 6°C) ist 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 MuKE 2014 (Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich). Die Norm leistet damit einen Beitrag an eine ökologische Bauweise.

4.6 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 Rück-

kühler 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 Aussen-temperatur vorgesehen werden. So kann während kühleren Zeiten (Frühjahr, Herbst, Winter) die Kondensationstemperatur reduziert, die Effizienz des Systems spürbar erhöht und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

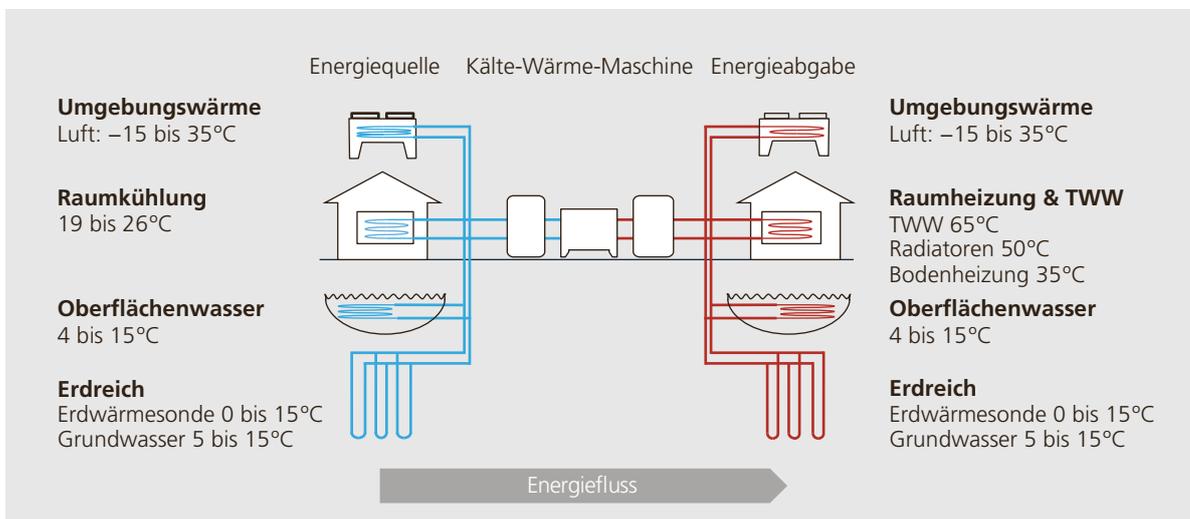


Bild 4.10:
Gesamtsystem mit den Energiequellen, der Kälte-Wärme-Maschine und den Möglichkeiten, wie die Wärme abgegeben werden kann.

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 $Q_{\text{Kälte}}$ 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 ($T_{\text{KK-VL}}$), zulässige Temperaturtoleranz
- Anhebung der Kälteträger-Temperatur (Winter)
- Wie hoch ist die zu erwartende Kältekreislauf-Rücklauftemperatur ($T_{\text{KK-RL}}$)
- Geforderte Kälteleistung, Klima beeinflusst: Grundlast, Tagesspitze, Nachtminimum, Wochenende
- Geforderte Kälteleistung (interne Last, Winterkühlung): Bandlast, Tagesspitze, Nachtminimum, Wochenende
- Maximal mögliche Speichergrosse
- Saisonale Speicherung mit Erdkoppe-lung (Erdsonden) geplant

3. Zu den Wärmeverbrauchern

- Erforderliche Heizungsvorlauftemperatur ($T_{\text{WK-VL}}$), zulässige Temperaturtoleranz

- Absenkung der HW-Temperatur (Sommer)
- Wie tief ist die zu erwartende Rücklauftemperatur ($T_{\text{WK-RL}}$)
- Wärmenutzung klären (Trinkwassererwärmung, Spitzenleistung, Tagesbedarf, Grundlast)
- Geforderte Heizleistung
- Geforderte Heizleistung klimabeeinflusst: Tagesspitze, Nachtminimum, Wochenende
- Maximal mögliche Speichergrosse
- Saisonale Speicherung mit Erdkoppe-lung (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 Klappenstellungen 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 Störfall 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.

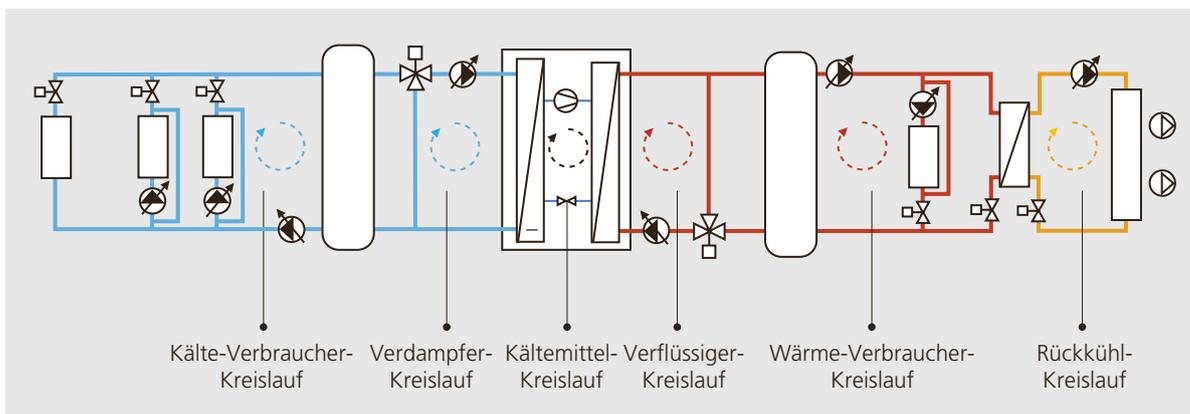


Bild 4.11:
Überblick Gesamtsystem mit den verschiedenen Kreisläufen.

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 Brandschutzaufgaben, 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 Regelungsbeschreibung 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

Bild 4.12:
SIA-Phasenbe-
schreibung mit
einigen Hinweisen
zu Punkten, die bei
einer Klimakälte-
anlage speziell zu
beachten sind.

Schallminderungsmaßnahmen

Bei der Planung von Kälte-Wärme-Maschinen ist eine sorgfältige Beurteilung der Schallemissionen erforderlich. Lärminderungsmaßnahmen, 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 Kulissen-schalldämpfern 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 4.12 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.

4.7 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. NH₃ oder R134a).
- Die Kältemittelmenge beeinflusst den Volumenstrom der mechanischen Lüftung (Richtlinie SNEN 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 Regelungs-Philosophie und der Schnittstellen-Lösung bestehen grosse Unterschiede bei den Herstellern – die Möglichkeiten und die verfügbaren Regelungsbereiche 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 Regelungsbereich 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 Regelungsbereich 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 Heizungs-vorlauf 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.).

4.8 Vorgaben an die Lieferanten

Damit sich der Lieferant des Kälteerzeugers ein Bild von der Gesamtanlage machen kann, braucht er von der HLK-Planerin 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 Regelung

Wärmeverteilung

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

MSR, GA, Speichermanagement

Alle Anlagen und Baugruppen sollen für einen einwandfreien und sicheren Betrieb mit Einrichtungen zum Messen, Steuern, Regeln und Überwachen ausgestattet sein. Die projektspezifisch angepassten Programme sollen auch externe Systemkomponenten einbinden und somit die ganzheitliche Regelung 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 Regelbarkeit, Angaben zum Kältemittel und der Füllmenge und Angaben zum Schall (oder zur Schalleistung). Bild 4.13 zeigt die wichtigsten Daten, die eine Planerin für eine seriöse Beurteilung benötigt.

Kältebetrieb mit offenem Verdunstungsrückkühler und einem Verflüssiger

Kälteleistung $\dot{Q}_{\text{Kälte}}$	300 kW
Verflüssigerleistung $\dot{Q}_{\text{Wärme}}$	379 kW
Leistungsaufnahme P_{el}	79 kW
$\text{COP}_{\text{Kälte}}$ – Volllast	3,8
Kaltwasser Eintritt	16 °C
Kaltwasser Austritt	10 °C
Kaltwasser Durchflussmenge	43,1 m ³ /h
Kaltwasser Glykolanteil	0 %
Druckverlust Verdampfer	27 kPa
Rückkühlwasser Eintritt	34 °C
Rückkühlwasser Austritt	40 °C
Rückkühlwasser Durchfluss	57,5 m ³ /h
Rückkühlwasser Glykolanteil	35 %
Druckverlust Verflüssiger	25 kPa

Effizienz der Maschine

Die Effizienz der Maschine muss den Vorgaben der SIA 384/4 (2025) entsprechen.

Leistungsregelung Wärmenutzungs-Betrieb bezogen auf die Kälteleistung

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

Leistungsregelung Kältebetrieb

Stufenlos von	25 % bis 100 %
---------------	----------------

Anzahl Verflüssiger	1 Stück
Anzahl Verdampfer	1 Stück
Foulingfaktor Tauscher	0,044 m ² K/kW
Anzahl Verdichter	1 Stück
Spannung-Phasen-Frequenz	400-3-50
Nennstrom	max. 145 A
Anlaufstrom	5 A
Kältemittelkreise	1 Stück
Kältemittel Art/Menge	R290 / 30 kg
Betriebsgewicht	1500 kg
Länge	1900 mm
Breite	1100 mm
Höhe	1900 mm

Schalldruck	72 dB(A)
Schallleistungspegel	81 dB(A)

Bild 4.13: Technische Daten, die man benötigt, um eine Kälte-Wärme-Maschine beurteilen zu können (Beispiel).

4.9 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.

ern, Speichern, Erdsondenfelder, Pumpen etc.

- Konzept Verfügbarkeit (Betriebsicherheit, Redundanz etc.)
- Funktions- und Regelungsbeschreibung: 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 4.14:
Toleranzen der Messgrössen.

nenen 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 (Toleranzen siehe auch Bild 4.10). 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 ($COP_{\text{Wärme}}$) und Leistung von Wärmepumpensystemen
- Leistungszahl ($COP_{\text{Kälte}}$) 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 der JAZ bei der Kältemaschine und der Wärmepumpe

Oft wird eine Erfolgskontrolle zusammen mit einer Betriebsoptimierung beauftragt.

4.10 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 Kältemittel sind regelmässig, mindestens aber bei jedem Eingriff und bei jeder Wartung, auf ihre Dichtigkeit hin zu überprüfen. (Details siehe Anhang D, Kältemittel: Ersatz und Dichtigkeitskontrolle).

Meldepflicht

Klimakälteanlagen mit mehr als 3 kg Kältemitteln müssen bei der Inbetrieb- und der Ausserbetriebnahme dem BAFU gemeldet werden (www.bafu.admin.ch/meldung-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 Kältemittelgehalten 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 Kältekreislaufes auf ein neues, geeignetes Ersatzkältemittel tatsächlich lohnt. Dies gilt auch beim Umbau der Anlage (z. B. Verdichtersersatz). (Details siehe Anhang D, Kältemittel: Ersatz und Dichtigkeitskontrolle).

Faustregel Kältemittlersatz

Bei Kaltwassersätzen, die älter als 10 Jahre sind und Klimaanlage mit einer Kälteleistung mit weniger als 80 kW immer einen Anlagenersatz prüfen.

Die Lebensdauer immer im Fokus

Wer heute eine neue Kälteanlage plant, wählt ein zukunftsfähiges Kältemittel (siehe Bild 3.17) und stellt damit sicher, dass bei einem allfälligen Kältemittelverlust das Kältemittel einfach und ohne Umbau nachgefüllt werden kann.

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 Blendenschutz zu empfehlen.

Check-Punkte

Es 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 Merkmale 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.

Bauarten und Komponenten

Die Kältemaschine ist das Herz der Kälteanlage. Die Planerin 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 Kältekreis 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 Kälte dämmung versehen werden. Bei Maschinen mit Wärmenutzung ist zudem eine Wärmedämmung von Druckleitung und Verflüssiger 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.

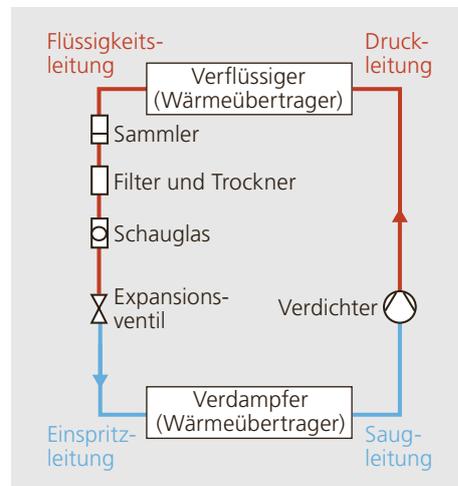


Bild 5.1: Der Kältekreis und die wichtigsten Komponenten einer Kälteanlage mit Direktverdampfung und Direktverflüssigung.

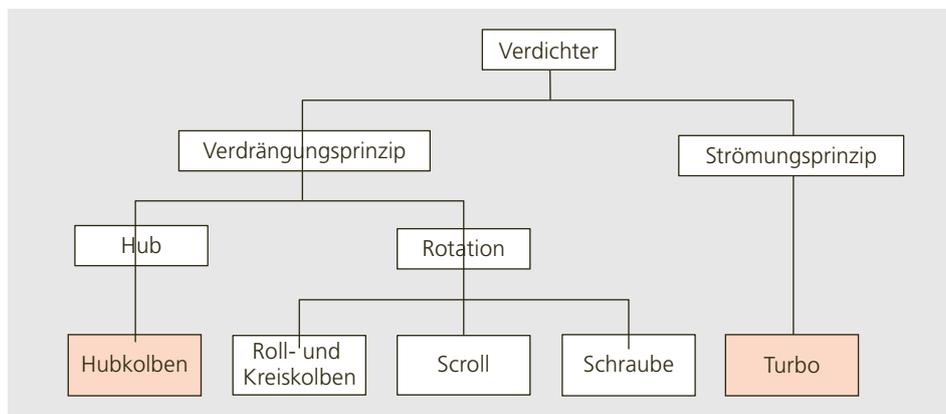


Bild 5.2: Die Verdichter nach ihrem Arbeitsprinzip. Die farbig eingefärbten Verdichter trifft man in der Klimakälte am häufigsten an.

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.

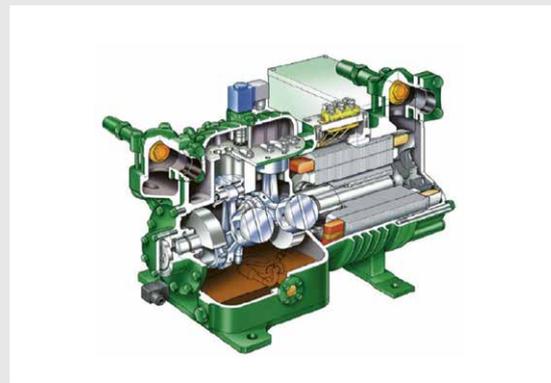


Bild 5.3: Halbhermetischer Hubkolben-Verdichter.
Quelle: Bitzer

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.
Quelle: 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 unregelmäßige Schrauben-Verdichter arbeitet mit konstantem Druckverhältnis. Um den Betrieb des Verdichters an die Betriebsbedingungen anzupassen, ist eine entsprechende Regelung erforderlich.

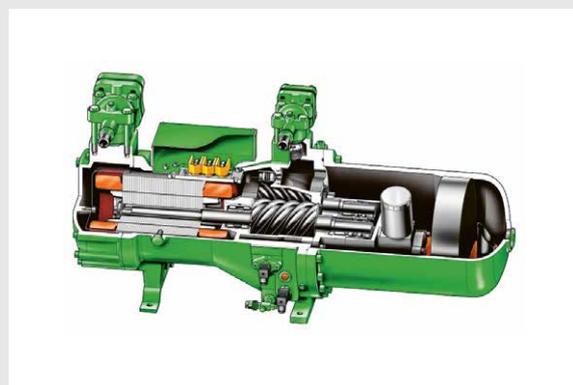


Bild 5.5: Halbhermetischer Schrauben-Verdichter.
Quelle: Bitzer

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 L.



Bild 5.6: Turbo-Verdichter. Quelle: 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).

Mindestlaufzeiten von Verdichtern

Um eine minimale Energieeffizienz der Kälteanlage zu erreichen und Schäden durch zu häufiges Ein- und Ausschalten des Verdichters zu vermeiden, müssen die Verdichter gemäss SIA 384/4 (2025) Mindestlaufzeiten einhalten. Die minimale

Laufzeit definiert sich anhand der Kälteleistung des Kälteerzeugers (siehe Bild 5.8). Damit die Mindestlaufzeiten eingehalten werden können, müssen entsprechende Komponenten wie Speicher und Sensoren vorgesehen werden.

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
Regelbarkeit				
bei konstanter Drehzahl	Stufen mit Zylinderabschaltung	nur Digitalscroll: stufenlos möglich	stufenlos mit Schieber oder Bypass-Regelung	stufenlos mit Saugdrossel
mit Drehzahlregelung ca. ¹	30 %–100 %	20 %–100 %	20 %–100 %	25 %–100 %
Wärmenutzung mit Heissgasenthitizer möglich	ja (ca. 10 % der Leistung)	ja (ca. 10 % der Leistung)	ja, mit Ölkühler	nein
Temperatur-Hub (ca.)²	0 °C–65 °C	0 °C–65 °C	0 °C–65 °C	0 °C–50 °C
Vibrationen	erhebliche	leichte	leichte	leichte
Wartung	einfach zu warten		grössere Wartungsarbeiten nur in Spezialwerkstatt möglich	durch Spezialisten relativ einfach zu warten

¹ Die minimale Drehzahl ist (bei den ölgeschmierten Verdichtern) von der Ölrückführung abhängig. Eine zu kleine Drehzahl führt zu einer mangelhaften Schmierung (Öldruckstörung).

² Verdampfung auf Verflüssigung

Bild 5.7: Eigenschaften der verschiedenen Verdichterarten.

Verdichterbauart	Kälteleistung in kW			
	10 bis < 100	100 bis < 200	200 bis < 500	≥ 500
Rollkolben-Verdichter	10 Min.	– ¹	– ¹	– ¹
Scroll-Verdichter	10 Min.	15 Min.	20 Min.	25 Min.
Hubkolben-Verdichter	15 Min.	20 Min.	25 Min.	30 Min.
Schrauben-Verdichter	15 Min.	20 Min.	25 Min.	30 Min.
Turbo-Verdichter	– ¹	20 Min.	30 Min.	40 Min.

¹ Die Bauart ist in diesem Leistungsbereich nicht üblich.

Bild 5.8: Mindestlaufzeiten von verschiedenen Verdichterbauarten in Minuten.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

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 leistungsstärker ist der Verdichter. Das Beispiel eines Kolben-Verdichters illustriert dies (Bild 5.9).

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 Kälte-

leistung 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).

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.

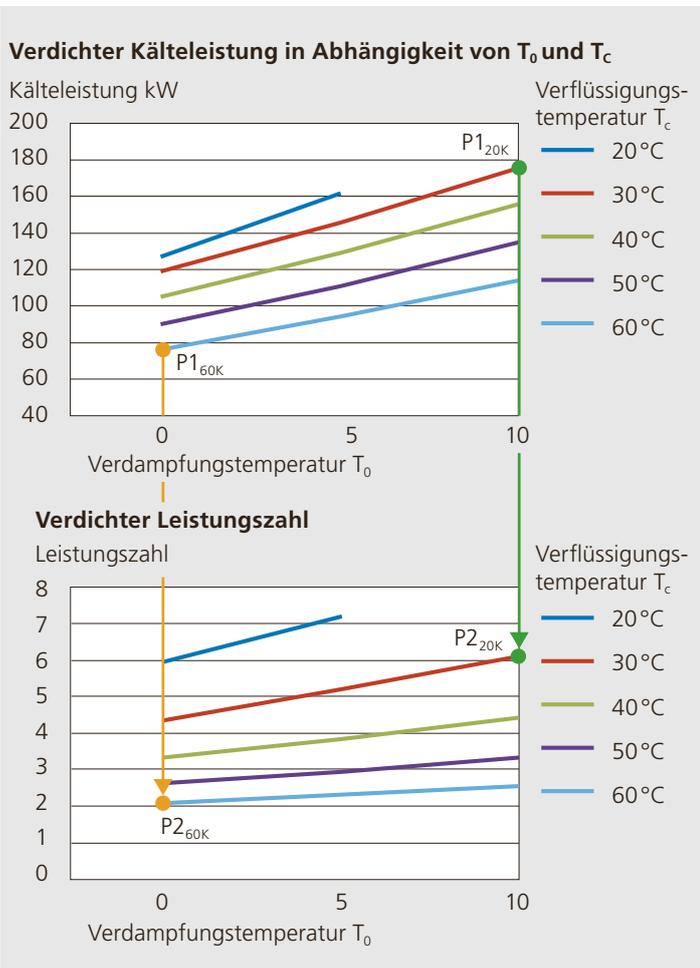
Drehzahlregelung

Eine Drehzahlregelung steuert die Drehzahl eines Motors oder eines Getriebes. So kann die Leistung flexibel und bedarfsgerecht angepasst werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Drehzahl zu verändern. Am weitesten verbreitet ist der Frequenzumrichter. Doch auch mit polumschaltbaren Motoren oder mit Regelgetrieben bei offenen Verdichtern kann die Drehzahl verändert werden.

Frequenzumrichter (FU), auch Inverter genannt, ermöglichen eine stufenlose Anpassung der Motordrehzahl in Kälteanlagen. Durch die Veränderung der Frequenz des Versorgungsstroms wird direkt die Drehzahl des Verdichters beeinflusst. Auf diese Weise lassen sich sowohl der Massestrom als auch die erzeugte Kälteleistung bedarfsgerecht regeln.

Der regelbare Frequenzbereich liegt je nach Ausführung von Frequenzumrichter und Verdichter typischerweise zwischen 25 und 70 Hz. Dabei müssten die vom Hersteller vorgegebenen Einsatzgrenzen des Verdichters stets eingehalten werden. Bei sehr niedriger Last stösst auch ein FU an seine Einsatzgrenze und kann die Anlage nicht mehr regeln. Zudem müssen Ölrückführung und Motorkühlung auch bei minimalem Teillastbetrieb gewährleistet bleiben.

Bild 5.9:
Leistungsdiagramm eines Kolben-Verdichters in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur T_c und der Verflüssigungstemperatur T_0 .



Ein weiterer Aspekt ist die Effizienz. Die FU-Technologie erlaubt zwar eine flexible und energieoptimierte Leistungsanpassung. Doch der Umrichter verursacht bei Vollast Verluste von etwa 3 %, die bei der Gesamtbetrachtung des Systemwirkungsgrades berücksichtigt werden sollten.

Darüber hinaus führt die Verwendung von Frequenzumrichtern zu Oberwellen im Stromnetz. Um die Netzqualität zu sichern und elektrische Störungen zu vermeiden, braucht es deshalb elektrische Filter oder Drosseln. Die FU-Verluste selbst sind zudem frequenzabhängig.

Im Verbundbetrieb mit mehreren Verdichtern muss nicht jeder Verdichter mit einem FU ausgerüstet sein. Für die gewünschte Flexibilität und Effizienz reicht es häufig, einen Verdichter frequenzgeregelt zu betreiben.

Frequenzumrichter im Leistungsbereich zwischen 0,12 und 1,000 kW müssen in der Schweiz mindestens den internationalen Effizienzstandard IE2 erfüllen.

Drehzahlregelung bei Schraubenverdichtern

Drehzahlgeregelt Schraubenverdichter erreichen ihren besten Gesamtwirkungsgrad im Bereich zwischen etwa 60 und 100 % der Nenndrehzahl. In diesem Arbeitsfeld ist die spezifische Leistungsaufnahme minimal, während der Wirkungsgrad maximal und konstant ist. Zwischen 30 und 60 % der Nenndrehzahl bleibt der Wirkungsgrad zwar noch akzeptabel, nimmt jedoch mit sinkender Drehzahl kontinuierlich ab. Liegt die Nenndrehzahl zwischen 20 % und 30 % steigt die spezifische Leistungsaufnahme stark an. Der Verdichter kann in diesem Bereich nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden.

Drehzahlregelung bei Verdrängungsverdichtern

Bei Verdrängungsverdichtern (Kolben, Scroll und Schrauben) bewirkt eine Erhöhung der Drehzahl, 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.

Drehzahlregelung bei Strömungsverdichtern (Turbo)

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.

Weitere Massnahmen zur Leistungsregelung von Verdichtern

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 Regelung 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 auf-

Betrieb	Frequenz	Verdichter-Drehzahl	Kälteleistung
	[Hz]	[U/Min.]	[kW]
Überfrequenzbetrieb	70	4200	51,1
Normalbetrieb	50	3000	41,4
Betrieb mit reduzierter Frequenz	25	1800	17,4

Bild 5.10:
Beispiel, wie sich Motor und Verdichter bei unterschiedlichen Frequenzen verhalten.

Bild 5.11 (oben): Schraubenverdichter mit 100 % Leistung. Der Schieber ist ausgefahren und es wird 100 % des Massenstroms der Schraube zugeführt.

Bild 5.12 (unten): Schraubenverdichter mit 70 % Leistung. Der Schieber wird eingefahren. Dadurch strömt ein Teil des Massenstroms zurück und nur ein Teil wird der Schraube zugeführt.

grund des reduzierten Gesamtmassenstroms. Gleichzeitig bleiben jedoch die mechanischen Verluste bestehen. Der Regelbereich je Verdichter ist von der Zylinderzahl und der Verdichterkonstruktion abhängig und liegt zwischen 50 % und 100 %. Eine einfache, aber wenig 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. Mit einem Digital-Scroll ist eine stufenlose Leistungsregelung möglich. Bedingt durch die mechanischen

Verluste ist diese Art der Regelung nicht sehr effizient und verursacht Druckschwankungen auf der Druckseite.

Schieber-Regelung

Bei Schrauben-Verdichtern wird die Leistung mit einer Schieber-Regelung an den Bedarf angepasst. Mit dem Schieber wird die wirksame Verdichtungslänge verändert. Die Schieber-Regelung mit Parallelbeziehungsweise Tandemschieber erfordert robuste Gehäuse, da diese mit dem Einbau des Schiebers geschwächt werden. Im Leistungsbereich zwischen 100 % und 70 % erreicht man mit dieser Regelung eine gute Energieeffizienz. Im Teillastbetrieb (unter 70 % Last) nimmt die Energieeffizienz deutlich ab.

Saugdrosselregelung

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 Regelung wird durch Saugdrosselregelung in Kombination mit Drehzahlregelung erreicht.

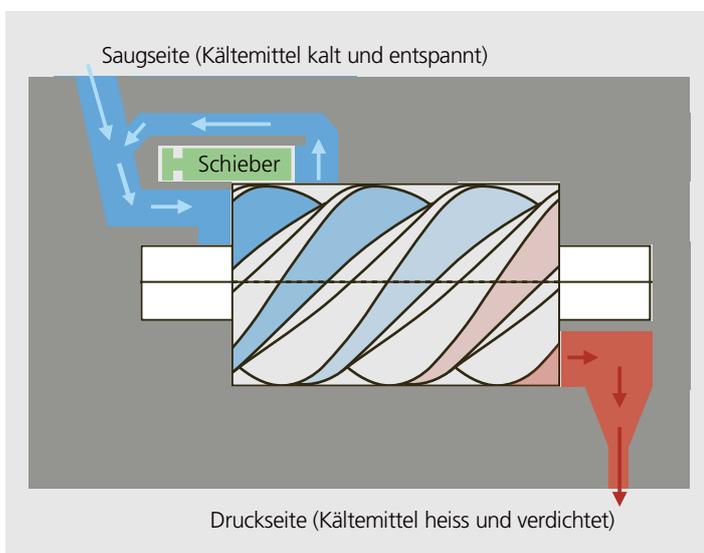
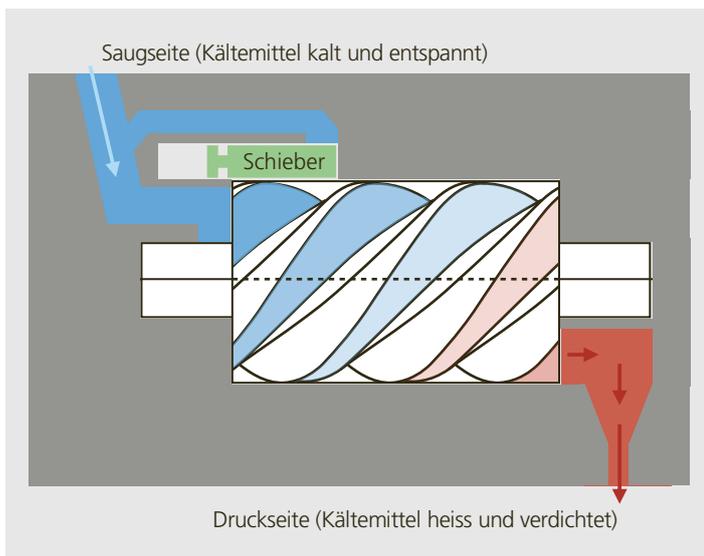


Bild 5.13: Verschiedene Möglichkeiten, wie die Leistung der Verdichter geregelt werden kann.

Regelung über	Regelmöglichkeit
Kältekreis	<ul style="list-style-type: none"> • Saugdruckregelung • Heissgasbypass-Regelung
Verdichter	<ul style="list-style-type: none"> • Aussetzbetrieb (Ein-/Ausbetrieb) • Mechanische Leistungsregelung <ul style="list-style-type: none"> – Interner Bypass – Ventilanhebung bei Hubkolben-Verdichtern – Absperrung des Sauggaskanals bei Hubkolben-Verdichtern – Schieberregelung bei Schrauben-Verdichtern – Anhebung der Spirale bei Scroll-Verdichtern • Drehzahlregelung <ul style="list-style-type: none"> – Frequenzumrichter – Polumschaltbarer Motor – Regelgetriebe bei offenen Verdichtern

Parallelverbund mehrere Verdichter

Eine feinere Leistungsregelung lässt sich durch den Parallelbetrieb mehrerer Verdichter realisieren (siehe Bild 5.14). Dabei wird der Kältemittel-Massenstrom auf mehrere, parallel geschaltete Verdichterstufen verteilt. Die Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen sind für alle Verdichter gleich.

Leistungsanpassung im Parallelverbund durch Aussetzbetrieb

Bild 5.15 zeigt, wie bei einem Parallelverbund mit drei Verdichtern die notwendige Kälteleistung durch Takten (Ein-/Aussetzbetrieb, auch als Aussetzbetrieb bezeichnet) bereitgestellt wird.

- Bei geringer Last arbeitet zunächst nur Verdichter 1 im Taktbetrieb.
- Sobald mehr als ein Drittel der maximalen Kälteleistung benötigt wird, läuft Verdichter 1 dauerhaft mit 100 % Leistung, während Verdichter 2 die weitere Leistungsanpassung durch Takten übernimmt.
- Wird mehr als zwei Drittel der Leistung benötigt, läuft auch Verdichter 2 durchgehend mit 100 % und Verdichter 3 übernimmt die verbleibende Leistungsanpassung bis zur Volllast.

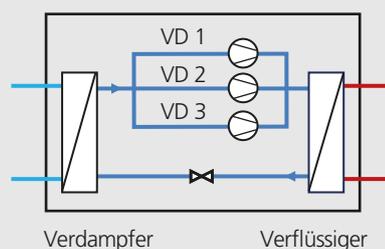


Bild 5.14:
Parallelverbund mit drei Verdichterstufen.

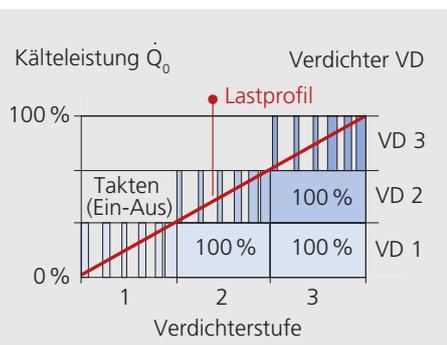


Bild 5.15:
Leistungsregelung mit Aussetzbetrieb bei einem Parallelverbund.

Der Taktbetrieb führt jedoch zu erheblichen Energieverlusten – insbesondere durch häufige Anlaufzyklen.

Leistungsanpassung im Parallelverbund mit Frequenzumrichter (FU)

In Bild 5.16 ist eine energieeffizientere Variante dargestellt: Ein Parallelverbund mit drei Verdichtern, bei dem Verdichter 1 mit einem Frequenzumrichter zur stufenlosen Leistungsregelung ausgestattet ist. Verdichter 2 und 3 arbeiten jeweils unregelt mit 100 % Leistung.

Der FU deckt einen Leistungsbereich von ca. 20 % bis 100 % der maximalen Kälteleistung stufenlos ab. Der mit dem FU ausgerüstete Verdichter 1 erbringt bei 100 % Leistung ein Drittel der maximalen Kälteleistung (eine Verdichterstufe entspricht einem Drittel der Gesamtleistung). Bei 20 % Leistung deckt der Verdichter 1 rund 7 % der maximalen Kälteleistung ab. Nur bei sehr geringer Last – unter ca. 7 % der maximalen Kälteleistung – ist kein stufenloser Betrieb mehr möglich.

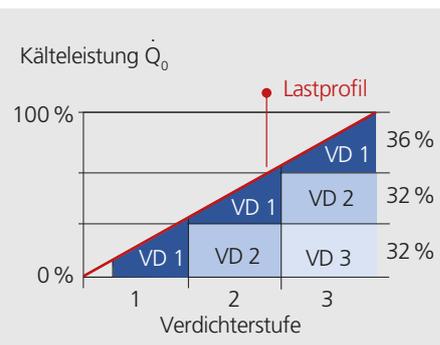
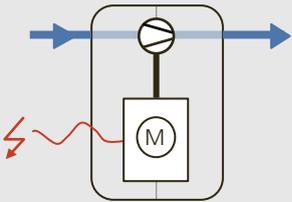
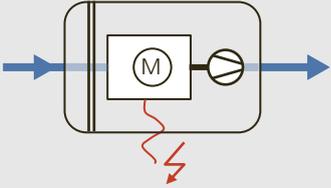
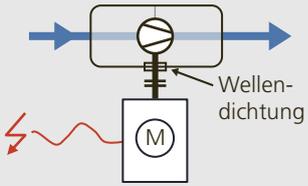


Bild 5.16:
Leistungsregelung mit einem FU bei einem Parallelverbund.

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
<p>Bei vollhermetischen Maschinen bilden der Verdichter und der Elektromotor eine in sich geschlossene Einheit (dicht verschweisst).</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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 	<p>Bei halbhermetischen Maschinen sind der Verdichter und Motor zusammengebaut und zugänglich. Dadurch wird eine Reparatur möglich.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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 700 kW Kälteleistung 	<p>Bei offenen Maschinen sind der Verdichter und Motor voneinander getrennt. Dieses System wird vor allem bei höheren Leistungen und bei Ammoniak Anwendungen eingesetzt. (NH₃ würde die Kupferwicklungen angreifen).</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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 • Leistungsbereich offene Verdichter 200 bis 2000 kW
		
<p>Bild 5.17: Vollhermetischer Verdichter.</p>	<p>Bild 5.18: Halbhermetischer Verdichter.</p>	<p>Bild 5.19: Offener Verdichter.</p>

Aspekte der Stromversorgung

Bei Direktschaltung von Elektromotoren beträgt der Anlaufstrom etwa 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 bis 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.

Sanftanlasser

Um den Anlaufstrom zu reduzieren, können Sanftanlasser verwendet werden. Sie werden nach der Startphase überbrückt und arbeiten verlustfrei.

Oberwellen bei Frequenzumformern

Frequenzumformer können Oberwellen im elektrischen Netz verursachen. Diese «verschmutzen» das Netz, was zu Störungen führt. Daher müssen Oberwellen mit Filtern oder Drosseln unterdrückt werden. Die Oberwellenfilter können direkt beim Frequenzumformer installiert werden. Es kann entweder ein Frequenzumformer mit integriertem Filter oder ein Gesamtfiler in der Elektrohauptverteilung vorgesehen

werden. Zu beachten ist, dass die Filter einen Verlust von ca. 3 % verursachen.

Koordination mit Elektroplaner

In der Projektphase muss die zuständige Klimakälteplanerin 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.
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.
Sanftanlasser	kein höherer Anlaufstrom	4000 Fr.	10000 Fr.	

Bild 5.20:
Anlaufarten von
Verdichter-Motoren.

Auslegung Verdichter

Die Auslegung des Verdichters ist Sache des Lieferanten. Im Kapitel 4.6 sind die Informationen beschrieben, die der Lieferant dazu vom Planer benötigt.

Für die Auslegung stehen dem Lieferanten verschiedene Auslegungsprogramme der Verdichterhersteller zur Verfügung. In diesen werden die

1. technischen Eingabeparameter
 - Anwendung
 - Bauart
 - Kältemittel,
2. Auslegungsdaten
 - Kälteleistung
 - Betriebspunkt
 - Betriebsbedingungen und
3. Art der Leistungsregelung eingegeben (Bild 5.21).

Das Programm macht verschiedene Vorschläge für Verdichter, welche die Vorgaben erfüllen. Nebst den Verdichterdaten (Kälte-, Verdampfer-, Verflüssigungsleistung, elektrische Leistung, Leistungszahl etc.) werden Auslegungstemperaturen und Einsatzgrenzen dargestellt (Bild 5.22).

Bild 5.22:
Beispiel, wie das Ergebnis einer Verdichterauslegung aussehen kann.

Quelle: www.bitzer.de/websoftware

BITZER SOFTWARE

Hubkolbenverdichter, Halbhermetisch

Modus: Kälte- und Klimaanlage
 Kältemittel: R290
 Bezugstemperatur: Taupunkt
 Verdichterart: Einzelverdichter
 Baureihe: Standard
 Motorversion: alle

Verdichterwahl

Kälteleistung: 50 kW
 Verdichtertyp

incl. frühere Typen

Betriebspunkt

Verdampfung: 10 °C
 Verflüssigung: 35 °C

Betriebsbedingungen

Flüss.unterk. (im Verfl.): 0 K
 Sauggastemperatur: 20 °C
 Nutzbare Überhitzung: 100 %
 Betriebsart: Auto

Leistungsregelung

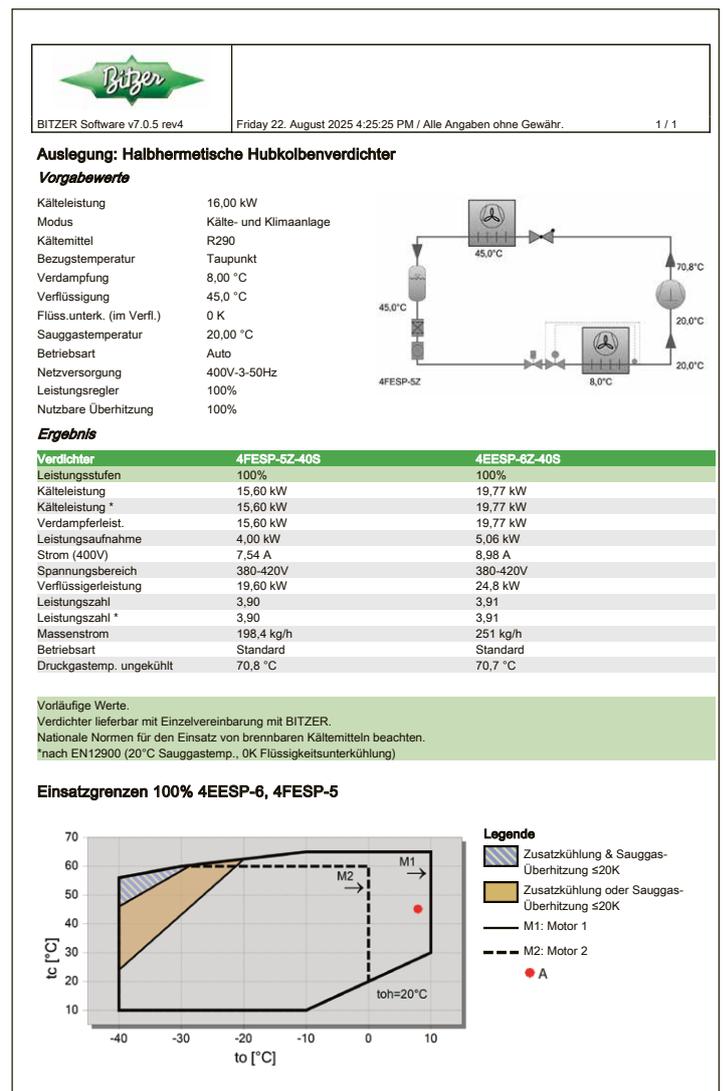
ohne
 Externer FU: Auto
 VARISTEP: Auto
 Gestuft: 100 %

Netzversorgung

Netzfrequenz: 50Hz
 Netzspannung: Standard (400V)

Bild 5.21:
Eingaben für die Auslegung des Verdichters.

Quelle: www.bitzer.de/websoftware



Einsatzgrenzen des Verdichters

Der Einsatz eines Verdichters unterliegt physikalischen und technischen Grenzen, die bei Auslegung und Betrieb unbedingt berücksichtigt werden müssen (siehe Bild 5.23). Eine zentrale Einschränkung betrifft die maximale Verflüssigungstemperatur ①. Sie wird durch die Druckfestigkeit des Verdichters und seiner maximalen Stromaufnahme limitiert. Wird diese Temperatur überschritten, kann dies zu mechanischen Schäden oder zur Überlastung des Motors führen.

Ein weiterer kritischer Punkt ist die maximale Austrittstemperatur ⑤ des Verdichters. Diese ist durch die Temperaturfestigkeit der verbauten Materialien begrenzt. In bestimmten Anwendungen kann dieser Grenzwert jedoch durch den Einsatz einer zusätzlichen Unterkühlung des Kältemittels erweitert werden (siehe blaue Fläche im Bild 5.23).

Auch auf der Niederdruckseite gibt es Einschränkungen: Die minimale Verdampfungstemperatur ④ darf nicht unterschritten werden, da sie sich aus der Siedetemperatur des verwendeten Kältemittels bei Atmosphärendruck ergibt. Ein zu niedriger Verdampfungsdruck kann dazu führen, dass der Verdichter unterhalb des Atmosphärendrucks arbeitet, was unerwünschte Betriebszustände zur Folge haben kann.

Wichtig zu beachten ist auch die minimale Druckdifferenz, die zwischen Verflüssigungs- und Verdampfungsseite bestehen muss ③. Sie ist notwendig, um eine ausreichende Schmierung der Bauteile sicherzustellen. Bei Hubkolbenkompressoren ist sie zudem essenziell, damit die Arbeitsventile zuverlässig öffnen und schliessen können.

Schliesslich ist auch die maximale Verdampfungstemperatur ② eine Einsatzgrenze. Sie wird durch das maximal verfügbare Drehmoment des Antriebsmotors bestimmt. Ist dieses Drehmoment zu gering, kann der Verdichter den notwendigen Druckaufbau nicht mehr gewährleisten. Durch den Einsatz eines leistungsstärkeren Motors kann dieser Bereich jedoch erweitert werden (grüne Fläche im Bild 5.23).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der sichere und effiziente Betrieb eines Verdichters nur innerhalb dieser definierten Einsatzgrenzen gewährleistet werden kann.

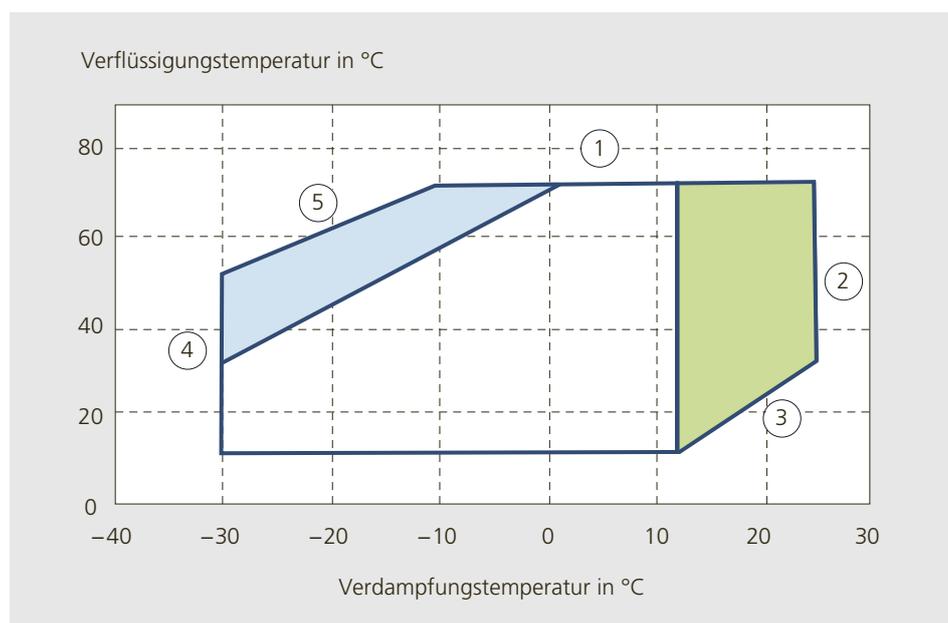


Bild 5.23:
Die Einsatzgrenzen eines Verdichters ergeben sich aus physikalischen und technischen Limitierungen.
Quelle: Bitzer, Kolbenfibel 2014

5.5 Zweistufige Verdichtung

Mit einer einstufigen Verdichtung kann nur ein begrenzter Verdichtungsdruck erreicht werden. Ab einem bestimmten Hub (beispielsweise 40 K, also von T_0 20 °C auf T_c 60 °C) steigen die Temperaturen durch die Kompression im Verdichter so stark an, dass Verdichterbauteile, Kältemittel und Schmieröl ihre Funktion verlieren.

Ist ein grösserer Hub erforderlich (beispielsweise 60 K, also von 20 °C auf 80 °C), wählt man daher eine zweistufige Verdichtung. Dabei wird die Temperatur des Kältemittels zwischen den beiden Verdichtern gezielt gesenkt. Diese Zwischenkühlung – meist durch eine Kältemitelein-spritzung – reduziert die Temperatur nach der zweiten Verdichtung auf ein unkritisches Niveau.

Bild 5.24 und Bild 5.25 zeigen, wie der Niederdruck-Verdichter (ND-Verdichter – Stufe 1) das Kältemittel von Punkt 1 (2 bar) zu Punkt 2 (5 bar) verdichtet. Damit tritt das Kältemittel bereits mit einer höheren Dichte in den Hochdruck-Verdichter (HD-Verdichter – Stufe 2) ein und wird durch diesen von Punkt 3 (5 bar) zu Punkt 4 (10 bar) weiter verdichtet.

Für den gleichen Massenstrom ist also ein geringeres Fördervolumen im HD-Verdichter erforderlich.

Dadurch wird die vom HD-Verdichter zu leistende Arbeit reduziert, was eine zweistufige Verdichtung mit Zwischenkühlung in der Regel um 10 bis 15 % energieeffizienter macht.

als eine einstufige Verdichtung bei gleicher Druckdifferenz. Dafür sind die zweistufigen Maschinen in der Anschaffung etwas teurer.

Neben der höheren Energieeffizienz und der gesteigerten Kälteleistung – die Anlage erzielt eine insgesamt grössere Leistung – erhöht die zweite Verdichterstufe auch die Lebensdauer der Kälteanlage, da Bauteile weniger stark beansprucht werden, die Schmierung verbessert wird und die thermische Belastung sinkt.

Bild 5.24:
Zweistufige
Verdichtung mit einer
Zwischenkühlung
mit einer Kältemittel-
einspritzung.

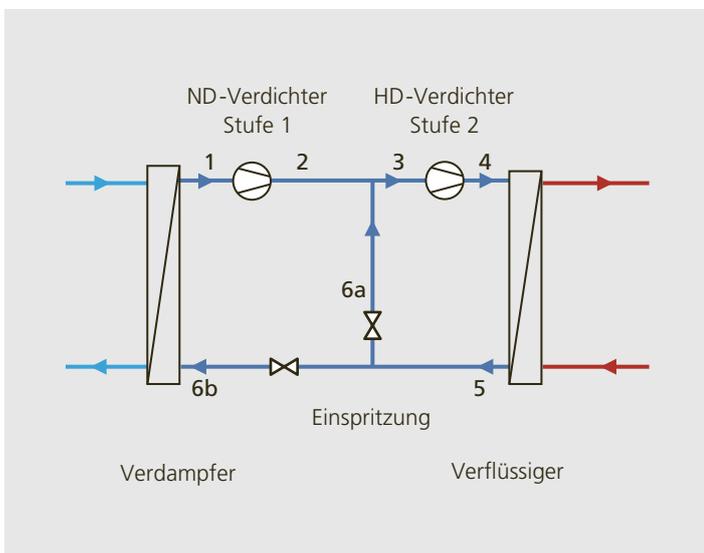
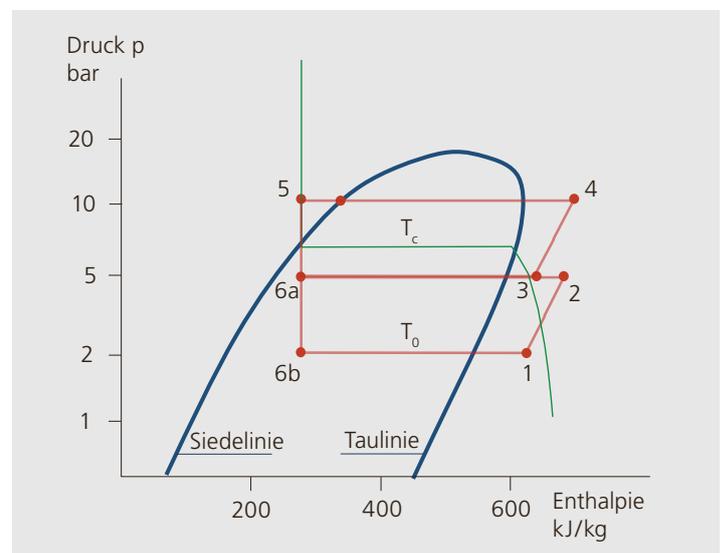


Bild 5.25:
Kältekreislauf einer
zweistufigen Verdich-
tung nach Bild 5.24.



Eine weitere Variante einer zweistufigen Verdichtung wird mit einem überfluteten Verdampfer und einem Open-Flash-Economiser realisiert. Bild 5.26 und Bild 5.27 illustrieren die Funktionsweise dieser zweistufigen Verdichtung.

Nach dem überfluteten Verdampfer (Punkt 1) strömt das gasförmige Kältemittel in den Niederdruck-Verdichter (ND-Verdichter – Stufe 1) und wird auf den Mitteldruck (5 bar) verdichtet (Punkt 2). Danach strömt es in den Open-Flash-Economiser – ein Behälter ohne Einbauten, in dem Mitteldruck herrscht. Im Open-Flash-Economiser sammelt sich im oberen Bereich das dampfförmige Kältemittel (Punkt 3), das in den Hochdruck-Verdichter (HD-Verdichter – Stufe 2) geleitet wird. Im HD-Verdichter wird das Kältemittel nun auf 10 bar (Punkt 4) weiter verdichtet. Nach dem Verflüssigen erfolgt die erste Entspannung auf den Mitteldruck (Punkt 6). Dabei verdampft ca. 10 % des Kältemittel-Massenstroms (Flash-Gas). Das flüssige Kältemittel (Punkt 7) wird nach einer zweiten Entspannung (Punkt 8) in den überfluteten Verdampfer geführt.

Der Open-Flash-Economiser bildet die Mitteldruckebene und wirkt als Zwischenkühlung. So erhöht er die Leistung (Punkt 8 → Punkt 1) und die Effizienz der Maschine um bis zu 20 % – besonders bei hohen Druckverhältnissen. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung ist, dass sich der Economiser ohne zusätzliche Regelungstechnik auto-

matisch an wechselnde Lasten und Temperaturen anpasst.

Es gibt auch Hersteller, die Schraubenverdichter mit einem Economiser-Anschluss anbieten (Mitteldruck-Anschluss). Dies erlaubt eine zweistufige Verdichtung mit einem Verdichter.

Andere Hersteller nutzen Unterkühler-Economiser mit Wärmeübertrager. Diese Lösung hat den Vorteil, dass sie weniger Kältemittel benötigt und hydraulisch einfacher ist. Sie ist hingegen etwas weniger effizient und hat weniger Kälteleistung.

Bild 5.26:
Zweistufige
Verdichtung mit
einem Open-Flash-
Economiser und
einem überfluteten
Verdampfer.

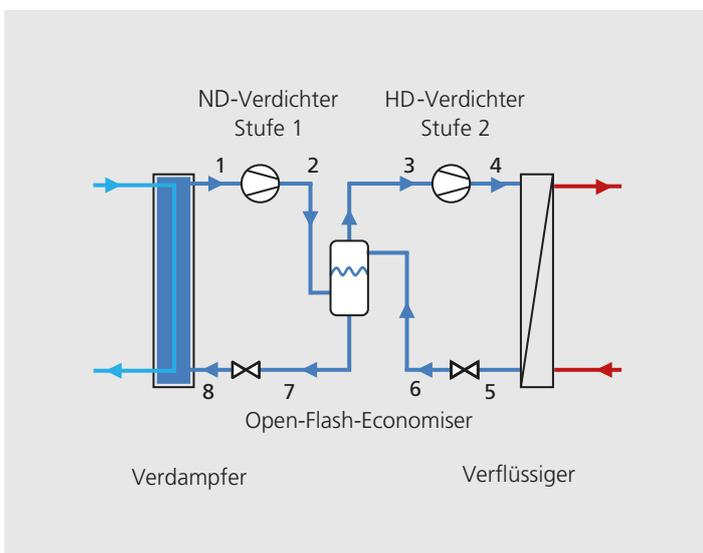
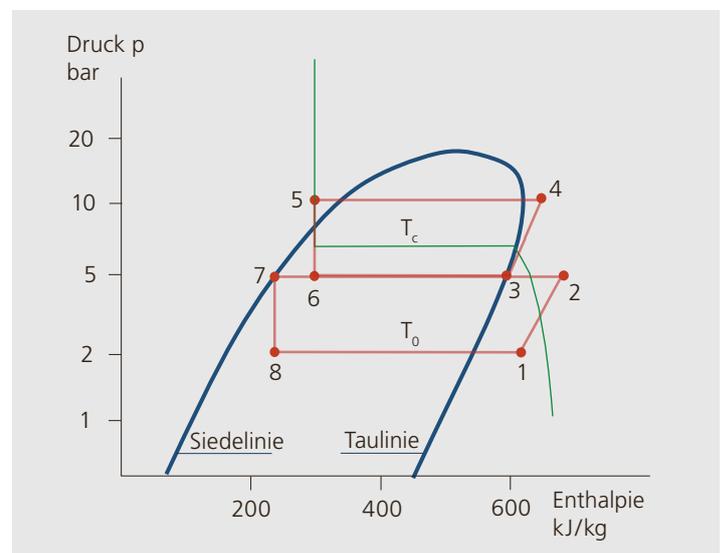


Bild 5.27:
Zweistufige Ver-
dichtung gemäss
Bild 5.26.



5.6 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 schlechter geeignet für verschmutzte Medien.



Bild 5.28:
Rohrbündel-
Wärmeübertrager.
Quelle: Bitzer



Bild 5.29:
Platten-Wärmeüber-
trager.
Quelle: 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 aufgedrückten 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 und Behälter (z. B. Wärmeübertrager) 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 der Planerin oder dem Lieferanten.

Der SVTI (Schweizer Verein für technische Inspektion) führt für die SUVA die Inspektionen durch. In der Druckgeräteverordnung und der EKAS-Richtlinie¹ «Druckgeräte» sind alle wichtigen Informationen zur Nutzung der Druckgeräte beschrieben. Diese Überprüfung durch den SVTI 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 5.30).

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

¹ mit thermostatischem Expansionsventil ² mit elektronischem Expansionsventil

Bild 5.30: Anzustrebende Temperaturdifferenzen bei Wärmeübertragern.

Quelle: Leitfaden mit Massnahmen zur Optimierung von Kälteanlagen, BFE 2012, basiert auf Angaben der VDMA 24247-8

Effizienz von Wärmeübertragern in Kaltwasser-, Warmwasser- und Kühlwasserkreisen

In den verschiedenen Wasserkreisen einer Klimakälteanlage werden oft Sekundärwärmeübertrager oder Systemtrenner benötigt. Grund dafür können Sicherheitsanforderungen (siehe auch Kapitel 8.3), unterschiedliche Medien oder auch hydraulische Trennungen sein.

Doch jede Wärmeübertragung bedeutet einen Effizienzverlust. Um diesen möglichst gering zu halten, darf – gemäss SIA 384/4 (2025) – die Temperaturdifferenz zwischen dem Eintritt auf der Primärseite (T_E) und dem Austritt auf der Sekundärseite (T_A) bei Wärmeübertragern im Kaltwasser-, Warmwasser- und Kühlwasserkreis am Auslegungspunkt maximal 2 Kelvin betragen.

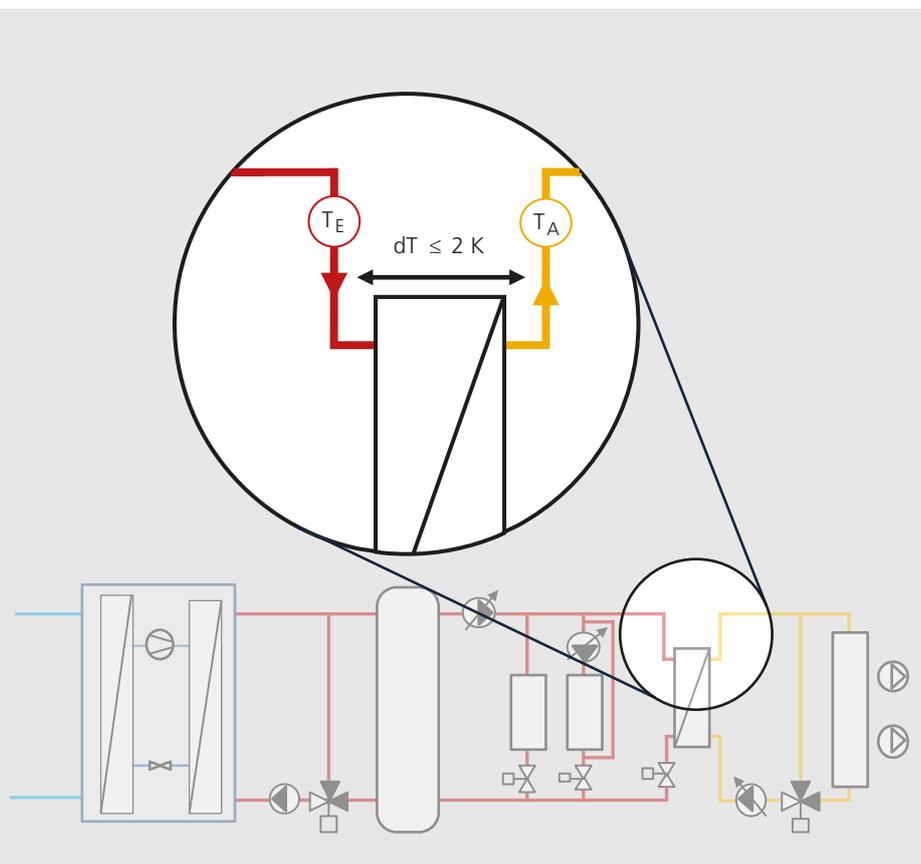


Bild 5.31:
Zwischen dem Eintritt des Warmwassers (T_E) in den Wärmeübertrager und dem Austritt des Kühlwassers (T_A) darf die maximale Temperaturdifferenz ΔT nicht mehr als 2 K betragen.
(Bild aus SIA 384/4 (2025) adaptiert)

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 $T_0 = 10\text{ °C}$ 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 die Planerin 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.

Beispiele für die Festlegung des Verschmutzungsfaktors FF in Bild 5.33.

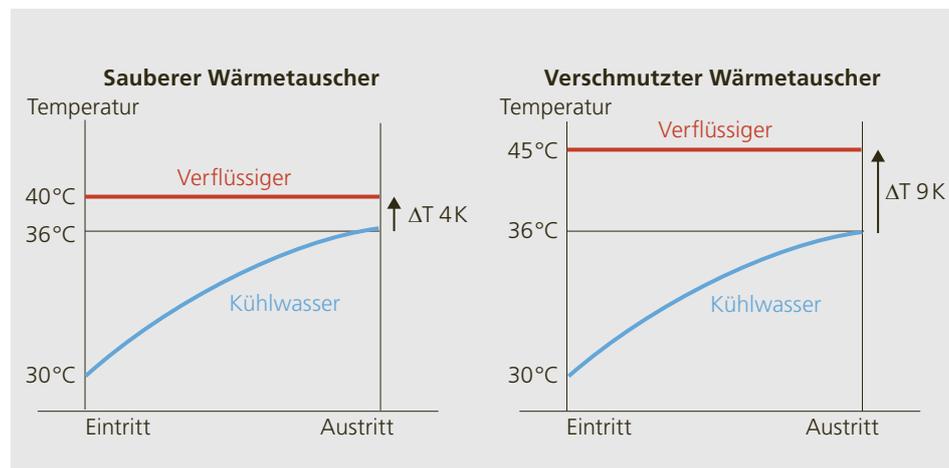


Bild 5.32: Einfluss der Verschmutzung auf die Energieeffizienz.

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 5.33: Verschmutzung der Wärmeübertrager und Verschmutzungsfaktor.

5.7 Verdampfer

Im Verdampfer wird der Umgebung (Luft, Wasser, Kälte­trä­ger­ge­misch 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 5.34:
Rohrbündel-
Trockenexpansions-
Verdampfer.
Quelle: vpro

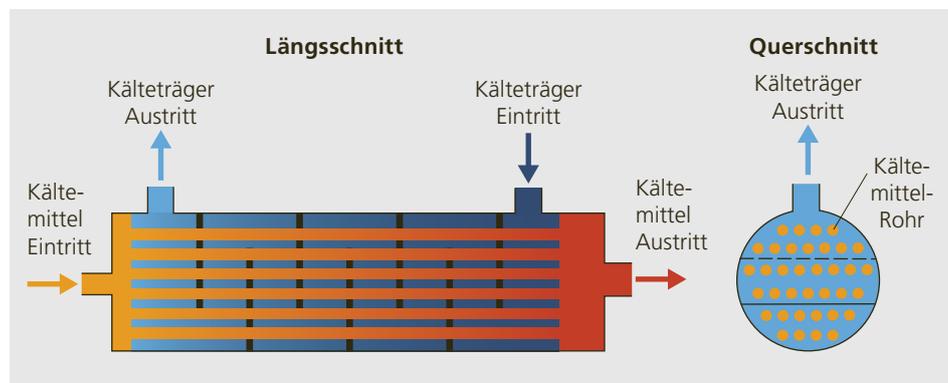
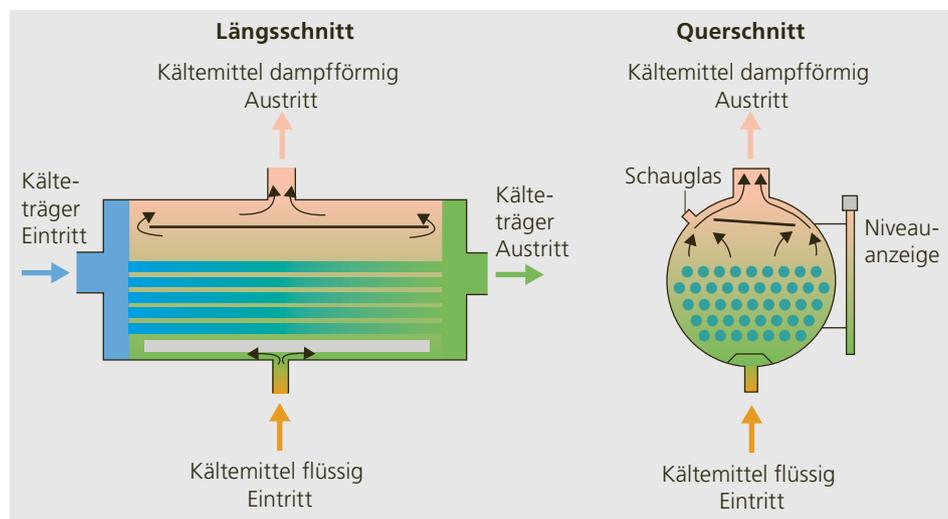


Bild 5.35:
Überfluteter Rohrbündel-
Verdampfer.
Quelle: vpro



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-Schwimmerregelung 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 mindestens 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 5.37). Der Grund dafür ist die grössere notwendige Kältemittelüberhitzung. Dies wirkt sich negativ auf die Energieeffizienz der Anlage aus.



Bild 5.36:
Lammellenwärmeübertrager als Verdampfer.

Gegenüberstellung der Verdampferarten am Beispiel eines Rohrbündelapparats		
Prinzip	Trockenexpansion	Überfluteter Verdampfer
Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> Das Kältemittel befindet sich in den Rohren. Das Öl zirkuliert im Kreislauf mit (bei Teillast unter 50 % ist die Aufteilung auf mehrere Kreisläufe erforderlich). 	<ul style="list-style-type: none"> Das Kältemittel befindet sich im Mantelraum. Bei Öl im Kältekreislauf (ölgeschmierte Verdichter) spezielle Ölrückführung.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> + Kleinere Kältemittelfüllung + Öl wird zwangsläufig mitbefördert + Tieferer Preis der Kältemaschine 	<ul style="list-style-type: none"> + 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 <p>Bei Rohrbündel-Verdampfer:</p> <ul style="list-style-type: none"> + Kann auf Mediumseite mechanisch gereinigt werden (ev. mit Rohrreinigungssystem). + Sichtbare Verdampfung, messbare Niveaumessung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Tiefere Leistungszahl – Grössere Sauggasüberhitzung <ul style="list-style-type: none"> • thermostatisches Expansionsventil 7–8 K • elektronisches Expansionsventil 4,5–5 K – Mechanische Reinigung nicht möglich – Erhöhte Betriebssicherheit bei Anlagen mit mehreren Kreisläufen – Einfriergefahr in den Ecken des Verdampfers (bei Verdampfung nahe 0°C) – Minimale Austrittstemperaturen: <ul style="list-style-type: none"> • Kältemittel ohne Gleit 6°C • Kältemittel mit Gleit 8°C – Bei ungenügender Überhitzung Gefahr von Flüssigkeitsschlägen – Konstanter Volumenstrom erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> – Grössere Kältemittelfüllung – Ölrückführung aufwendig (falls notwendig) – Höherer Preis der Kältemaschine – Grosse Wärmeübertragerfläche und Abscheideraum erforderlich (= teuer) – Nicht geeignet für Kältemittelgemische mit Gleit (zeotrope Kältemittel)
Systemtemperaturen am Beispiel eines Platten-Verdampfers		
	<p>Überhitzung = 7 K</p>	<p>Überhitzung = 0,5 K</p>

Bild 5.37: Merkmale, Vor- und Nachteile von überfluteten und Trockenexpansions-Verdampfern.

5.8 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 entthitzt, 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 5.39.

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 die Planerin 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 Kältemittel-seite in allen Apparaten gleich. Dieser entspricht der Verflüssigungstemperatur.

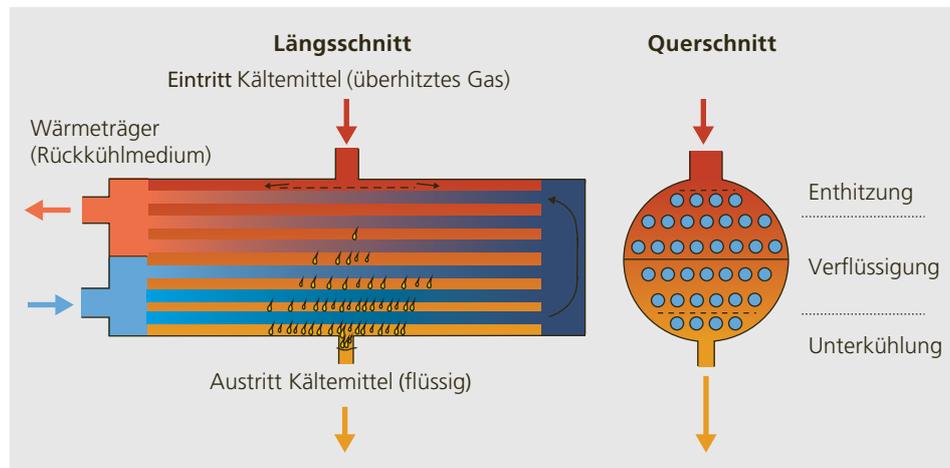


Bild 5.38: Rohrbündel-Verflüssiger in 2-Pass-Ausführung auf der Wärmeträgerseite.

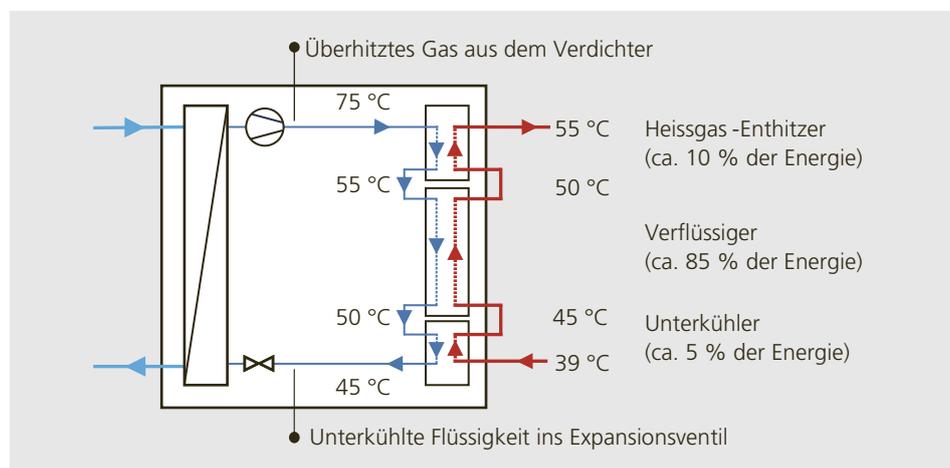


Bild 5.39: Beispiel der Nutzungsmöglichkeiten der Wärme auf der Verflüssigerseite auf unterschiedlichem Temperaturniveau.

Die Installation eines Unterkühlers liegt im Ermessen des Kältemaschinenbauers. Die Unterkühlung ist entscheidend bezüglich der Leistung und der Effizienz.

Eine andere Möglichkeit der Wärmenutzung ist in Bild 5.40 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 3.17 und Bild 4.3).

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.

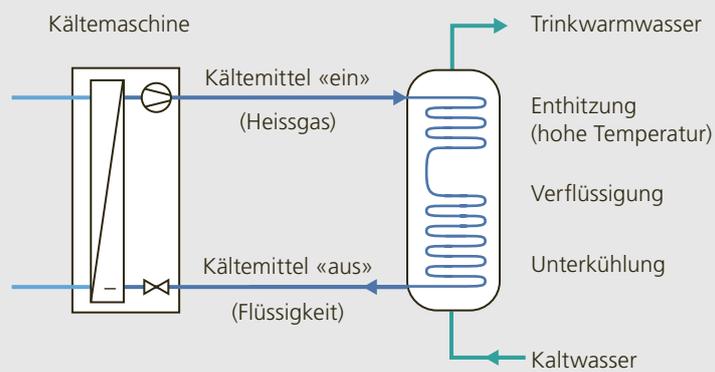


Bild 5.40:
Wärmenutzung für
die Erwärmung von
Trinkwarmwasser
(z. B. Anlagen mit
R744 – CO₂).

Direktverflüssiger mit Lamellenwärmeübertrager

Die Anwendung eines Direktverflüssigers bei einem Split-System* bringt in Bezug auf die Investitionskosten und Energieeffizienz Vorteile. Der Nachteil ist die grössere Kältemittelfüllung (siehe auch Kapitel 11). 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 5.41 abgebildet.

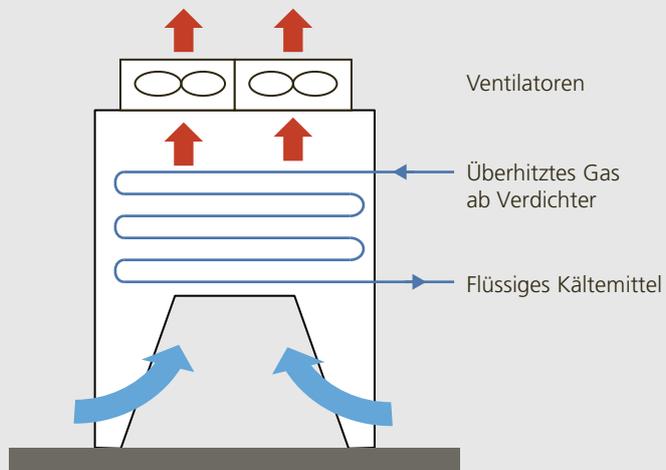
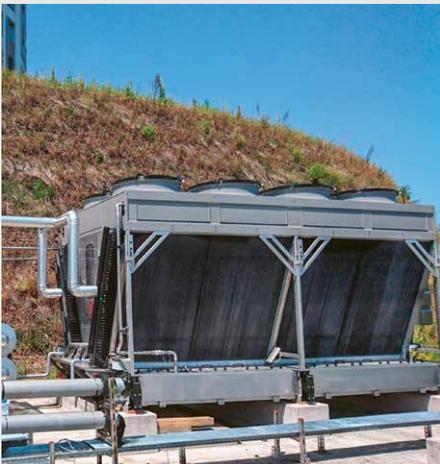


Bild 5.41:
Direktverflüssiger-
Prinzip als
Installationsbeispiel.
Bild: CTA

5.9 Expansionsventil

Das Expansionsventil (Drosselorgan) entspannt das flüssige Kältemittel von der Hochdruck- zur Niederdruckseite des Kältemittel-Kreislaufs und regelt 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.

Ein thermisches Expansionsventil regelt den Kältemittelstrom ausschliesslich über eine fest eingestellte Überhitzungstemperatur. Dadurch ist es bei variabler Kältelei-

stung nur eingeschränkt einsetzbar. Ein elektronisches Expansionsventil erlaubt hingegen kleinere und flexibel einstellbare Überhitzungstemperaturen und ermöglicht damit auch bei schwankender Kälteleistung einen energieeffizienten Betrieb.

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.

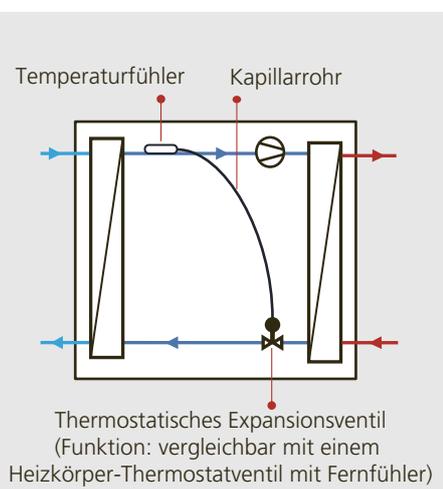


Bild 5.42:
Thermostatisches
Expansionsventil.

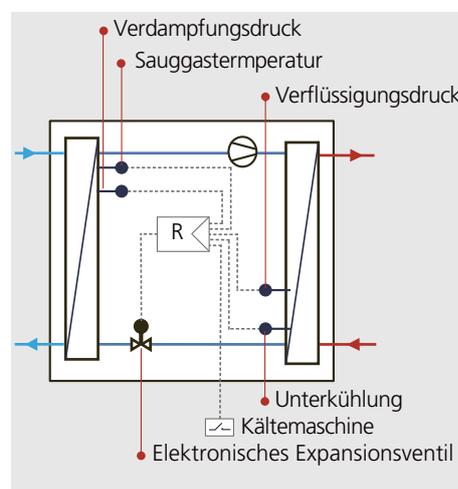


Bild 5.43:
Für die Steuerung des
elektronischen Expan-
sionsventils können
verschiedene Mess-
größen beigezogen
werden.

5.10 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.

Ölabscheider – warum braucht es Öl im Kältemittelkreislauf?

Kältemaschinenöl ist in Kälteanlagen unverzichtbar, um die beweglichen Teile des Verdichters zuverlässig zu schmieren, Wärme abzuleiten und Dichtfunktionen zu übernehmen. Während des Betriebs gelangt das Öl aus dem Verdichter zwangsläufig über das Kältemittel in den Kältekreislauf. Das Öl-Kältemittel-Gemisch wird dann durch das System transportiert. Das Öl sollte sich jedoch nicht in Komponenten wie dem Verdampfer oder dem Rohrnetz absetzen, sondern muss wieder zum Verdichter zurückgeführt werden. Vor allem die überfluteten Systeme benötigen eine besonders zuverlässige Ölrückführung, da das Öl hier stärker im Verdampfer zurückgehalten wird (Bild 5.34 und Bild 5.35).

Die Rückführung des Öls ist Aufgabe des Ölabscheiders. Er trennt das Öl vom gasförmigen Kältemittel und leitet es kontrolliert in den Ölsumpf des Verdichters zurück. Ein effizient arbeitender Ölabscheider trägt entscheidend zur Lebensdauer und Betriebssicherheit der Kälteanlage bei.

Er schützt vor:

- Leistungsverlust durch verminderte Wärmeübertragung,
- unzureichender Schmierung des Verdichters,
- Verschleiss oder Schäden an Systemkomponenten,
- und unnötigem Ölverbrauch.

Insgesamt verbessert ein gutes «Ölmanagement» die Energieeffizienz der Anlage und reduziert das Risiko kostenintensiver Ausfälle.

Es gibt auch ölfreie Verdichter. So benötigen beispielsweise Strömungsverdichter mit Magnetlagerung kein Öl.

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-Service spezialist, 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

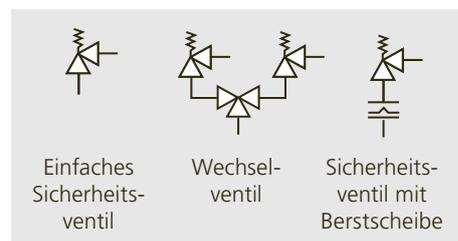


Bild 5.44:
Arten der Druckentlastungseinrichtungen.

dann, wenn alle vorgelagerten Sicherheitsmassnahmen (wie etwa die Hochdruckabschaltung) den Druckanstieg nicht verhindern konnten. Bild 5.44 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 Wechselventilen ausrüsten zu lassen.

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

Bei den Druckentlastungseinrichtungen besteht jeweils die Gefahr, dass das Kälte- mittel durch Undichtheiten schleichend verloren geht. Um dies zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, Berstscheiben ein- zubauen (siehe Bild 5.44).

Aus Kostengründen kommt diese Variante allerdings nur bei Anlagen mit grossen Kälte- mittelfüllungen zur Anwendung.

Wenn die Druckentlastungsvorrichtung anspricht, dann wird das gasförmige Kälte- mittel abgeblasen. Durch das freigesetzte Kältemittel dürfen keine Personen und Sach- en gefährdet werden (siehe SN EN 378). Bei kleinem Kältemittelinhalt der Maschine darf das Kältemittel nur dann in den Ma- schinenraum 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 die Planerin auf die Unterstützung des Maschinenbauers an- gewiesen. Dabei spielen die Kältemittelart, der zulässige Gegendruck, der Druckver- lust der Abblasleitung und die Ventilgrösse eine massgebende Rolle.



Bild 5.45:
Eine mögliche Vari-
ante mit Glycerin-Vor-
lage und Schauglas,
mit der die Dichtheit
überprüft werden
kann.

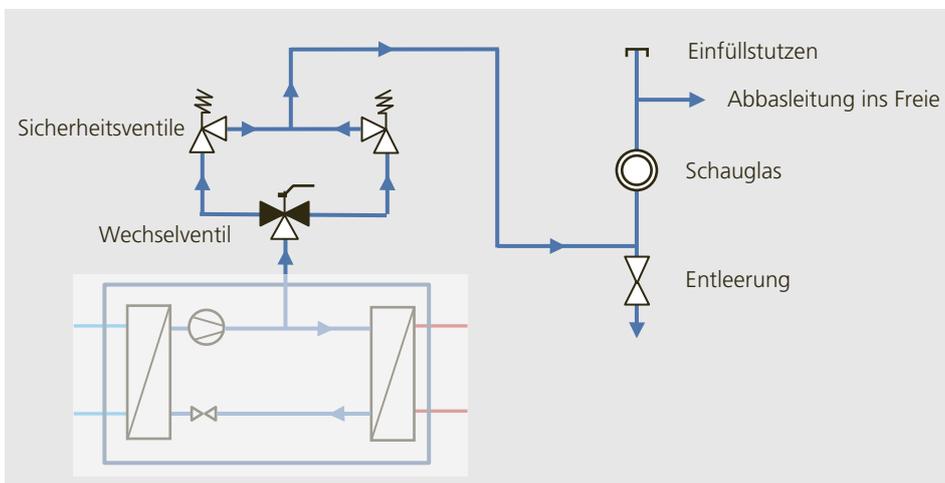


Bild 5.46:
Einbau der Abblas-
leitung nach dem
Sicherheitsventil.

Bei der Installation ist darauf zu achten, dass die Kontrolle der Dichtheit der Einrichtung ohne grossen Aufwand immer möglich ist. Das Bild 5.46 zeigt eine mögliche Variante der Installation der Abblaseleitung mit Glycerin-Vorlage unter der Anwendung von synthetischen Kältemitteln.

Hinweis: Diese Lösung ist bei CO₂-Anlagen nicht erlaubt (gefährlich).

5.11 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 % erfor-

derlich, 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 5.47 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 Regelung zutrifft).
- Billigere Lösung gegenüber Variante mit überflutetem Verdampfer
- Schlechtere Energieeffizienz bei Voll- und insbesondere bei Teillast

Weitere Details siehe auch die Gegenüberstellung der Verdampferarten.

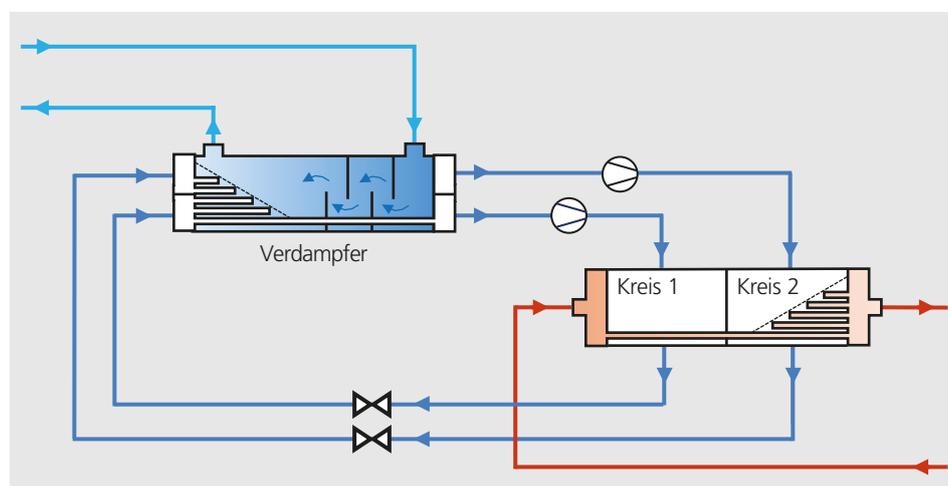


Bild 5.47: System mit Trockenexpansion mit zwei getrennten Kreisläufen (vereinfachte Darstellung).

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 klei-

neren Druckdifferenz überwinden, die Leistungszahl der Kältemaschine steigt entsprechend.

Je nach Systemaufbau zirkuliert das Kältemittel zwischen dem Abscheider und Verdampfer selbstständig (Thermosyphon-Effekt) oder es braucht eine Kältemittelpumpe, wie im Bild 5.49

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 5.48:
System mit überflutetem Rohrbündel-Verdampfer mit synthetischen Kältemitteln (vereinfachte Darstellung).

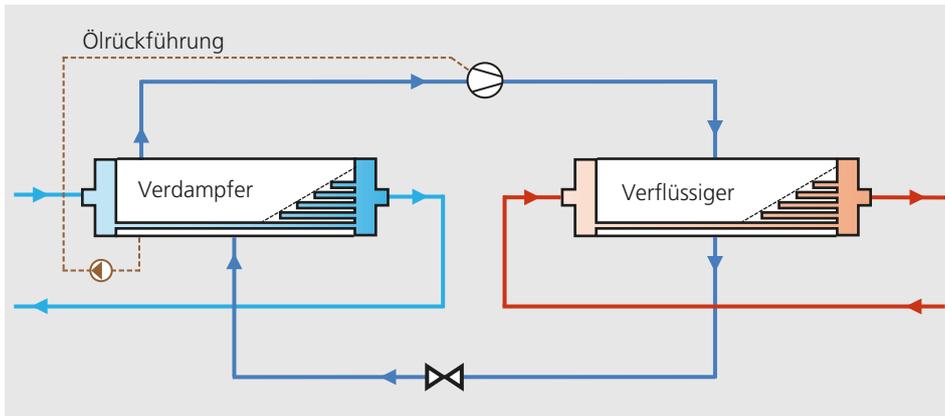
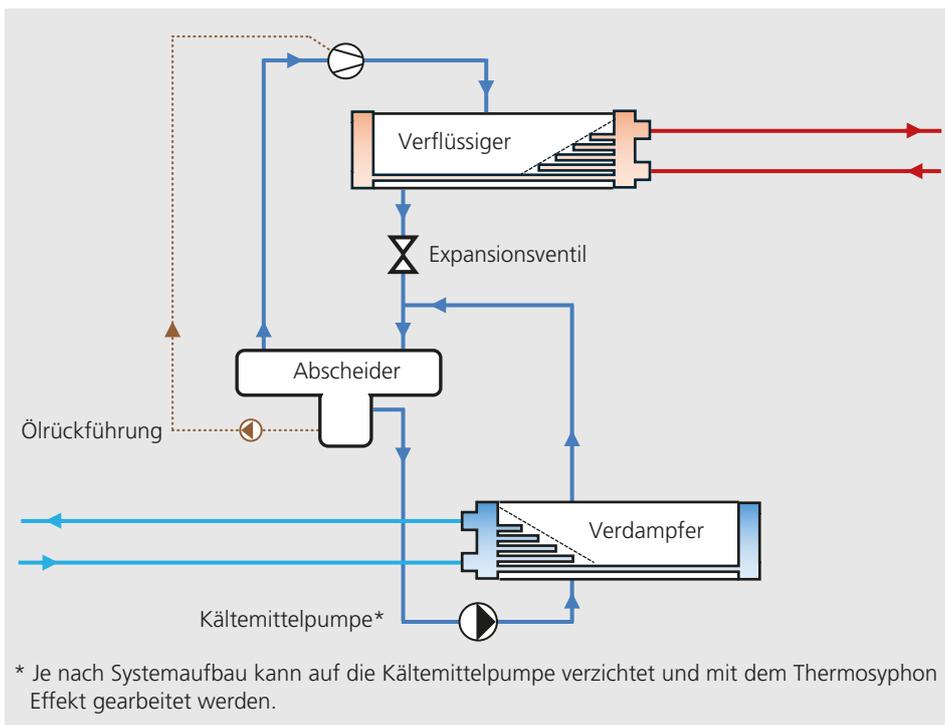


Bild 5.49:
System mit überflutetem Rohrbündel-Verdampfer mit Ammoniak als Kältemittel (vereinfachte Darstellung).



* Je nach Systemaufbau kann auf die Kältemittelpumpe verzichtet und mit dem Thermosyphon Effekt gearbeitet werden.

10 Merkmale 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 Überhitzungstemperatur tiefer eingestellt werden kann.
9. Verflüssiger und Verdampfer: Variable Wassermengen mit drehzahlgeregelten Pumpen erhöhen die Energieeffizienz aufgrund des reduzierten Pumpenstroms. Die minimalen Wassermengen sind mit dem Hersteller im Vorfeld zu klären (üblich = 30–100 %). 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.

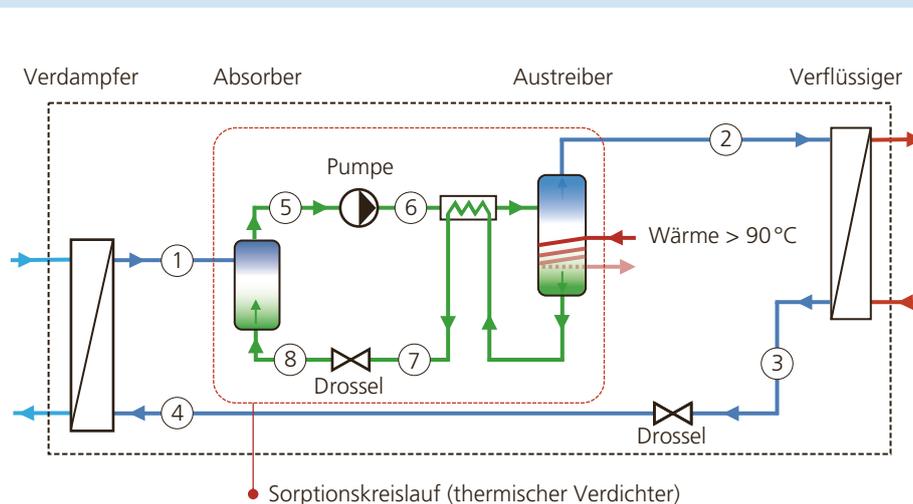
Der Absorber entspricht der «Saugseite» des Verdichters. In diesem Apparat absorbiert die Lösung, die reich an Absorptionsmitteln ist, den aus dem Verdampfer abgesaugten Kältemitteldampf. Dabei wird Wärme frei, welche abgeführt werden muss. Die Pumpe überwindet den Druckunterschied und fördert die Lösung vom Absorber über einen Temperaturwechsler, der das Lösungsmittel vorwärmt, zum Austreiber. Der Austreiber entspricht der «Druckseite» des Verdichters. 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-Regelventil zum Absorber zurück. Die dem Austreiber zugeführte Wärmemenge entspricht der mechanischen Kompressionsarbeit. Der Leistungsbedarf der Druckerhöhungspumpe ist verhältnismässig klein.

Eine Absorptionsmaschine erzeugt mit Wärme Kälte.

Übliche Stoffpaare

Bei Absorptionskältemaschinen werden sogenannte Stoffpaare als Arbeitsstoff im Kältekreis eingesetzt. Bei den Stoffpaaren ist einer das Kältemittel und der andere das Sorptionsmittel. Das können sein:

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



- 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 5.50:
Prinzip einer
Absorptionskälte-
maschine.

Energetischer Vergleich von Absorptions- und Kompressionskälte

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

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

- 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). Je tiefer der Kaltwasser-Sollwert sein muss, umso höher muss die Austreibertemperatur sein.
- 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 Geräusentwicklung, sehr leise
- Verwertung von Abwärme, die mehr als 90 °C warm ist
- Einfache Regelung

Nachteile

- Hohe Investitionskosten
- Grosser Kühlwasserverbrauch (grosser Rückkühler, Platzbedarf!)
- Arbeitsstoffgemisch Wasser-Lithiumbromid (H₂O/LiBr) ist stark korrosiv
- Arbeitsstoffgemisch Ammoniak-Wasser (NH₃/H₂O) ist hoch toxisch und entflammbar
- Gefahr von Kristallisation
- Schwer (hohes Gewicht)

Absorptions-Kältemaschine

240% Kühlwasserwärme



140%
Wärmeenergie

100% nutzbare Kälte

Kompressions-Kältemaschine

125% Kühlwasserwärme



25%
elektrische Energie

100% nutzbare Kälte

Bild 5.51:
Energetischer
Vergleich von
Kompressions- und
Absorptionskälte.

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?

$$\begin{array}{c} \text{Kaltwassertemperatur} \\ = \\ \text{Kältekreis-Vorlauftemperatur} \end{array}$$

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 einzel-

nen 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.

Regelung der Kälte-Gruppen

Die Kälte-Gruppen sind mit Vorlauftemperatur-Regelungen auszurüsten, damit immer entsprechend hohe Rücklauftemperaturen resultieren. Weiter sind die Verbraucher für ein effizientes Kaltwassernetz mit Mengenregelungen (Durchgangsventile) auszurüsten.

Bild 6.1:
Beispiel Verbrauchergruppen mit unterschiedlichen Kaltwassertemperaturen.

	Kaltwassertemperatur	Anteil an der Leistung	Leistung $\dot{Q}_{\text{Kälte}}$	
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.			

Zu beachten: Umlenkventile sind eine schlechte Lösung, da sie im Kaltwasser-Netz «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.

In der SIA 384/4 (2025) sind die maximalen Kaltwassertemperaturen für die verschiedenen Wärmeaufnahme-Systeme definiert (siehe Bild 6.2).

Kühlen mit kontrollierter Entfeuchtung

Früher wurden alle Kälteanlagen mit 6°C/12°C (6°C Kälte-träger-Vorlauf und 12°C Kälte-träger-Rücklauf) auf die technisch tiefste Kaltwassertemperatur ausgelegt. Daher gibt es immer noch alte Kälte-

anlagen 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 Kühl-labors etc.). Zu beachten ist, dass die Luftentfeuchtung nicht nur mit tiefen Kaltwassertemperaturen erreicht werden kann, sondern auch durch Anwendung von Absorptions-Prozessen¹.

¹ Die Absorption erfolgt mit zwei Luftvolumenströmen. Dabei wird dem Zuluftstrom mit einem «Feuchterad» Feuchte entzogen und diese auf die Abluft (Regenerationsluft) übertragen.

	System	Kaltwassertemperatur T_{KK-VL}
18°C	1. Komfortkühlung (Flächenkühlung)	≥ 18°C
	• Fussbodenkühlung in Kombination mit einem hygroskopischen Material (z. B. Holz)	≥ 20°C
	• Fussbodenkühlung mit einer Festwertregelung ²	≥ 20°C
	• Fussbodenkühlung mit einer Kühlkurve geregelt ¹	≥ 19°C
	• Thermoaktive Bauteilsysteme	≥ 19°C
14°C	• Kühldecken	≥ 18°C
	2. Kühlung ohne Entfeuchtung	14°C bis < 18°C
10°C	ventilatorgestützte Abgabesysteme ³	14°C
	Luftkühler in Lüftungsanlagen	
6°C	3. Kühlung mit Teilentfeuchtung	10°C bis < 14°C
6°C	4. Kühlung mit kontrollierter Entfeuchtung	6°C bis < 10°C

¹ Bei einer Fussbodenkühlung mit einer Kühlkurve variiert die Kaltwasser-Vorlauf-temperatur anhand des Taupunkts (berechnet aus Aussentemperatur und rel. Feuchte). Dabei wird mit einem Fusspunkt die minimale Kaltwasser-Vorlauf-temperatur festgelegt, und mit steigendem Taupunkt wird die Kaltwasser-Vorlauf-temperatur leicht angehoben.

² Bei einer Festwertregelung wird die Kaltwasser-Vorlauf-temperatur auf einen festen Wert eingestellt. Dieser ist nicht von der Aussentemperatur abhängig.

³ Klimakonvektoren, Umluftkühlgeräte usw.

Bild 6.2:
Für die aufgeführten Verwendungszwecke der Kälte dürfen die von der SIA 384/4 (2025) vorgegebenen Kaltwassertemperaturen nicht unterschritten werden.
Quelle: adaptiert aus SIA 384/4 (2025)

Zudem kann man durch Heizen die relative Feuchte reduzieren, da warme Luft mehr Feuchte aufnehmen kann und diese von der zu entfeuchtenden Luft übernimmt.¹

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 Kalt-

wassertemperatur von 10°C für Raumkühlungen muss im Bewilligungsverfahren nachgewiesen werden. Die Energiegesetzgebung will dadurch verhindern, dass unnötig tiefe Kaltwassertemperaturen erzeugt werden. 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%

¹ Die Kühlung durch Trocknung und Verdunstung wird in der Fachsprache auch DCS (Desiccant Cooling Systems) oder DEC (Desiccative and Evaporative Cooling) bezeichnet.

Relative Raumluftheuchte %

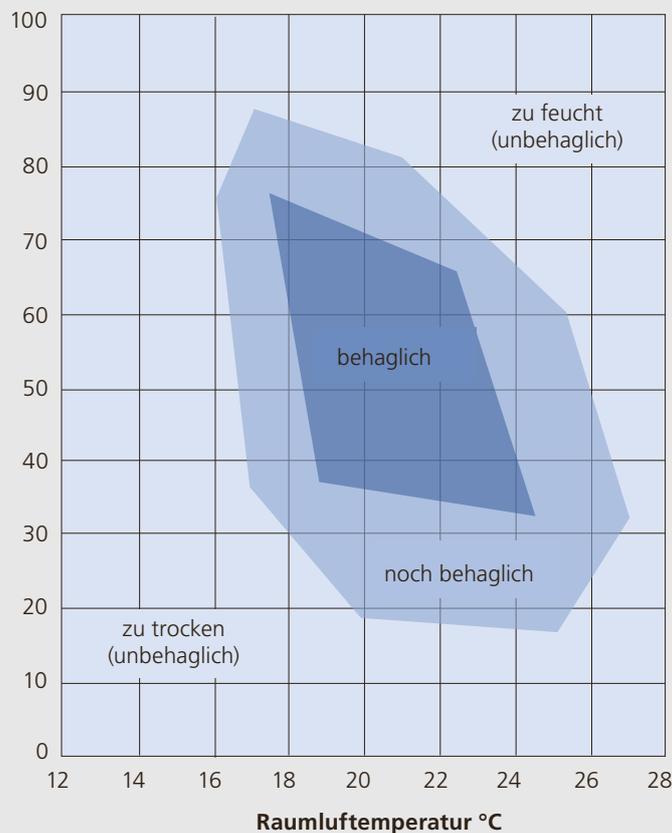


Bild 6.3:
Die Behaglichkeit (Wohlfühltemperatur) ist abhängig von der Raumluftheuchte und Luftfeuchtigkeit.
Nach Leusden und Freymark

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 Feuchte-lasten (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.

Klimakonvektoren

Bei bestehenden Bauten sieht man hier 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 Klima-

konvektor 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 Zugerscheinungen. Viele Nut-



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 (Indukti-
onsgeräte) arbeiten
geräuscharm.
Quelle: Swegon

zer empfinden dies als unangenehm und reklamieren.

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

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/m²–80 W/m². Mit konvektiven «Hochleistungssystemen» können sogar Spitzenleistungen von bis zu 130 W/m² erreicht werden. Bei solch hoch getrimmten Systemen empfiehlt es sich, mit dem Lieferanten genau anzuschauen, ob die sehr hohe Kühlleistung erreicht wird.

TABS und selbstregelnde Bodenkühlungen

Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) oder selbstregelnde 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 selbstregelnde 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.

Exkurs

Kühlen über Bodenheizungen

Bodenheizungen werden – insbesondere in Wohngebäuden – zunehmend auch zur Kühlung eingesetzt. Diese Anwendung fällt jedoch nicht in den Geltungsbereich gängiger Normen wie der SIA 384/4 (2025), da die Kühlleistung begrenzt ist und nicht garantiert werden kann.

Beim Kühlen über die Bodenheizung ist die Luftfeuchtigkeit bzw. der Taupunkt, bei dem sich Kondensat bildet, der zentrale Aspekt. Wird der Taupunkt durch zu niedrige Temperaturen des Kälte-trägers unterschritten, kann auf oder im Boden sowie in den Steigzonen Kondensat entstehen – mit potenziell kostspieligen Bauschäden als Folge. Bereits zahlreiche Hauseigentümer mussten die Missachtung der Taupunktgrenze mit aufgequollenen Holzparkettböden teuer bezahlen.

Um eine sichere Kühlung über Bodenflächen zu gewährleisten, muss die Bildung von Kondensat unbedingt vermieden werden. Die Temperatur des Kälte-trägers sollte deshalb:

- bei hygroskopischen Bodenbelägen (z. B. Holzparkett) mindestens 4 bis 5 K über dem Taupunkt,
- bei nicht hygroskopischen Belägen mindestens 3 K über dem Taupunkt liegen.

Basierend auf diesen Überlegungen macht die SIA 384/4 (2025) Vorgaben zu den minimalen Kaltwassertemperaturen (Bild 6.7). Diese Vorgaben schränken die minimal mögliche Kaltwassertemperatur – und damit die maximal mögliche Kühlleistung einer Bodenheizung – stark ein. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Kälte-träger und Raumluft liegt die Kühlleistung typischerweise bei 20 bis 30 W/m², gemessen bei einer Fussbodentemperatur von 22 °C und einer Raumtemperatur von 27 °C. Dadurch lässt sich die Raumtemperatur in der Praxis um etwa 2 bis 3 K senken.

Je nach System erfolgt die Regelung der Kaltwassertemperatur entweder über Raumtemperatur- und Feuchtefühler zur Ermittlung des aktuellen Taupunkts oder automatisch über die Steuerung der Wärmepumpe. Zusätzlich wird der Einsatz eines Sicherheitsthermostats empfohlen, der bei Unterschreitung einer Kälte-träger-temperatur von 17 °C die Umwälzpumpe abschaltet. Zudem wird eine Regelung benötigt, die eine Heiz-/Kühlumschaltung ermöglicht (Zweipunktthermostat Sommer-Winter) oder es muss ein selbstregelndes System geplant werden. Gegebenenfalls sind weitere Komponenten wie Speicher oder Umschaltventile notwendig. Auch müssen die Steig- und Verteilleitungen mindestens 19 mm stark und diffusionsdicht gedämmt sein.

Für die Kühlung generell und somit auch für eine Kühlung über die Bodenheizung verlangt das Energiegesetz bei Wärmepumpen – im Gegensatz zu Kälteanlagen – in der Regel keine «Kühl-Bewilligung».

Weitere Infos siehe Suissetec-Merkblatt «Kühlung mit der Fussbodenheizung»

System	Minimale Kaltwassertemperatur
Fussbodenkühlung mit geregelter Kühlkurve	≥ 19 °C
Fussbodenkühlung mit Festwertregelung ¹	≥ 20 °C
Fussbodenkühlung mit hygroskopischem Bodenbelag (z. B. Holz)	≥ 20 °C

¹ Bei einer Festwertregelung wird die Kaltwasser-Vorlauf-temperatur auf einen fixen Wert eingestellt, unabhängig von der Aussentemperatur.

Bild 6.7:
Empfohlene minimale Kaltwassertemperaturen bei Kühlung über Fussbodenheizungen.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

6.3 Übersicht Kühlsysteme

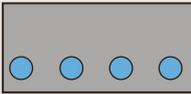
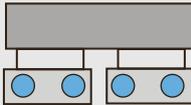
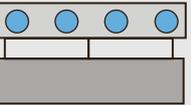
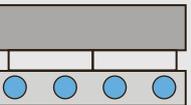
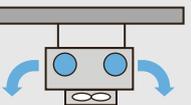
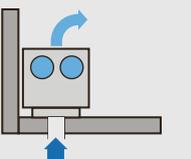
Wärme-Entzug mit Kaltwasser	Funktion	Skizze	Vorteile	Nachteile
Bauteilkühlung				
Thermoaktive Bauteilsysteme TABS	Bauteilkühlung mit Masseaktivierung		kostengünstige, stille Kühlung nach oben und nach unten, bis 30 W/m ²	teilweise unkontrollierte Kühlung; Integration im Betonbauteil. Die freie Decke kann bezüglich Schall problematisch sein.
Kühlbalken; Kühlbaffle	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; Zugerscheinungen 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 (Zugerscheinungen)
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 Zugerscheinungen, Schallemission, energetisch aufwendiger; Brüstung muss geplant werden, Servicekosten

Bild 6.8: Verschiedene Kälteabgabesysteme. (In Anlehnung an die Tabelle im Fachbuch Gebäudetechnik; von Euw, Alimpic, Hildebrand, 2012)

6.4 Zuluft kühlen und entfeuchten im Lüftungsgerät

Im Lüftungsgerät von raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlage) wird die Zuluft aufbereitet. Über die Lüftung wird verbrauchte Luft (CO₂, Gerüche, Schadstoffe) abgeführt und gleichzeitig frische, gefilterte Luft (frei von Pollen und Schadstoffen) zugeführt. Darüber hinaus kann im Lüftungsgerät die Zuluft gekühlt, beheizt, entfeuchtet oder befeuchtet werden. Zum Kühlen und Entfeuchten der Luft wird eine Klimakälteanlage benötigt.

Kühlen im Lüftungsgerät

Die warme Aussenluft wird im Lüftungsgerät gekühlt und anschliessend in die Räume eingeblasen. Dadurch kann das Gebäude ganz oder teilweise klimatisiert werden.

Gleichzeitig wird die warme, feuchte und verbrauchte Raumluft abgeführt. Die Kühlung von Luft erhöht deren relative Luftfeuchtigkeit.

Mollier-Diagramm

Das Mollier-Diagramm (h,x-Diagramm) veranschaulicht, wie sich Temperatur, Feuchtigkeit und Energiegehalt von Luftmischungen zueinander verhalten (siehe Bild 6.9).

Entfeuchten im Lüftungsgerät

Wenn die Aussenluft im Sommer nicht nur warm, sondern auch feucht ist, muss sie vor der Luftaufbereitung entfeuchtet werden. Sonst wird die Raumluft schwül und unangenehm. Im schlimmsten Fall kann sich an den Kühloberflächen (Kühldecken, Umluftkühler etc.) so viel Feuchtigkeit ansammeln, dass Kondenswasser entsteht – was zu teuren Bauschäden führen kann.

Eine bewährte Methode zur Reduzierung der Luftfeuchtigkeit ist, trockene, kühle Luft einzublasen und so die relative Luftfeuchtigkeit im Raum zu senken. Dazu wird die Zuluft im Kühlregister des Lüftungsgerätes unter ihre Taupunkttemperatur (bis zur minimalen Zulufttemperatur von 8 °C) abgekühlt, sodass überschüssige Feuchtigkeit kondensiert und als Kondens-

at abgeführt wird. Damit die in den Raum eingeblasene Luft nicht zu kalt ist, kann sie mit einem Heizregister erwärmt oder mit der Raumluft gemischt werden (Zulufttemperatur z. B. 18–21 °C).

Luftaufbereitung mit dem Mollier-Diagramm erklärt

Das Bild 6.9 zeigt das Schema eines Lüftungsgerätes und ein Mollier-Diagramm (h,x-Diagramm). Die warme Aussenluft 32 °C, 40 % r.F. ① wird über den Kreuzwärmeübertrager auf rund 28 °C abgekühlt ②. Danach wird die Luft im Kühlregister mit 8 °C kaltem Wasser auf 12 °C abgekühlt ③. Unter einer Lufttemperatur von 17 °C beträgt die relative Luftfeuchtigkeit 100 %. In der Abkühlphase von 17 °C bis 12 °C kondensiert das Wasser aus der Luft. Betrag der Feuchtegehalt ursprünglich 12 g Wasser pro kg Luft sinkt dieser auf 9 g Wasser pro kg bei 12 °C (Reduktion der Luftfeuchtigkeit). Da aus Komfortgründen keine 12 °C kalte Luft in den Raum eingeblasen werden kann, wird diese anschliessend mit einem Heizregister auf 20 °C und 60 % r.F. erwärmt ④.

Bild 6.10 bis Bild 6.12 zeigen Temperaturen und Luftfeuchtigkeit der Luft in Zuluftgeräten bei unterschiedlichen Kaltwassertemperaturen und den entsprechenden Entfeuchtungsmöglichkeiten. Je nach Kaltwassertemperatur wird die Luft im Lüftungsgerät nur unwesentlich (Bild 6.10), teilweise (Bild 6.11) oder kontrolliert entfeuchtet (Bild 6.12).

Bild 6.9:
Die Veränderung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit der Aussenluft auf ihrem Weg durch das Lüftungsgerät lässt sich im Mollier-Diagramm (h,x-Diagramm) nachverfolgen. Der tatsächliche Prozess ist zwar komplex, doch vereinfacht gilt: Sobald Luft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% weiter abgekühlt wird, setzt eine Entfeuchtung ein. In diesem Bereich kondensiert Wasserdampf aus der Luft, sodass sie Feuchtigkeit verliert.

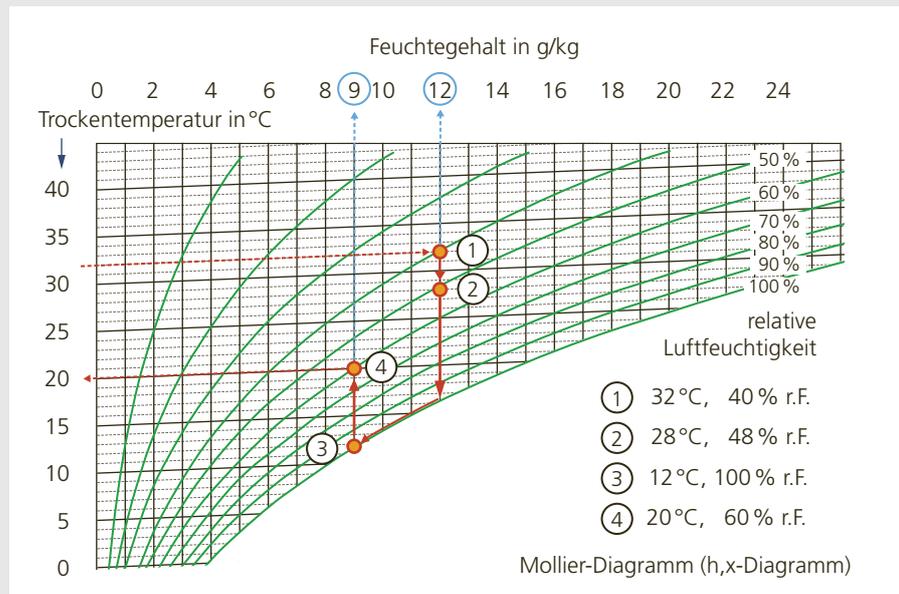
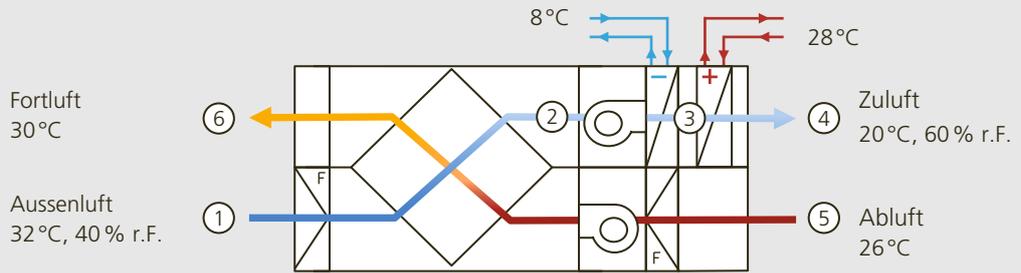


Bild 6.10:
Zuluftkühlung mit 14°C kaltem Kaltwasser. Die Luft wird abgekühlt, ohne dass eine nennenswerte Entfeuchtung der Zuluft erfolgt.

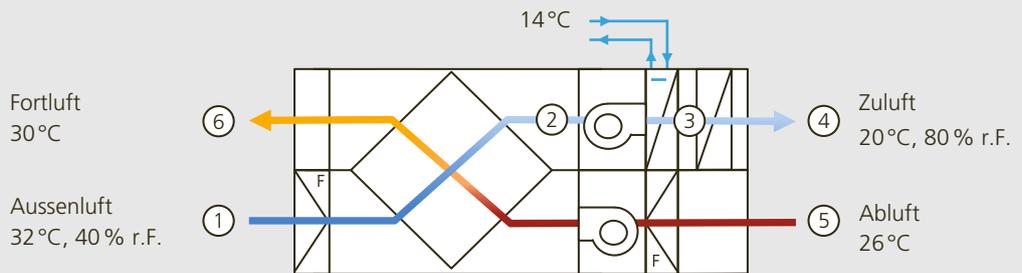
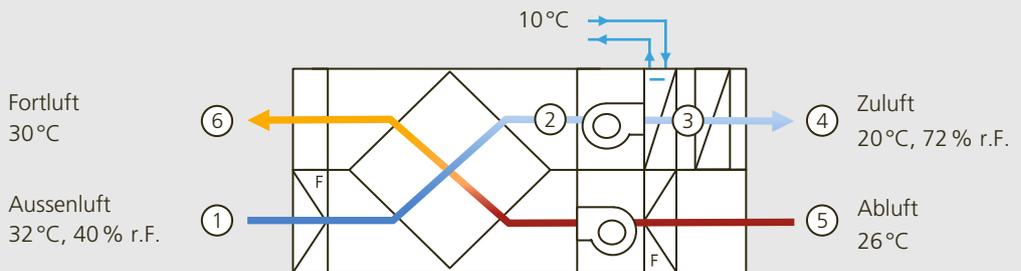


Bild 6.11:
Zuluftkühlung mit 10°C kaltem Kaltwasser. Die Luft wird teilweise entfeuchtet. Die Entfeuchtungsleistung kann jedoch nicht garantiert werden.



Da die kontrollierte Entfeuchtung (Bild 6.12) tiefe Kaltwassertemperaturen erfordert, ist es wichtig, dass die Kälte-Wärme-Maschine nur dann das 6 bis 10 °C kalte Wasser bereitstellt, wenn tatsächlich Entfeuchtungsbedarf besteht. In Jahreszeiten, in denen keine Entfeuchtung notwendig ist, muss die Kaltwassertemperatur unbedingt wieder angehoben werden. Umluftkühler sorgen für eine Kühlung ausschliesslich mit Raumluft. Sie führen die in einem Raum entstehende Wärmelast zuverlässig ab und arbeiten dabei unabhängig von den Bedingungen der Aus-

senluft, die zu warm oder zu feucht sein kann. Eingesetzt werden sie vor allem in Bereichen mit hohen inneren Wärmelasten, zum Beispiel in Serverräumen oder in Zonen, in denen Personen, Geräte, Beleuchtung oder Maschinen fast die gesamte Wärme erzeugen. In solchen Fällen reicht es nicht aus, lediglich Aussenluft zuzuführen – die Kühlung muss direkt im Raum erfolgen.

Mit Umluftkühlern kann die Raumluft ohne nennenswerte Entfeuchtung gekühlt (Bild 6.14), teilentfeuchtet (Bild 6.15) oder kontrolliert entfeuchtet werden.

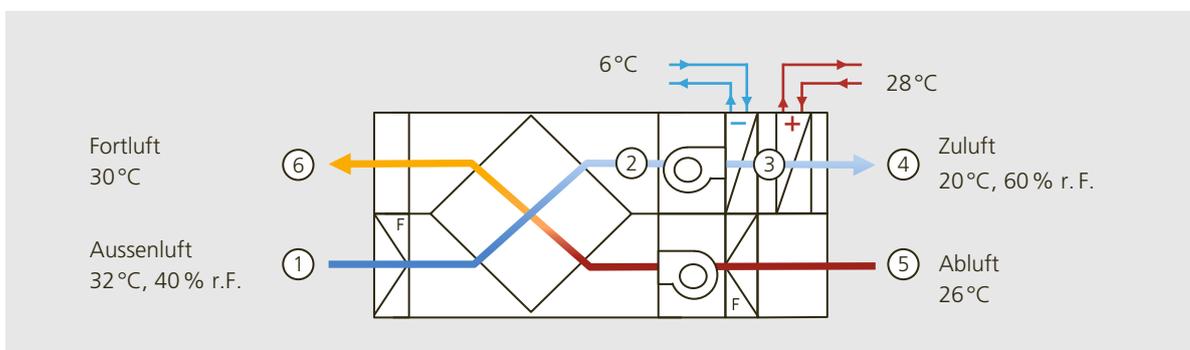


Bild 6.12: Zuluftkühlung mit 6 °C kaltem Kaltwasser. Die Luft wird so entfeuchtet, dass die Entfeuchtungsleistung garantiert werden kann. Aufgrund der tiefen Temperaturen muss die entfeuchtete Luft wieder erwärmt werden.

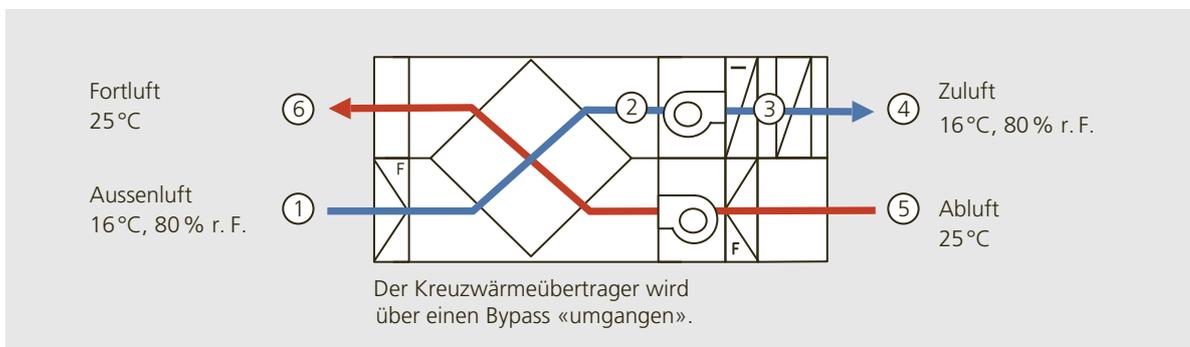


Bild 6.13: Nachtauskühlung – Es wird kühle Aussenluft über das Lüftungssystem in die Räume geblasen (direktes Free-Cooling).

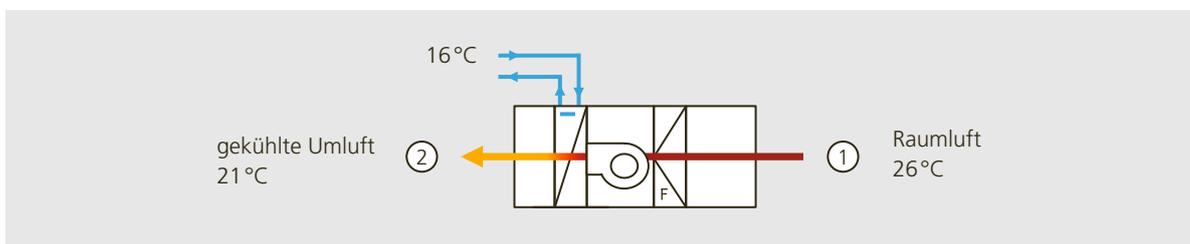


Bild 6.14: Umluftkühler A – Kühlung der Raumluft ohne nennenswerte Entfeuchtung.

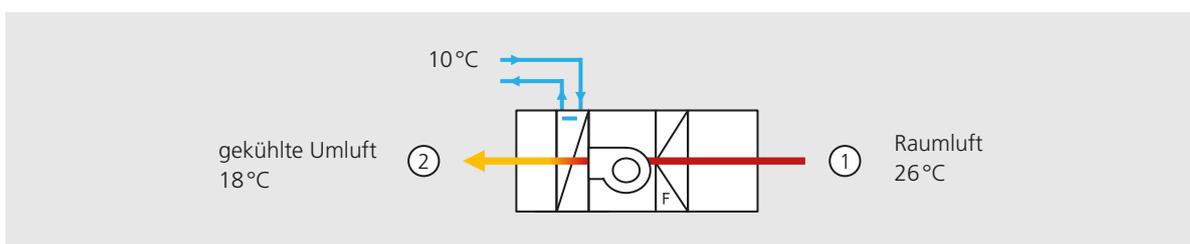


Bild 6.15: Umluftkühler B – Kühlung der Raumluft mit Teilentfeuchtung.

6.5 Hydraulische Einbindung

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

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

Wichtig 1: Die Leistungsregelung 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 2: 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.

Einbindung Kühltssysteme

Verbraucher benötigen immer eine Vorlauftemperatur-Regelung. 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-Regelung 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-Regelung verzichtet werden. Auf eine Vorlauftemperatur-Regelung 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 Leistungsregelung zu wenig genau geregelt werden.

Einbindung Trockenkühler

(Luftregister)

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

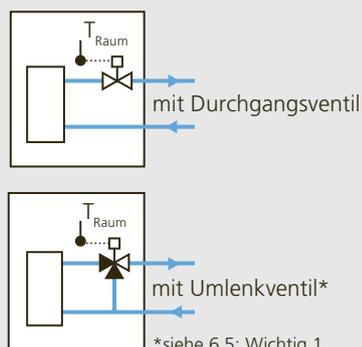


Bild 6.16:
Umluftkühlgerät mit Durchgangsventil und mit Umlenkventil. Das Ventil wird durch Raumfühler (T_{Raum}) angesteuert.

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
- zwischen 14°C und 20°C liegen die Temperaturdifferenzen im Bereich von 3 bis 6 K
- von weniger als 14°C arbeitet man mit Temperaturdifferenzen von 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 Eintrittsregelung gelöst werden (vgl. dazu Kapitel 8 «Hydraulische Systeme»).

6.6 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 kühlfsten (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 Som-

mer 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.

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.

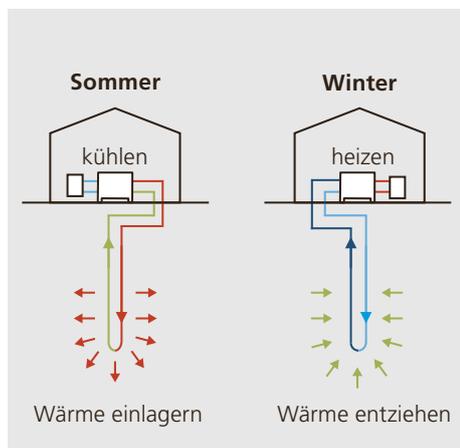


Bild 6.17:
Kühlung über die Erdsonde im Sommer (Wärmeeintrag) und Heizen im Winter (Wärmeentzug).

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 Leistungsergiebigkeit durch Pumpversuche
- Hydrologischer Nachweis von thermischem Grundwasser-Strömungsverhalten
- In der Regel sind Grundwasser- und Seewassersysteme meist ab einer Kühlleistung von 400 kW zugelassen (Bewilligungsaufgaben).

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 aktiven Free-Coolings mit Kaltwasser 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 $T_{\text{Aussen}} > 20^\circ\text{C}$) zusammen.

Fazit: Nur weil Free-Cooling ein positiv belegter Begriff ist, heisst das nicht, dass der Einbau eines aktiven Free-Coolings mit Kaltwasser 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

(Aktives Free-Cooling mit Aussenluft)

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 Wärme direkt abführen).

Kühlen indirekt mit Aussenluft

(Aktives Free-Cooling mit Kaltwasser)

Beim indirekten Kühlen mit Aussenluft erfolgt der Energietransport über das Kälte-trägersystem. 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 Regelung.

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 Wärmeaufnahme-systems geht man von den Nutztemperat-uren (z. B. Raumtemperaturen) aus.
2. Für eine kontrollierte Entfeuchtung der Luft ist eine Kaltwasser-Vorlauftempera-tur 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 ent-feuchtet 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 Tem-peraturdifferenzen von 3 K zwischen Vor- und Rücklauftemperatur.
6. Werden unterschiedliche Kaltwassertemperaturen benötigt, entscheidet die Tem-peraturdifferenz (ab 4 K) und der Anteil an der Gesamtleistung (erheblicher An-teil), ob für die «wärmeren» Gruppen ein eigenes, wärmeres Kaltwasser-Netz ge-baut werden muss.
7. Flächenkühlsysteme werden als angenehme Kühlung empfunden, da die Raum-luft 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 Bewilli-gung.
10. Ein aktives Free-Cooling mit Kaltwasser lohnt sich in der Regel erst bei Komfort-klima-Kältesystemen mit einer Kaltwassertemperatur von mehr als 14 °C.

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-

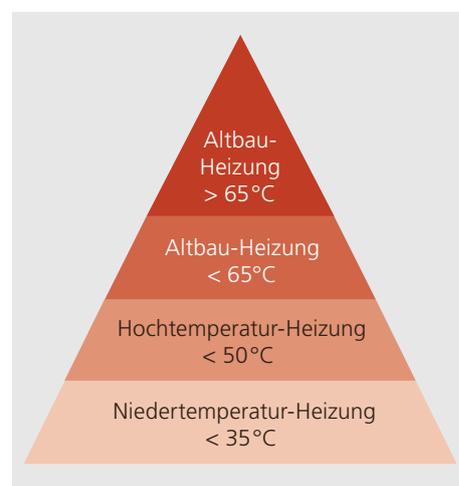


Bild 7.1: Pyramide der unterschiedlichen Temperaturanforderungen verschiedener Wärmesysteme. Je höher in der Pyramide, desto anspruchsvoller die Wärmeerzeugung mit der Kälte-Wärme-Maschine.

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.

Das Bild 7.2 liefert einen Überblick, wie die Wärme genutzt werden kann. Die SIA 384/4 (2025) stellt mit einem Flussdiagramm (siehe Bild 7.3) die konzeptionellen Überlegungen zur Nutzung der Wärme der Kältemaschinen strukturiert dar.

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

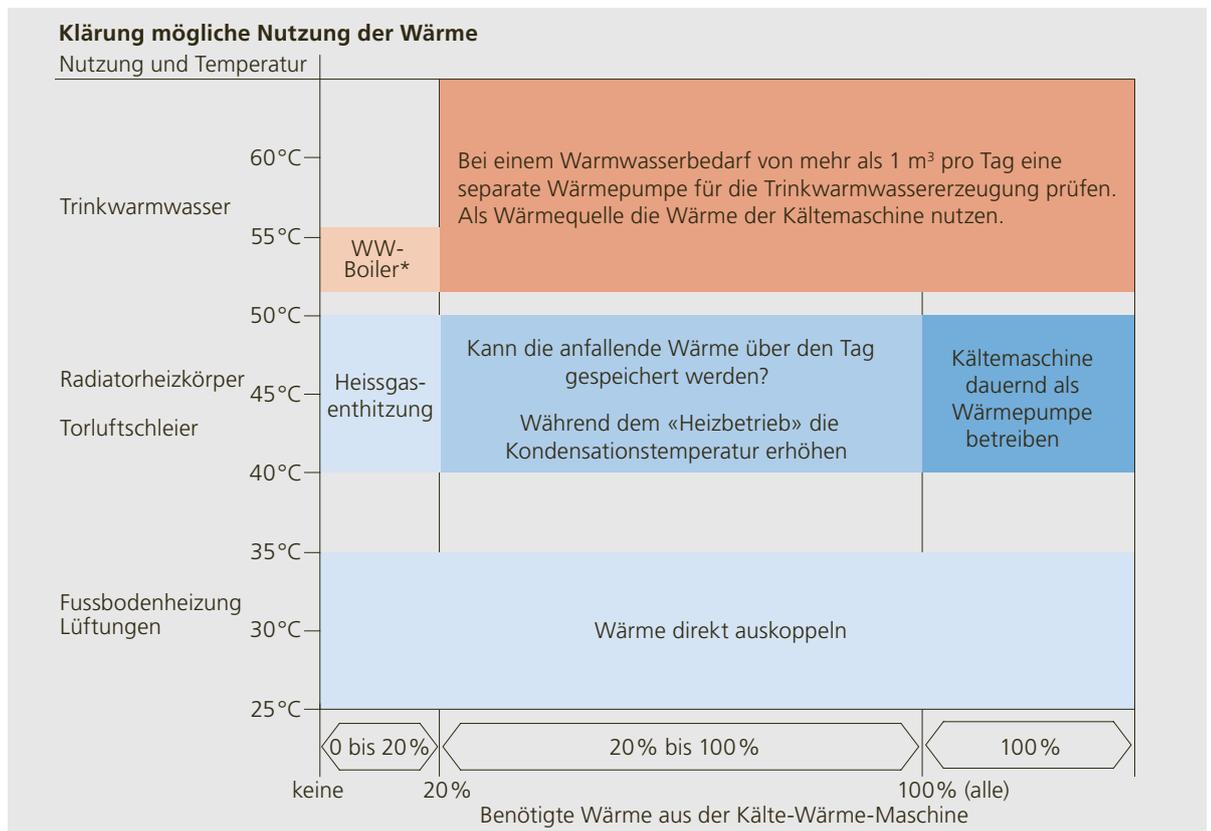
werden, braucht dies Energie. Pro Grad Temperaturhebung steigt der Stromverbrauch um rund 2,5 % an und reduziert gleichzeitig die Kälteleistung um ca. 2 %.

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.

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 oder mehrere WP-Boiler prüfen.*



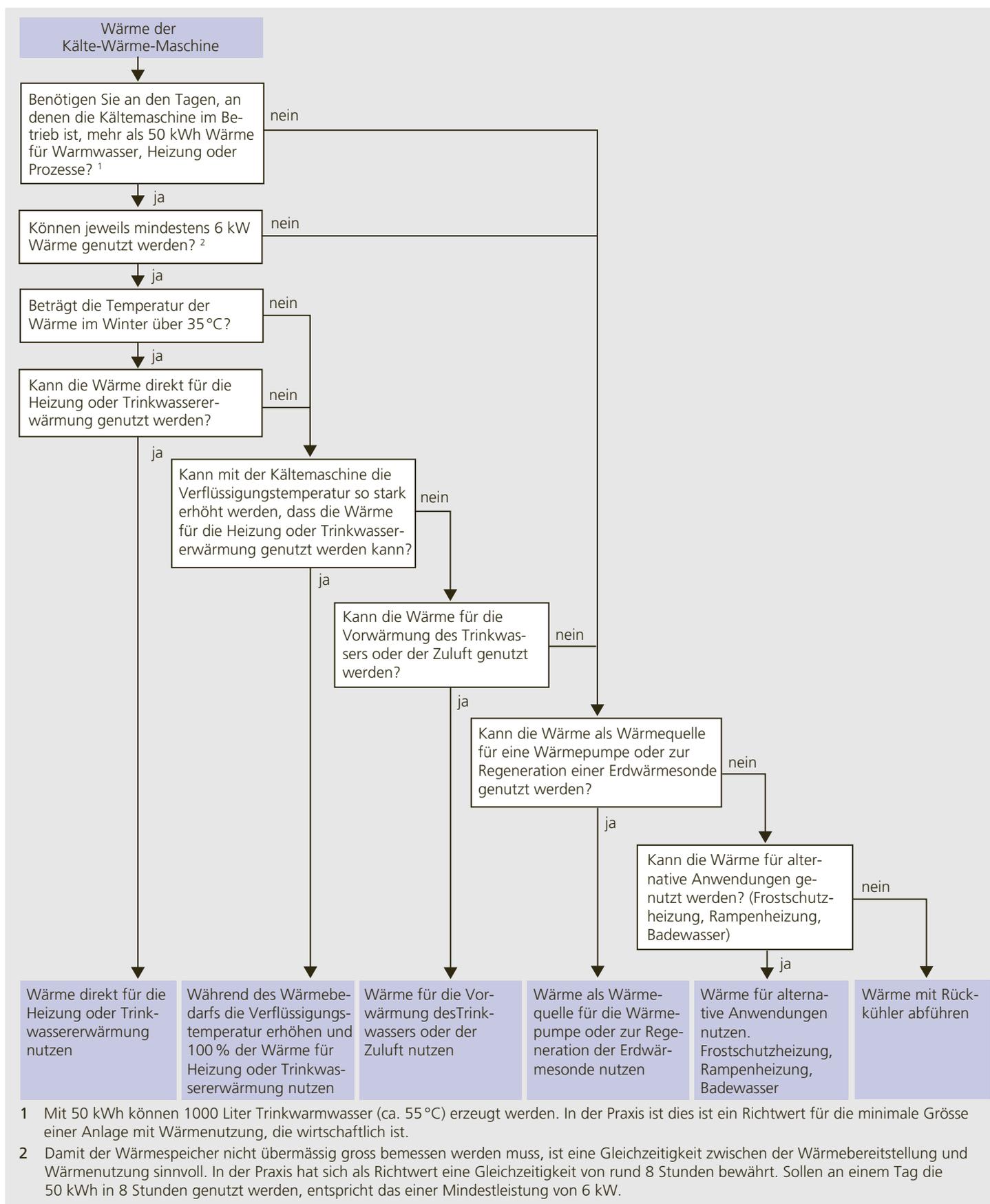


Bild 7.3: Flussdiagramm zur Wärmenutzung. Quelle: SIA 384/4 (2025)

«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).

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.

$$\text{Variante A: COP}_{\text{Kälte}} = \frac{(20 \text{ kW}_{\text{Kälte}})}{(5 \text{ kW}_{\text{Elektro}})} = 4,0$$

$$\text{Variante B: COP}_{\text{Kälte}} = \frac{(20 \text{ kW}_{\text{Kälte}})}{(6 \text{ kW}_{\text{Elektro}})} = 3,3$$

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:

$$\text{Variante B: COP}_{\text{Kälte}} = \frac{(20 \text{ kW}_{\text{Kälte}})}{(5 \text{ kW}_{\text{Elektro}})} = 4,0$$

$$\text{Variante B: COP}_{\text{Wärme}} = \frac{(26 \text{ kW}_{\text{Wärme}})}{(1 \text{ kW}_{\text{Elektro}})} = 26$$

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.

$$\text{COP}_{\text{Kälte+Wärme}} = \frac{(46 \text{ kW}_{\text{Kälte+Wärme}})}{(6 \text{ kW}_{\text{Elektro}})} = 7,7$$

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		
Kältemaschine	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 m³ pro Tag steigt, sollte zumindest eine Heissgas-Enthitzung für die Vorwärmung des Trinkwarmwassers in Betracht gezogen werden (siehe Bild 7.10 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.

Bei der Aufstellung des WP-Boilers mit Kältemitteln der Klasse A3 müssen die Sicherheitsanforderungen eingehalten werden (ATEX-Ausführung). Dies betrifft besonders die Aufstellung in einer Kältezentrale, in der eine Kältemaschine mit A3-Kältemitteln steht.

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 Regelung 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 Rückkühltemperatur in die Kältemaschine (Eintrittstemperatur Verflüssiger) stets möglichst tief sein. Die Regelung muss sicherstellen, dass die Temperaturen der Aussentemperatur folgen.



Bild 7.4:
Die Trinkwarmwasser-
Wärmepumpe ent-
zieht dem Raum
Wärme und erhitzt
damit das Trinkwarm-
wasser.
Quelle: CTA

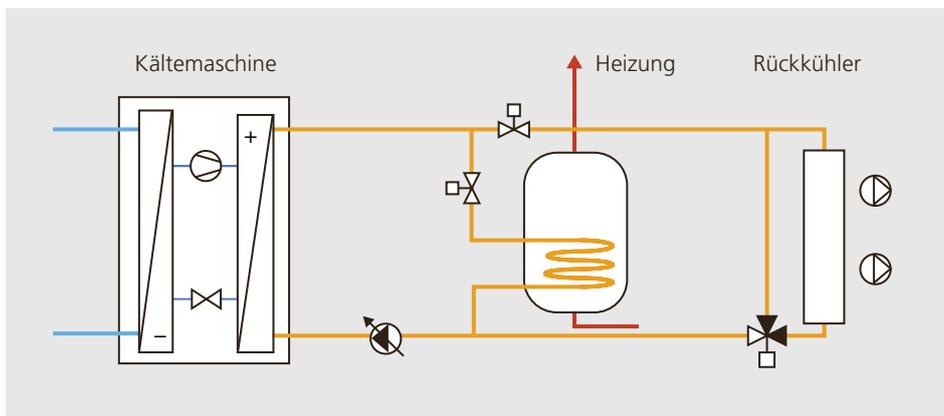


Bild 7.5: Indirekte Einbindung der Heizung über einen Wärmespeicher und mit einem Wasser-Glykol-Kreislauf. Achtung: Der innenliegende Rohrbündel-Wärmeumformer kann nur bis Leistungen von ca. 20 kW eingesetzt werden. Zudem sind seine Wärmeübertragungswerte eher schlecht (ΔT 5 bis 10 K).

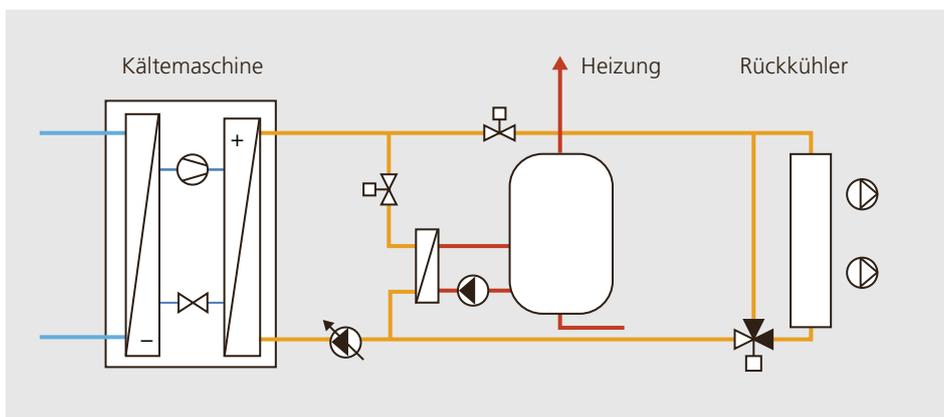


Bild 7.6: Indirekte Einbindung der Heizung über einen Wärmespeicher und mit einem Wasser-Glykol-Kreislauf. Der aussenliegende Platten-Wärmeumformer benötigt eine zusätzliche Pumpe. Dafür kann er für beliebige Leistungen eingesetzt werden und hat gute Wärmeübertragungswerte (ΔT 2 K).

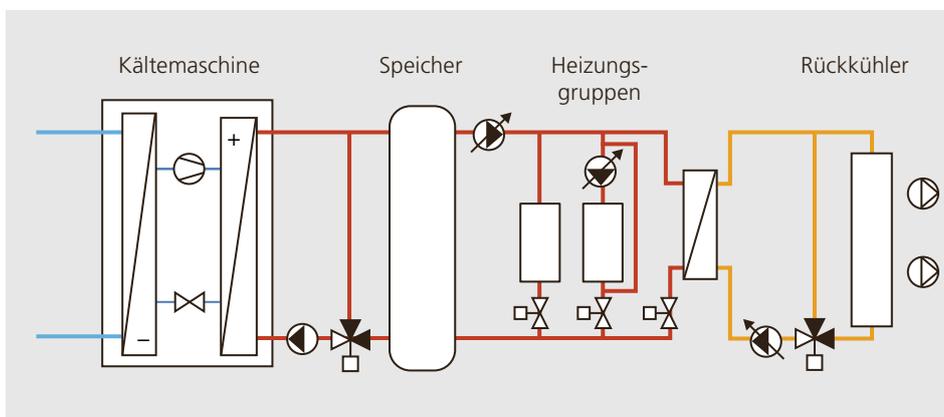


Bild 7.7: Direkte Einbindung der Heizung über einen Wärmespeicher. Der Rückkühler ist mit einem Wärmeübertrager wie eine Heizungsgruppe eingebunden. Der Rückkühl-Kreislauf ist mit Wasser-Glykol gefüllt, damit das Wasser im Winter nicht einfriert.

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.

Dachaufgestellte Systeme sind eine gute Lösung, wenn bei natürlichen, brennbaren Kältemitteln wie Propan oder Isobutan, die Sicherheitsvorgaben im Gebäude nicht erfüllt werden können. Wichtig ist, dass die Anlage die vorgegebenen Schallwerte einhält und die Zugänglichkeit für Wartung und Reparaturen gewährleistet ist.

Vorteile

- Gute Lösung für Anlagen mit hochbrennbaren Kältemitteln (z. B. R290)
- Kompakt auf dem Dach (Direktverflüssigung mit Regelung)
- Kälteerzeugung und Direktverflüssigung haben sehr tiefe Investitionskosten.
- Tiefe Betriebs- und Wartungskosten
- Flächeneinsparung im Gebäude
- Zeitgemässe Modelle haben bereits eine Free-Cooling-Schaltung eingebaut.

Nachteile

- Oft aufwendigere Leitungsführung für eine Wärmenutzung
- 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 7.8:
Kompakter Kälteerzeuger direkt auf dem Dach aufgestellt.
Bild: CTA

7.2 Wärme direkt nutzen

Wenn die Planerin 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 Wärmehalt im gasförmigen Kältemittel genutzt. Die nutzbare Heissgas-Temperatur ist vom Kältemittel, der Verdampfungs- und der Verflüssigungstemperatur 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

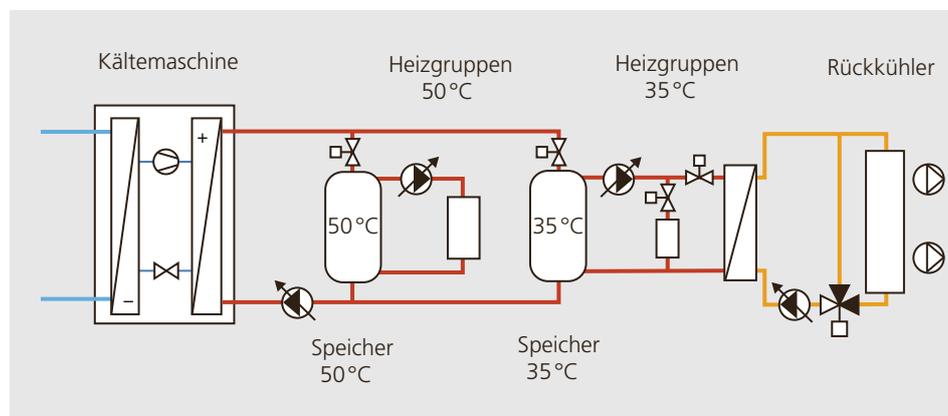


Bild 7.9: Die Kältemaschine lädt einen Wärmespeicher mit 50°C und einen anderen mit 35°C. Meldet ein Wärmespeicher einen Bedarf, wird die Verflüssigungstemperatur auf der Kältemaschine auf das entsprechende Temperatur-Niveau angehoben. Damit wird immer eine maximale Effizienz erreicht. Die verschiedenen Verbraucher oder Verbrauchergruppen beziehen die Wärme je nach Temperaturanforderung vom jeweiligen Speicher.

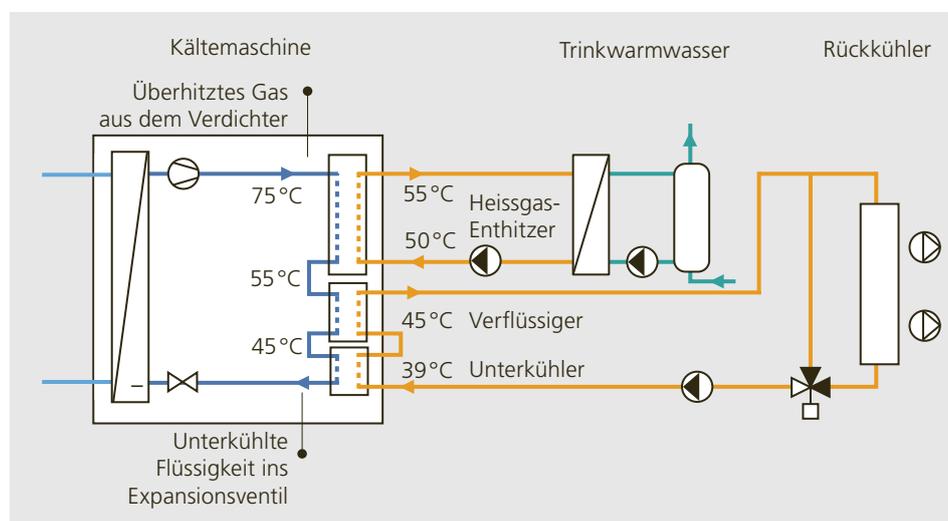


Bild 7.10: Von der Verflüssigerleistung können 10% bis 20% über das Heissgas entzogen werden. Dieses hat eine höhere Nutztemperatur und ist dadurch eine interessante Wärmequelle für die Trinkwasser-Erwärmung.

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.

Wärmenutzung bei einer CO₂-Kälteanlage

CO₂-Kälteanlagen arbeiten mit deutlich höheren Drücken als Anlagen mit herkömmlichen Kältemitteln. Zudem befindet sich das CO₂ im Hochdruckbereich im überkritischen Zustand. Dabei ist das Kältemittel weder ein typisches Gas noch eine typische Flüssigkeit, sondern weist Eigenschaften beider Phasen auf. Eine definierte Verflüssigung findet daher nicht mehr

statt – stattdessen wird das überkritische CO₂ lediglich abgekühlt. Aus diesem Grund bezeichnet man den Wärmeübertrager in CO₂-Anlagen als Gaskühler und nicht als Verflüssiger. Da im Gaskühler kein Kondensat anfällt, ist seine Bauweise speziell auf die Eigenschaften des Kältemittels CO₂ abgestimmt.

Nach dem Verdichter wird das verdichtete CO₂ typischerweise über einen Enthitzer, einen Mitteltemperatur-Wärmeübertrager und schliesslich zum Gaskühler geführt (Bild 7.11).

Der grösste Teil der nutzbaren Wärme wird im Mitteltemperatur-Wärmeübertrager bei rund 40 °C ausgekoppelt. Über den Enthitzer kann zusätzlich Warmwasser mit Temperaturen ab 60 °C erzeugt werden. Der Gaskühler sorgt dafür, dass überschüssige Wärme in Zeiten ohne Wärmebedarf zuverlässig an die Umgebung abgeführt wird – und dass die Rücklauftemperatur möglichst niedrig bleibt.

Die Rücklauftemperatur ist ein entscheidender Faktor für die Effizienz und Leistungsfähigkeit einer CO₂-Kälteanlage. Sie sollte idealerweise unter 35 °C liegen. Eine niedrige Rücklauftemperatur verbessert die Gesamtenergieeffizienz.

Nach dem Gaskühler wird der Hochdruck des CO₂ durch ein Hochdruckregelventil auf Mitteldruck reduziert. Dabei kühlt das

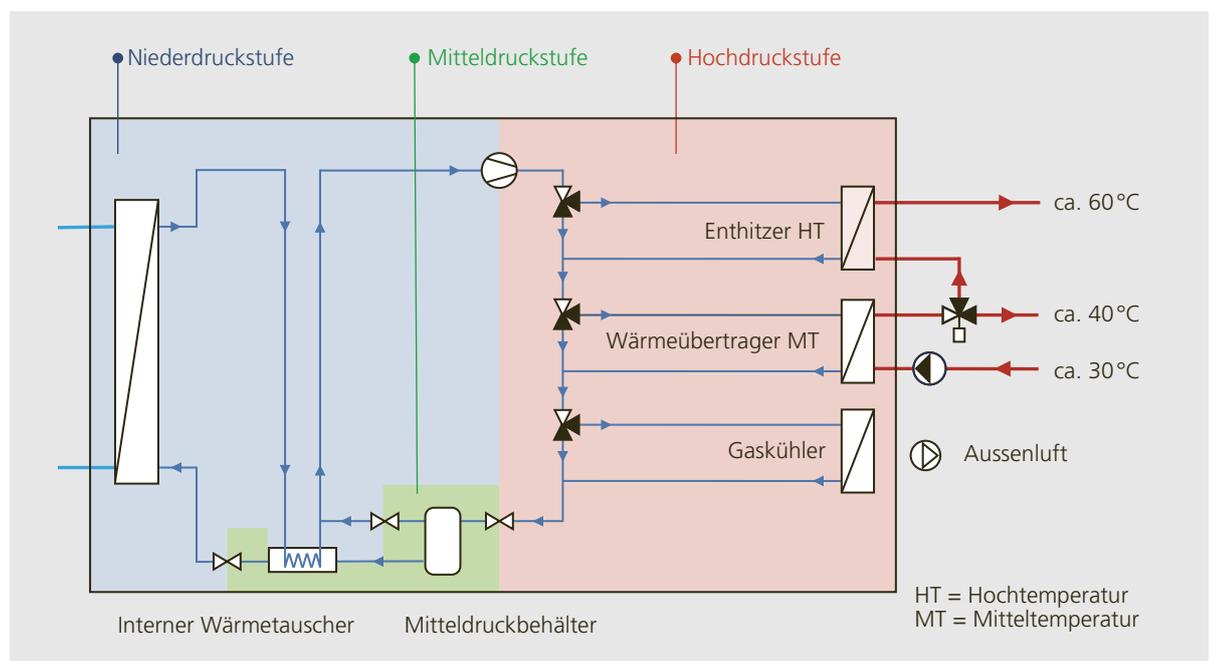


Bild 7.11:
Nutzung der Wärme
bei einer einstufigen
CO₂-Kälteanlage.

CO₂ ab und verflüssigt sich teilweise. Diese Mitteldruckstufe bringt das Kältemittel auf ein geeignetes Druckniveau, bevor es dem Verdampfer zugeführt wird.

Das CO₂ gelangt anschliessend in den Mitteldruckbehälter (auch Flüssigkeitssammler genannt), in dem sich flüssiges und gasförmiges CO₂ sammeln. Durch die Beruhigung der Strömung trennen sich die beiden Phasen. Aus dem unteren Teil des Behälters wird das flüssige CO₂ zum Verdampfer geleitet, wo es Wärme aufnimmt und vollständig verdampft. Das im oberen

Teil befindliche Flashgas vermischt sich nach dem Verdampfer mit dem verdampften CO₂ und strömt anschliessend zum Verdichter zurück.

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

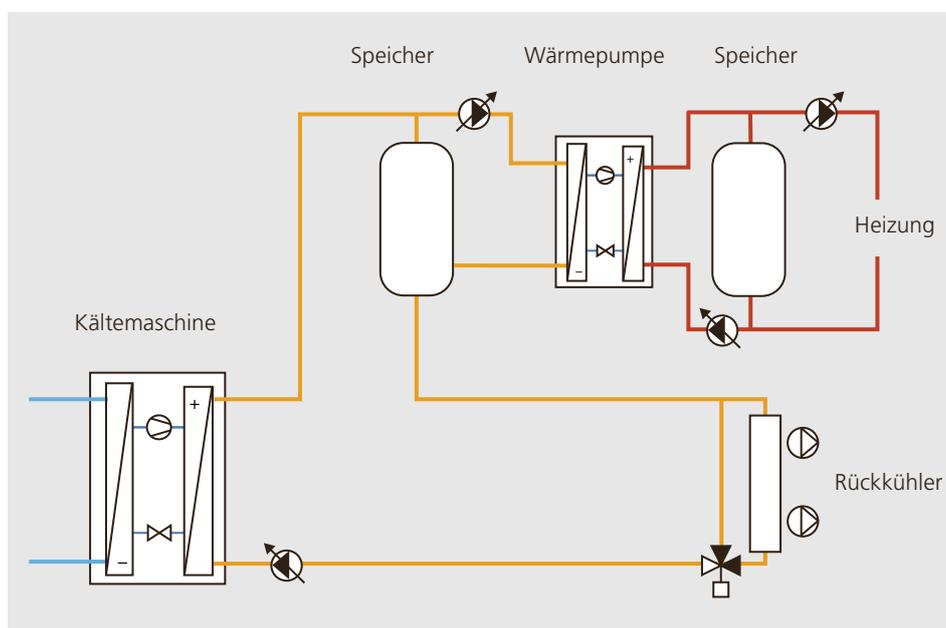


Bild 7.12: Wird nur ein kleiner Teil der Wärme der Kältemaschine für die Heizung benötigt, lohnt es sich oft nicht, die Kältemaschine auf eine höhere Verflüssigungstemperatur hochzufahren, da so kurzzeitig viel zu viel Wärme ansteht. In diesem Fall kann über eine kleine Wärmepumpe die Wärme sehr effizient bereitgestellt werden.

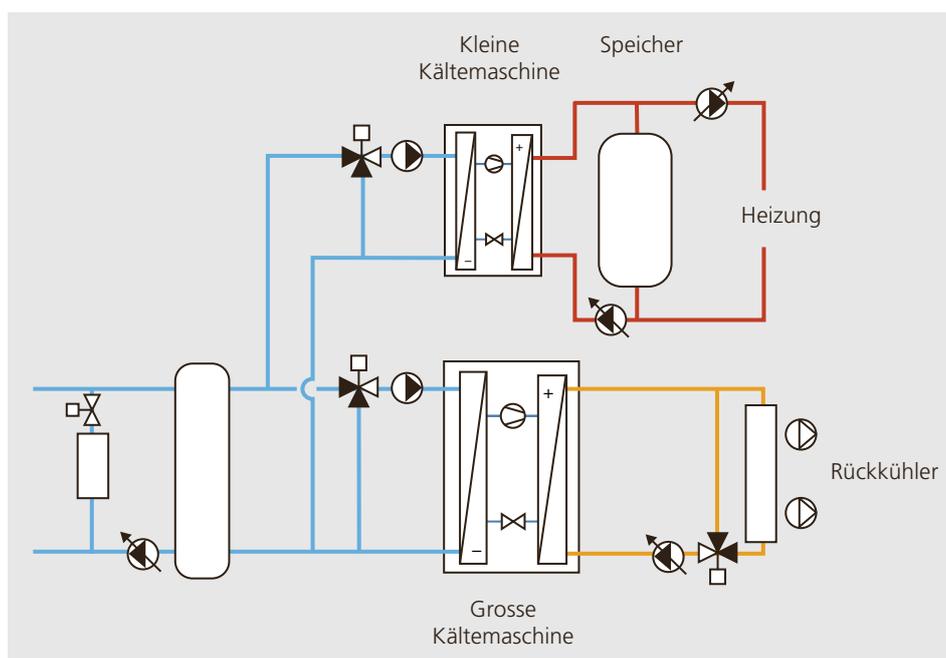


Bild 7.13: Eine kleine Kältemaschine übernimmt die Wärmeproduktion. Zusätzlich entlastet sie die grosse Kältemaschine bei kleinem Kältebedarf.

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 7.4 Trinkwarmwasser-Wärmepumpe). Eine zeitliche Verschiebung kann mit einem Wärmespeicher überbrückt werden (siehe Kapitel Speicher).

Hinweis: In Bild 7.12 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 7.13). 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.

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 Mengenregelungen (z. B. TABS, selbstregelnde Bodenheizungen) in den Tagesstunden etwas höher betrieben. In den Nachtstunden kühlt sich das Gebäude wieder natürlich ab.

Für dieses Vorgehen braucht es thermoaktive Bauteile (TABS oder selbstregelnde 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 Übergangzeiten – 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.

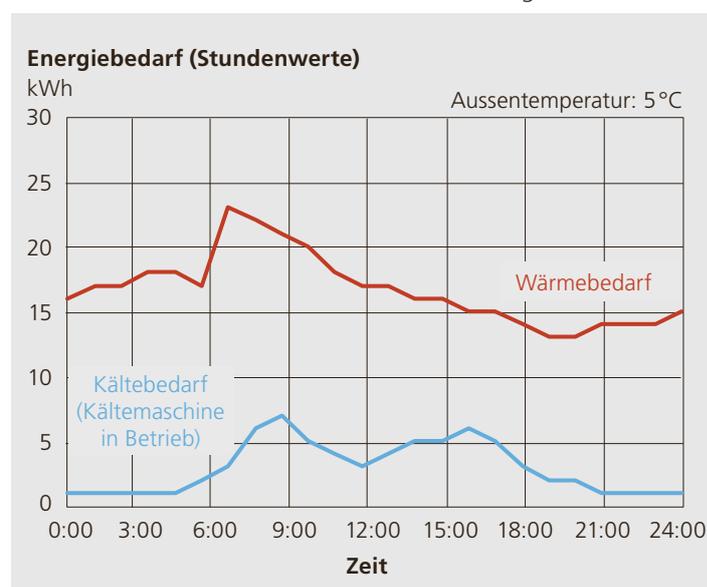
Diese einfache statische Betrachtung sollte für die beiden Betriebszustände (Wärme- und Kältebedarf) bei drei verschiedenen Aussentemperaturen (12 °C, 22 °C und 32 °C) gemacht werden.

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 Leistungsregelung von 20 % bis 100 % ausgerüstet sein sollte.

Bild 7.14:
Stundenwerte des Wärme- und Kältebetriebes eines Gebäudes und einer Kältemaschine über den Tag.



7.4 Wärme saisonal speichern

Das Erdreich ist für grosse Wärmeenergie-mengen 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 neben 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 nachgewie-

sen werden, dass bei Wärmeentzug und Wärmeeintrag die Erdtemperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ 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 abgegeben). 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 7.15:
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.

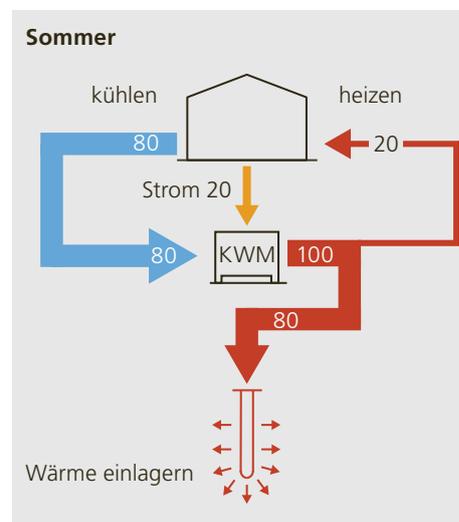
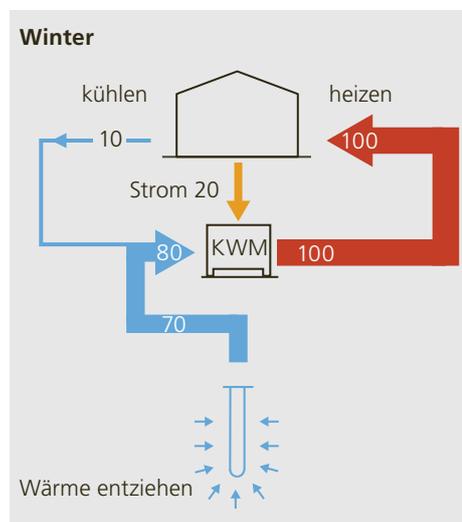


Bild 7.16:
Sommer-Betrieb. 80 Einheiten Energie werden aus dem Gebäude entzogen (Gebäudekühlung). Aus der Kälte-Wärme-Maschine werden daraus 80 Einheiten Wärme ins Erdreich eingelagert und 20 Einheiten für Heizung und Warmwasser benötigt.

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 drei Arten von Free-Cooling unterschieden:

- **Passives Free-Cooling:** Kühlung mit Aussenluft, die über geöffnete Fenster in den Raum gelangt.
- **Aktives Free-Cooling mit Aussenluft:** Kühlung mit Aussenluft, die über die Lüftungsanlage zugeführt wird (Ventilatoren in Betrieb).
- **Aktives Free-Cooling mit Kaltwasser:** Kühlung über einen Kälteträger, der im Rückkühler durch Aussenluft abgekühlt wird – ohne Einsatz der Kältemaschine (nur Pumpen in Betrieb). Alternativ kann das Kaltwasser direkt aus einer Erdwärmesonde (Geo-Cooling) bzw. aus Grund-, See- oder Flusswasser (Aqua-Cooling) gewonnen werden.

Das Gebäude sollte im Sommer in der Nacht immer natürlich – sprich mit passivem Free-Cooling – gekühlt werden. Die Nachtauskühlung kann in der kurzen nutzbaren Zeit aber nicht den ganzen Wärmeintrag 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.

Jede Lüftungsanlage ermöglicht in der kalten Jahreszeit bei Aussentemperaturen unter 18°C ein aktives Free-Cooling mit Aussenluft, da immer «kühle Zuluft» in die Räume eingeblasen werden kann.

Aktives Free-Cooling mit Kaltwasser eignet sich bei Systemen mit Kühlwasser-Vorlauftemperaturen von über 18°C. Denn Free-Cooling hat auch (ökonomische) Grenzen. Gemäss einer Studie der ZHAW Zücher Hochschule für Angewandte Wissenschaften¹ 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).

In der Praxis wird heute häufig auf eine Aussentemperatur ausgelegt, die um 2 bis 5°C über den in der SIA 2028 publizierten Werten liegt. Dadurch wird einerseits den veränderten klimatischen Bedingungen Rechnung getragen. Andererseits herrschen erfahrungsgemäss auf dem Dach leicht höhere Temperaturen als an den Messstationen. 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 Leistungseinbus-

sen, 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.



Bild 7.17:
Trockenrückkühler auf dem Dach.
Quelle: CTA



Bild 7.18:
Hybrider Trockenkühler.
Quelle: Jaeggi Hybrid-technologie AG



Bild 7.19:
Hybridrückkühler.
Quelle: Jaeggi Hybrid-technologie AG

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.

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 ermög-

licht 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 (siehe auch SWKI RE200-02).

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 Dampfvolken 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.

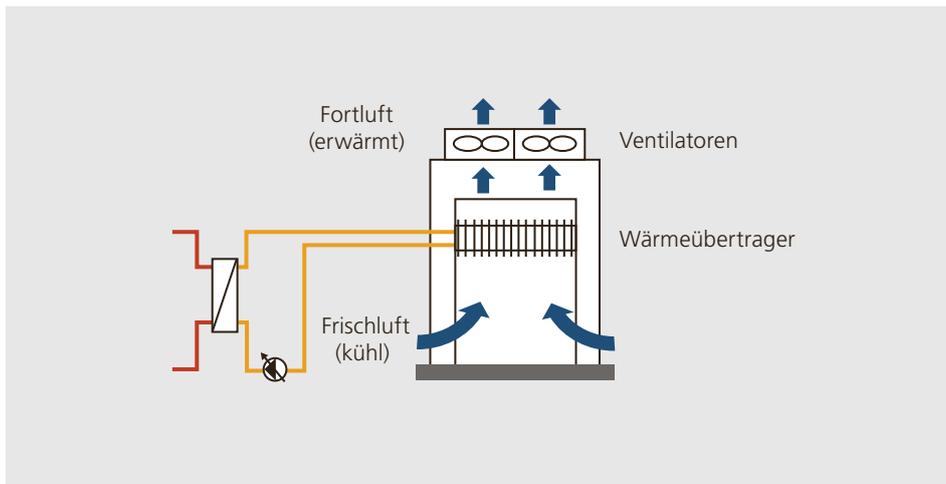


Bild 7.20:
Trockenrückkühler.

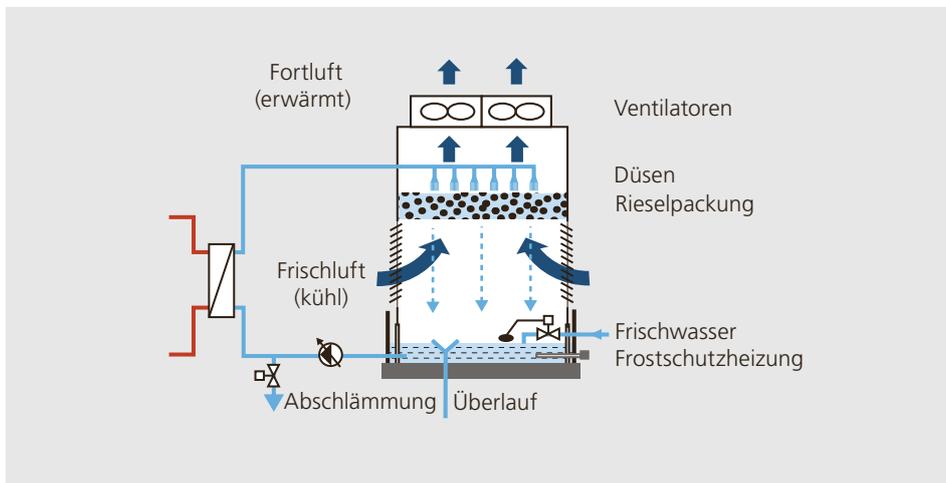


Bild 7.21:
Offener
Verdunstungs-
rückkühler mit Riesel-
packung.

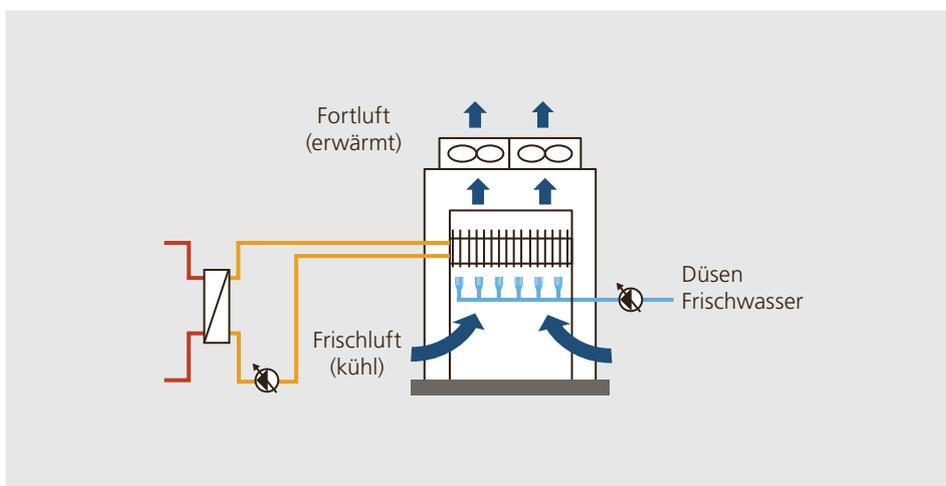


Bild 7.22:
Geschlossener
Verdunstungs-
rückkühler mit
Besprühung von
unten.

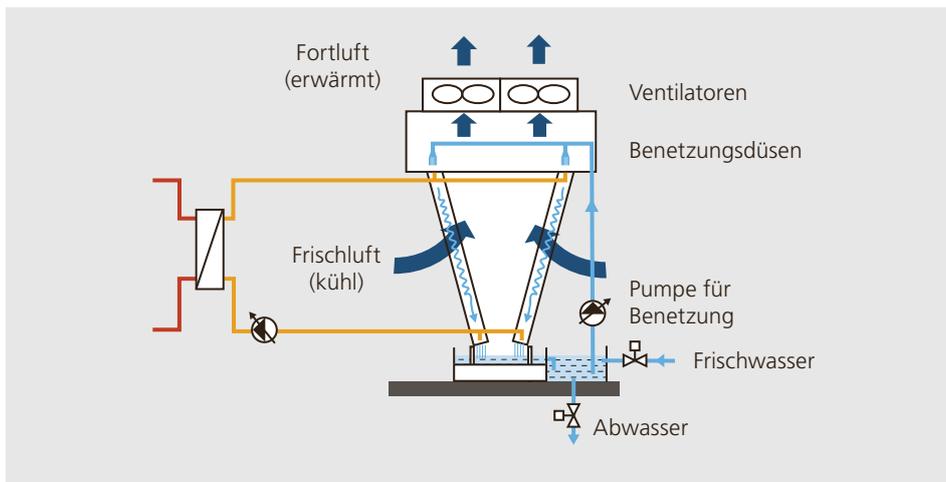


Bild 7.23:
Hybrider Trockenrück-
kühler mit
benetzten Wärme-
übertragern
(benetzt).

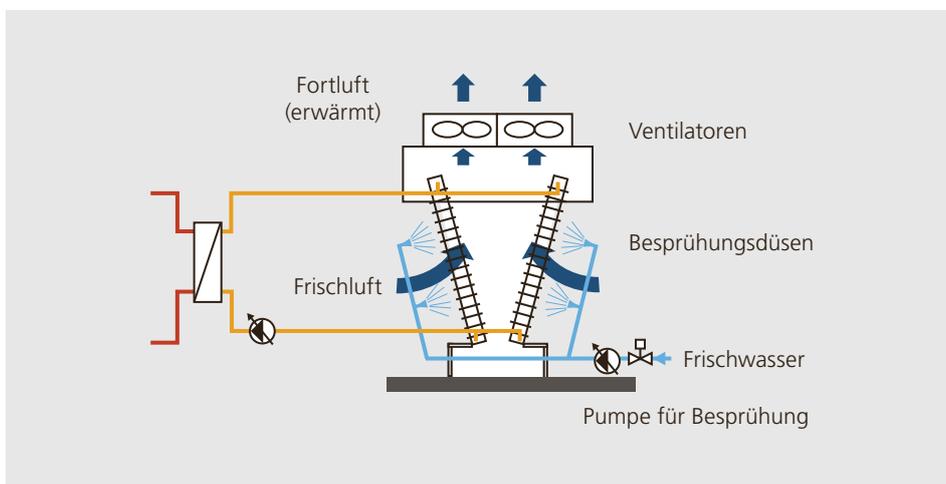


Bild 7.24:
Hybrider Trockenrück-
kühler mit besprühten
Wärmeübertragern
(besprüht).

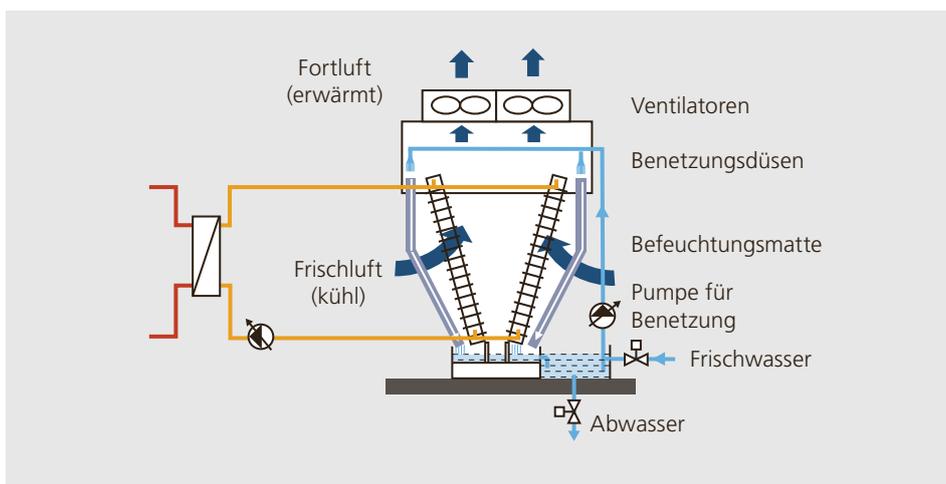


Bild 7.25:
Hybrider Trockenrück-
kühler mit
Befeuchtungsmatten
(adiabat).

Die Bilder 7.20 bis 7.25 wurden in Anlehnung an Bilder der SWKI-Richtlinie Rückkühler und Bilder von Jaeggi Hybridtechnologie AG abgeleitet.

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 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 abgeschlammmt 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.

Legionellen-Ausbruch in Warstein

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

Besonders beim Umlaufwasser müssen organisatorische und technische Massnahmen beachtet werden:

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

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 und der Bauform) 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 Verdunstungs-

tungskühler 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 gemäss SWKI RE200-02 (Sicherstellung des hygienegerechten Betriebs von Verdunstungskühlanlagen) geplant und ausgeführt werden.

Hygiene versus Energie

Nasse Rückkühler stehen im Spannungsfeld zwischen hygienischen Anforderungen und energetischer Effizienz. Aus hygienischer Sicht – insbesondere zur Vermeidung von Legionellenbildung – ist eine regelmässige Wassererneuerung oder -aufbereitung erforderlich, gegebenenfalls unter Einsatz chemischer Zusätze. Zudem verursachen nasse Systeme erhöhte Betriebs- und Wartungskosten, um einen dauerhaft hygienisch einwandfreien Betrieb zu gewährleisten.

Auf der anderen Seite bieten nasse Rückkühlssysteme eine deutlich höhere Energieeffizienz als trockene Systeme und werden daher von vielen Energiebehörden ausdrücklich bevorzugt oder gefordert.

Die Wahl des geeigneten Rückkühlsystems muss diesen Zielkonflikt sorgfältig abwägen.

Übersicht Rückkühler			
Art	Trockenrückkühler	Hybride Trockenrückkühler	Verdunstungsrückkühler
Kühlleistung	10 (bis 30) kW/m ²	(10 bis) 30 kW/m ²	ca. 300 kW/m ²
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	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Betriebskosten • Geringe Wartungs- und Unterhaltskosten • Keine Wasserdampfschwaden • Geringes spezifisches Gewicht (kg/m²) 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsspitzen und Temperaturen werden reduziert • Keine Wasserdampfschwaden • Höhere Kühlleistung als Trockenrückkühler • Adiabatisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleiner Flächenbedarf
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Grosser Flächenbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbedarf • Wasseraufbereitung je nach Typ erforderlich • Mittlere Betriebskosten • Mittlere Wartung und Unterhaltskosten • Benötigen einen Wasseranschluss • Reinigung der Matten • Höheres spezifisches Gewicht (kg/m²) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasseraufbereitung erforderlich • Sehr hohe Betriebskosten • Grosse Wartungs- und Unterhaltskosten • Kritisch betreffend Hygiene • «Wintersicherung» • Hohe Umgebungsfeuchte und Korrosion • Höheres spezifisches Gewicht (kg/m²)

Bild 7.26:
Die verschiedenen Rückkühler mit den wichtigsten Kenngrössen und die Vor- und Nachteile der Systeme.

Maximale Temperaturdifferenzen bei Rückkühlern

Bei der Regelung der Rückkühlung ist zu beachten, dass der Rückkühler seine Leistung auf Basis der Austrittstemperatur regeln muss. Um einen effizienten Betrieb der Kälteerzeugung sicherzustellen, ist es erforderlich, die Rückkühler-Austrittstemperatur gleitend in Abhängigkeit von der Aussentemperatur zu führen. Neben einer geeigneten Auslegung des Rückkühlers sind dabei die maximal zulässigen Temperaturdifferenzen gemäss Bild 7.27 einzuhalten.

Rückkühlsystem	Ermittlung von dT zwischen Kühlwasseraustrittstemperatur und ...	Temperaturdifferenz dT
Trockene Rückkühlsysteme		
Lamellen	... Trockenkugeltemperatur ¹	max. 6 K ⁴
Adiabatisch ⁵	... Trockenkugeltemperatur ^{1,3}	max. 6 K ⁴
Verdunstungsrückkühlsysteme		
Nass offen (Kühlturm)	... Feuchtkugeltemperatur ^{1,2}	max. 4 K ⁴
Nass geschlossen (Kühlturm)	... Feuchtkugeltemperatur ^{1,2}	max. 6 K ⁴
Hybrid	... Feuchtkugeltemperatur ^{1,2}	max. 6 K ⁴
<ol style="list-style-type: none"> 1 Temperatur am Auslegungspunkt im Hochsommer gemäss SIA 2028 2 Die massgebende Feuchtkugeltemperatur kann hier entnommen werden: SIA 2028 (2010), Tabelle 8a, Auslegungsdaten für Kühler in der Aussenluft, Spalte: Kühlerauslegung. 3 Am Auslegungspunkt wird die Trockenkugeltemperatur der Luft durch das adiabate System um ca. 5 K gesenkt. Bei einer Trockenkugeltemperatur von beispielsweise 34 °C wird der Rückkühler auf eine Lufteintrittstemperatur von 29 °C ausgelegt. Die Kühlwasseraustrittstemperatur beträgt in diesem Fall maximal 35 °C (29 °C + 6 K). 4 Bei beengten Platzverhältnissen kann in begründeten Fällen die maximale Temperaturdifferenz dT um maximal 2 K auf 8 K erhöht werden. 5 Adiabate Rückkühlsysteme sind von der Funktion her Trockenrückkühlsysteme, bei denen die Luft vorher mit Wasser abgekühlt wird. 		

Bild 7.27:
Maximale Temperaturdifferenz zwischen dem Kühlwasseraustritt und dem Aussenlufteintritt verschiedener Rückkühlsysteme.

Quelle: SIA 384/4
(2025)

Exkurs**Die Lüftungsanlage nutzen, um die Wärme abzuführen**

(für Gebäude mit Lüftungsanlagen, die mehr als 10 000 m³/h fördern) über Bodenheizungen

Bei Gebäuden mit grossen Lüftungsanlagen kann die Wärme der Kältemaschine auch an die Abluft abgegeben werden. Diese führt die Wärme mit dem Lüftungsbetrieb ab.

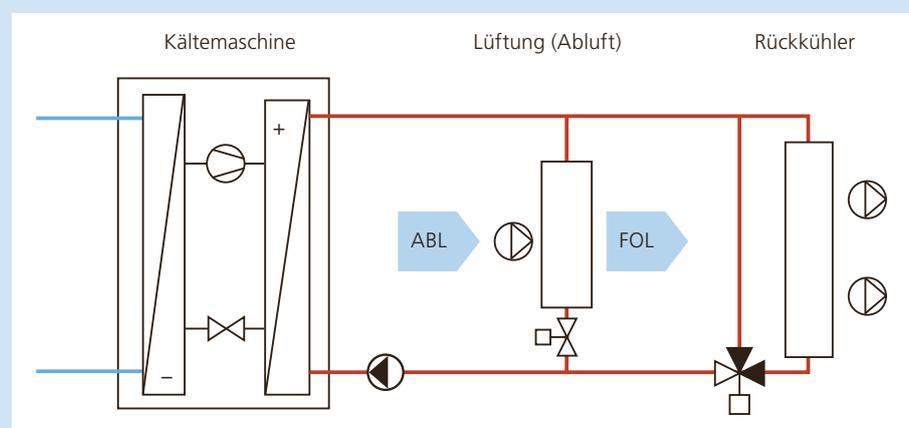
Die Abgabe der Wärme an die Abluft erfolgt über ein Wärmeträger-Netz. Die Wärme wird über einen Wärmeübertrager an die Fortluft abgegeben (sogenannte Kreislauf-Verbund-Wärmerückgewinnungen, KVS-WRG).

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.

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.

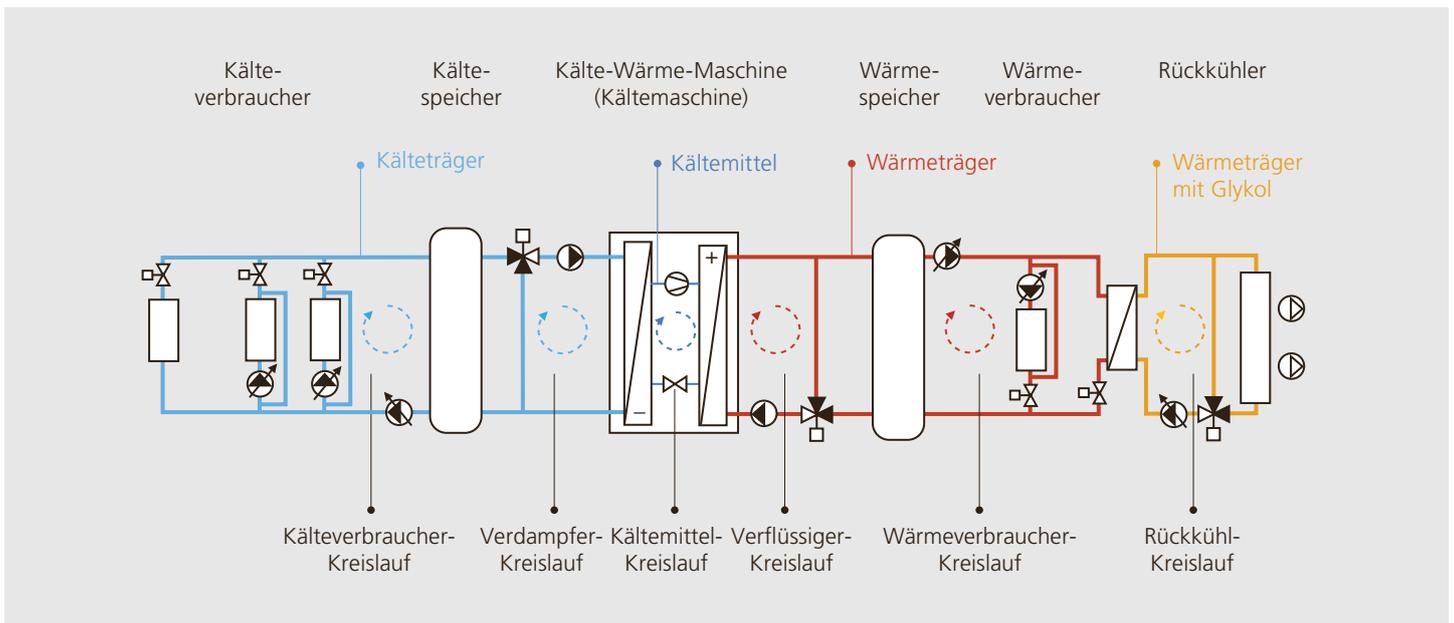
Merkmale von Heizungs- und Kälteanlagen

Heizungskreise verhalten sich träge. Temperaturschwankungen in einem konventionellen Heizungssystem ohne Lüftungsanlagen 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 über- respektive 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.



Exkurs

Alternative Einbindung des Rückkühlers in das Standard-Schema

Im Bild 8.1 ist der Rückkühler nach dem Wärmespeicher und den Wärmeverbrauchern in das System eingebunden. Diese Einbindung ist möglich, wenn das System auf der warmen Seite temperaturabhängig mit 25 bis 45°C gefahren werden kann und keine konstante Speichertemperatur verlangt wird. Werden der Speicher und die Wärmeabgabe so konzipiert, dass im Wärme-Verbraucher-Kreislauf immer eine konstante Temperatur (z. B. 50°C) erbracht werden muss, dann soll der Rückkühler vor dem Speicher eingebunden werden (siehe Bild 8.2).

Ein Dreiweg-Ventil stellt dann sicher, dass – sobald kein Wärmebedarf mehr besteht – der Wärme-Verbraucher-Kreis abgekoppelt und die Wärme direkt zum Rückkühler geführt wird. Dadurch kann die Kälte-Wärme-Maschine die Austrittstemperatur am Verflüssiger so senken, dass sie auf die Aussentemperatur abgestimmt ist. Durch die tiefst mögliche Temperatur-Auskoppelung behält das System die höchste Effizienz.

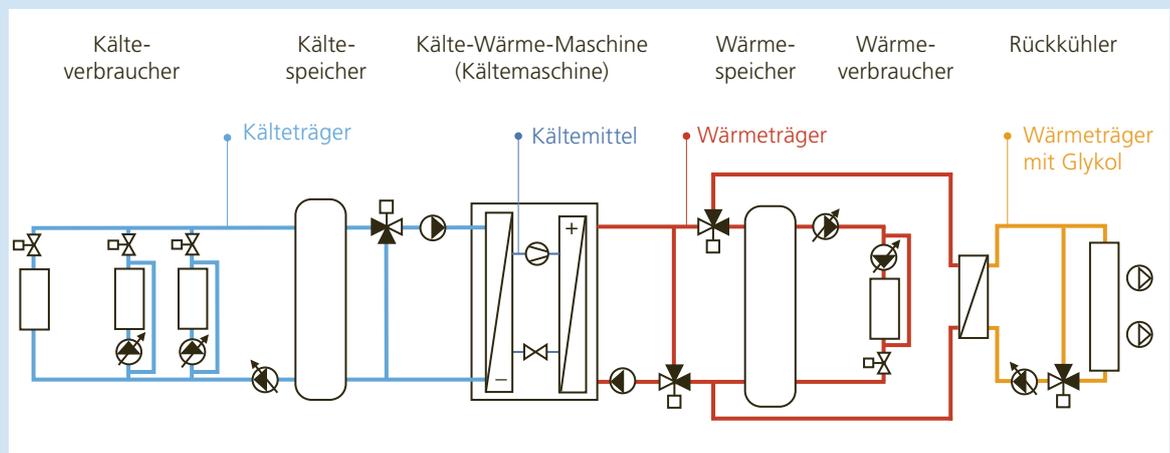


Bild 8.2: Je nach Konzept wird der Rückkühler vor dem Speicher eingebunden. Dies ist notwendig, falls der Speicher und die Wärmeverbraucher eine konstante Temperatur verlangen.

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 Trockenläufer installiert. Heute werden nur noch drehzahlgeregelte Pumpen 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 8.3).

Pumpenart	Volumenstrom m ³ /h	Druckdifferenz bar	Elektro-Anschluss V	Schutzart IP	Bemerkungen
Nassläufer (Inline-Pumpe) 	bis 50 m ³ /h	bis 1,2 bar	1 x 230 V	IP44	<ul style="list-style-type: none"> • Für kleinere Leistungen • Kleinere Förderhöhen • Motorenwärme wird durch das Medium abgeführt. • Abgesetzter FU • Achtung: Kondensat in Motor und FU bei kombinierten Systemen (Pumpe-Motor-FU)
Trockenläufer (Inline-Pumpe) 	bis 160 m ³ /h Ausnahmen: bis 300 m ³ /h	bis 2,5 bar	3 x 400 V	IP55	<ul style="list-style-type: none"> • 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-Sockel-pumpe 	ab 20 m ³ /h	bis 10 bar	3 x 400 V	IP55	<ul style="list-style-type: none"> • 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 8.3:
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 Einregeln 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 «durch-

flossen». 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 Auslegung­leistung 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 Temperaturgrenzwerte.

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 leistungsgeregelten Kälteerzeugern (20 % bis 100 %) im Verdampfer- und im Verflüssigerkreis mit variablem Volumenströmen gearbeitet wird.

Bild 8.4:
Einbindung einer Kältemaschine ohne Eintrittstemperatur-Regelung.

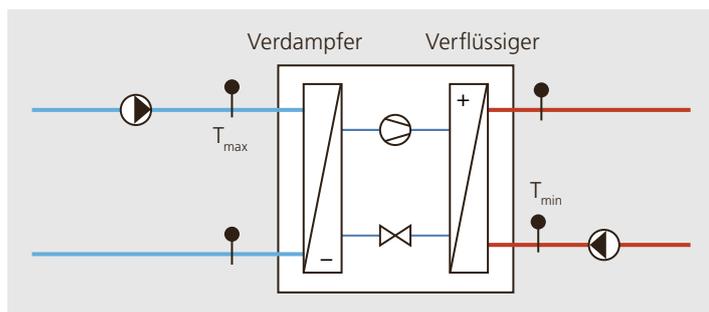
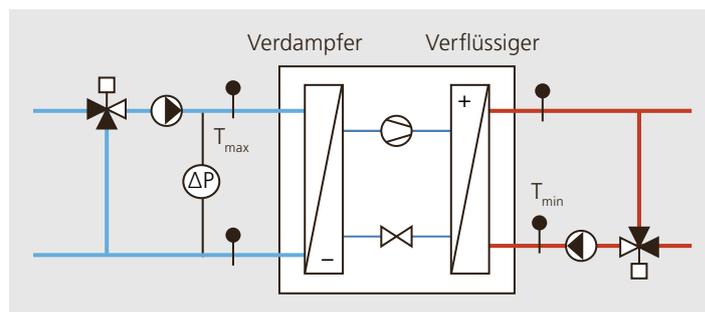


Bild 8.5:
Einbindung einer Kältemaschine mit Temperaturbegrenzungen.



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 leistungsgeregelte 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 Regelungseinheit der Kältemaschine übernommen werden. Erfahrungsgemäss führt die Regelung 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 drehzahlgeregelten Pumpe über den Volumenstrom begrenzt werden. Mit der Reduktion des Volumenstroms erhöht sich gleichzeitig die Energieeffizienz der Anlage (siehe auch Kapitel Regelung).

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 Laufzeit¹ des Ventilantriebs darf nicht mehr als 30 Sekunden betragen.
- Die Durchflussüberwachung (Strömungswächter) ist im Verdampfer-Kreislauf ein Muss; Differenzdruckmessung oder thermische Strömungsüberwachung sind genauer als ein Paddel-Strömungswächter² 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.

Einbindung von Kältemaschinen mit brennbaren Kältemitteln

Wird eine Kältemaschine mit einem brennbaren Kältemittel wie Propan (A3) oder Isobutan (A3) in ein wassergeführtes Kälte-, Heizungs- oder Trinkwarmwassersystem (Sekundärsystem) eingebunden, muss sichergestellt werden, dass bei einem Defekt im Wärmeübertrager keine gefährliche Menge Kältemittel in den Wasser- bzw. Wärmeträgerkreislauf gelangt. Andernfalls kann das Kältemittel Personen und Gebäude gefährden.

Die Ausführung des Verdampfer- und Verflüssigerkreislaufes muss daher den örtlichen Vorschriften, den Herstellerangaben sowie den Vorgaben der SN EN 378 entsprechen. In der Norm SN EN 378-1 finden sich Konzeptbeispiele für die sichere Einbindung von Kältemaschinen mit brennbaren Kältemitteln. Empfohlene Sicherheitsmassnahmen (je nach System einzeln oder kombiniert) können sein:

- Systemtrennung durch einen Zwischenkreis (Bild 8.6)
- Verwendung von doppelwandigen Wärmeübertragern (Bild 8.7)
- Sicherheitsventil auf der Wasserseite – der Ablassdruck ist in Absprache mit dem Hersteller festzulegen. Falls Kältemittel austritt, ist die Austrittsstelle als Gefahrenbereich einzustufen (Bild 8.8)
- Automatische Entlüftung ins Gehäuse des Kälteerzeugers mit Detektion (Bild 8.9). Ermitteln die Transmitter in den Sekundärkreisen eine kritische Kältemittelkonzentration, werden diese die Kreise automatisch mit Magnetventilen abgekoppelt, die Kältemaschine ausgeschaltet und ein Alarm ausgelöst. Wichtig: Der Einsatz von automatischen Entlüftern, die Kältemittel in nicht überwachte Bereiche ablassen, ist nicht erlaubt.

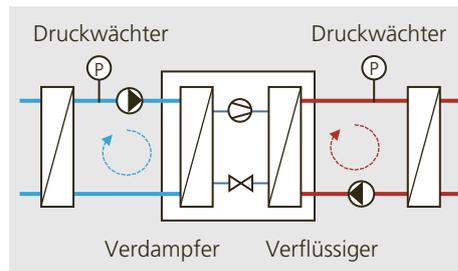


Bild 8.6: Zwischenkreise mit Druckwächter, die das System überwachen und bei einem Vorfall alarmieren.

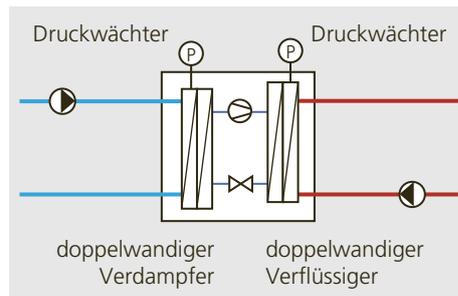


Bild 8.7: Doppelwandige Wärmeübertrager mit Druckwächter, die das System überwachen und bei einem Vorfall alarmieren.

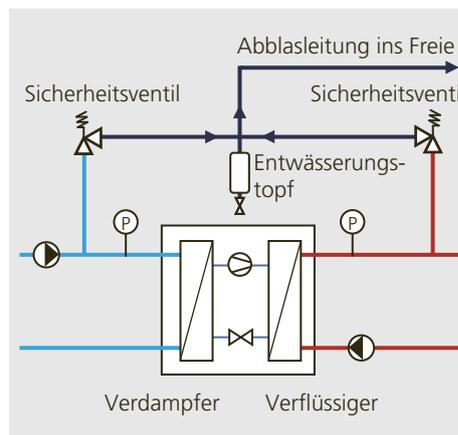


Bild 8.8: Sicherheitsventile lassen Kältemittel ins Freie ab und Druckwächter überwachen das System und alarmieren bei einem Vorfall.

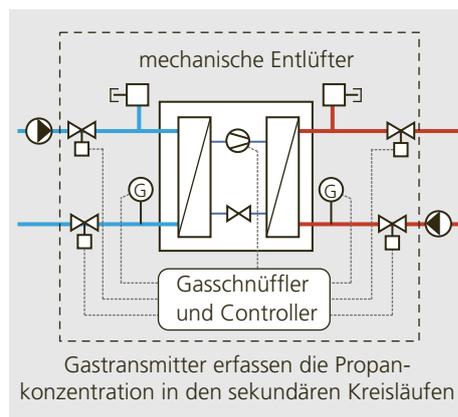


Bild 8.9: Entlüftung in einen überwachten Bereich mit Detektion und Alarmierung.

Tritt brennbares Kältemittel aus,

- soll dies erkannt werden (mit einem Druckwächter, Gas-Transmitter, Gas-schnüffler etc.),
- müssen die vorgesehenen Sicherheitssysteme aktiviert werden (z. B. Lüftung hochfahren, Kältemaschine ausschalten, Magnetventile in den Sekundärkreisen schliessen etc.),
- muss ein Alarm ausgelöst werden,
- muss dies optisch und akustisch im Raum signalisiert werden (z. B. mit Warnleuchten).

Anlagen mit brennbaren Kältemitteln zu planen ist anspruchsvoll. Es ist nicht möglich, in diesem Fachbuch alle (Sicherheits-) Aspekte genau auszuführen. Die Informationen sollen vielmehr als Anregung dienen und die Bilder sind eine vereinfachte Darstellung, die Verständnis für die Problematik schaffen sollen. Sie sind keine «pfannenfertige Anleitung» zum Bau der Anlagen.

Mehr Informationen zu den brennbaren Kältemitteln enthält das SVK-Merkblatt: «Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln der Sicherheitsklasse A3 und A2L».

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 Beimischschaltung (C) gelöst werden (siehe Bild 8.10). Mit diesen Schaltungen können Schwankungen der Kaltwasser-Vorlauftemperaturen vermieden werden.

Bild 8.10: Grundsaltungen der Kälteverbraucher und ihre Eigenschaften. Die Schaltung ist jeweils auf das Hauptnetz bezogen.

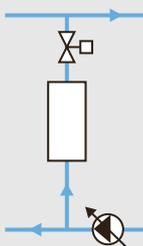
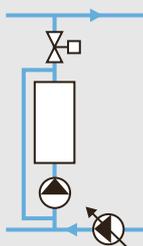
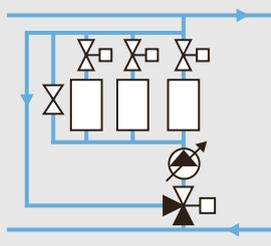
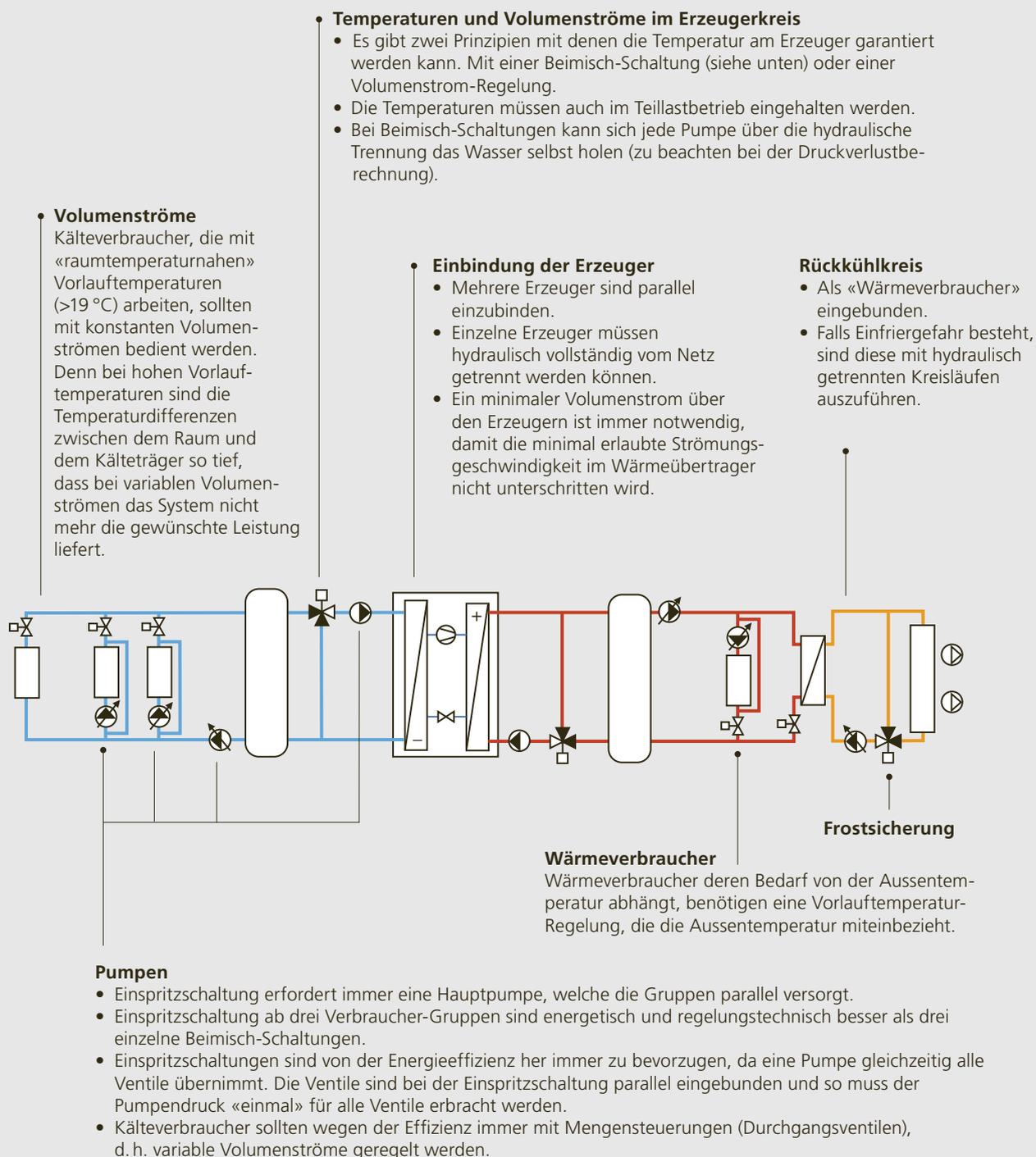
	A Drossel-Schaltung	B Einspritz-Schaltung	C Beimisch-Schaltung
			
Typische Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Lüftungsanlagen • Prozesskälte • Bei latenter und sensibler Kühlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermoaktive Bauteilsysteme • Kühlbalken; Kühlbaffle • Kühldecken • Umluftkühler • Brüstungsgeräte • Verhindert latente Kühlung (Kondensatbildung) • Vorlauftemperatur ist mit der Regelung beeinflussbar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleiche Anwendungen wie B • Zusätzliche Drosselschaltung bei einzelnen Verbrauchern (z. B. Kühldeckenelementen)
Zu beachten	<ul style="list-style-type: none"> • Schaltung, mit der die tiefstmögliche Temperatur erreicht wird (für Entfeuchtung). • Temperatur am Kälteverbraucher kann schwanken • Schichtungen bei Lüftungsanlagen-Kühler beachten 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaltung, mit der die geforderte Temperatur mit der höchsten Kälte-träger-Temperatur erreicht wird. • Temperaturen können exakt eingehalten werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturen können sehr exakt eingehalten werden.

Bild 8.11: Überblick hydraulisches System einer Klimakälteanlage.



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

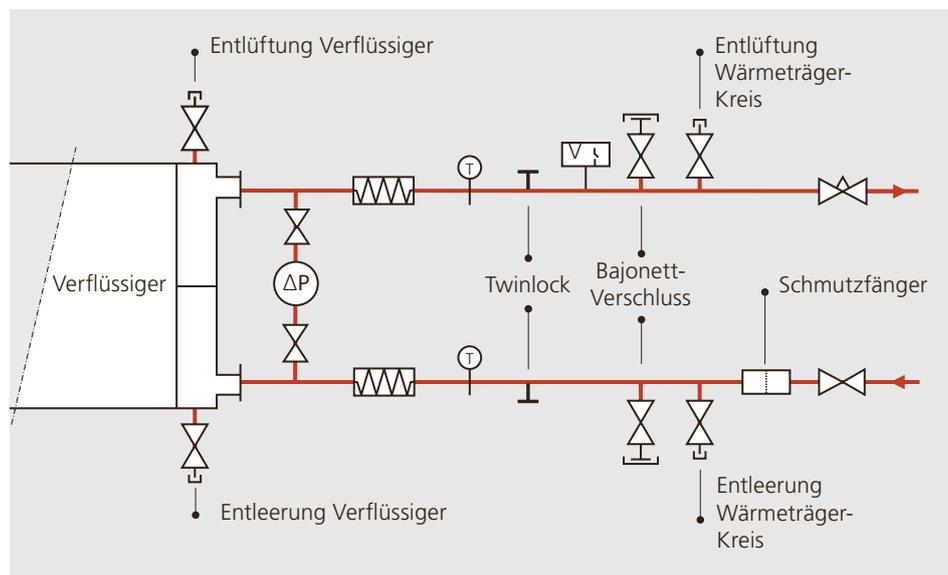


Bild 8.12:
Armaturen und
Instrumente am
Beispiel der
Verflüssigerseite.

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.
	Bajonettverschluss (Storz-Kupplung) (optional)	Bei offenen Kreisläufen (Verdunstungsrückkühler) wird empfohlen, einen Bajonettverschluss vorzusehen. Dies ermöglicht eine einfache chemische Reinigung des Verflüssigers im Umlaufverfahren. Vor dem Bajonettverschluss muss noch zusätzlich eine Absperrung eingefügt werden.
	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.
	Differenzdruckanzeige	Differenzdruckanzeige für Kontrolle des Volumenstroms
	Temperaturfühler (T)	Temperaturanzeige

Bild 8.13:
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 Schalzhäufigkeit 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

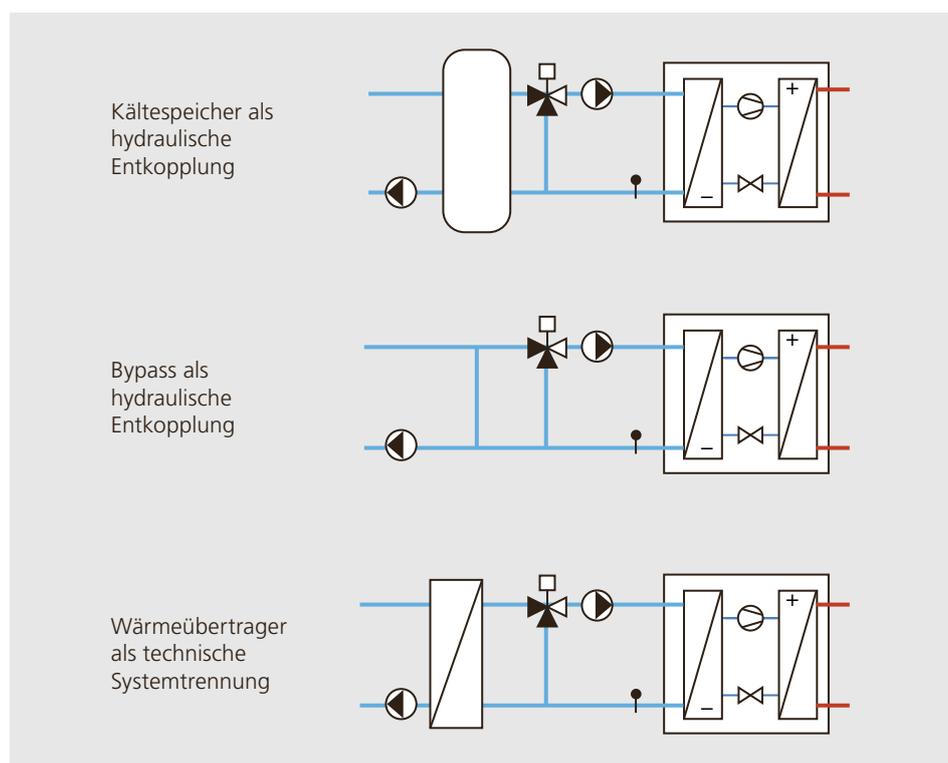


Bild 8.14: Beispiele von hydraulischen und technischen Trennungen.

Speicher als hydraulische Entkopplung

Bei Anlagen

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

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 Leistungsregelung

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

Technische Systemtrennung

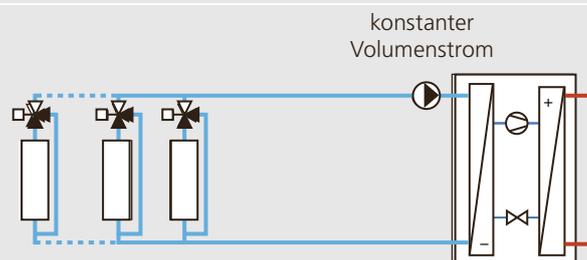
Bei der technischen Systemtrennung handelt es sich um eine Anlagentrennung mit einem Wärmeübertrager. Er stellt sicher, dass zwei Anlagensysteme hydraulisch (flüssigkeitsseitig) getrennt sind – so z. B. bei der Einbindung des Rückkühlers. Dadurch können

- 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

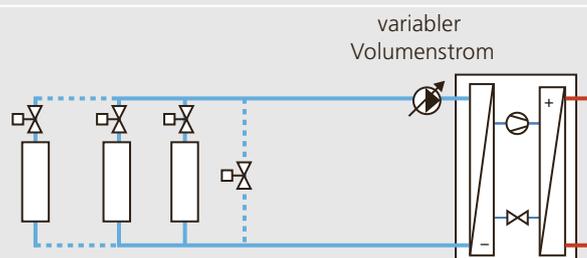
1. System ohne hydraulische Entkopplung mit konstantem Volumenstrom

- 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

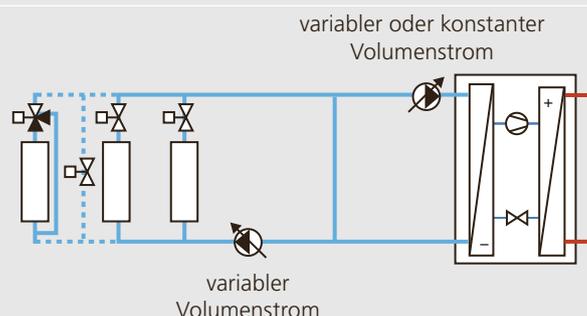
- Einfacher Aufbau der Anlage
- Preisgünstig
- Stellt höhere Ansprüche an die Planung, da die Mindestdurchflussmengen sichergestellt werden müssen (Sicherheit).
- Kälteverbraucher dürfen keine hohen Ansprüche an Leistungs- und Temperaturstabilität haben.



3. System mit hydraulischer Entkopplung ohne Speicher

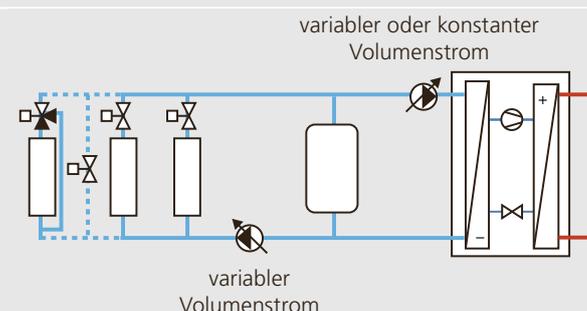
- Geeignet für Anwendungen mit hoher Grundlast ($\dot{Q}_{V \min.} > \dot{Q}_{E \min.}$)*
Trifft dies nicht zu, dann weist das System schwankende Temperaturen und hohe Schalzhäufigkeit auf.
- Es ist zu beachten, dass der Volumenstrom der Verdampfer-Pumpe ca. 5 % höher sein muss als der Volumenstrom über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

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



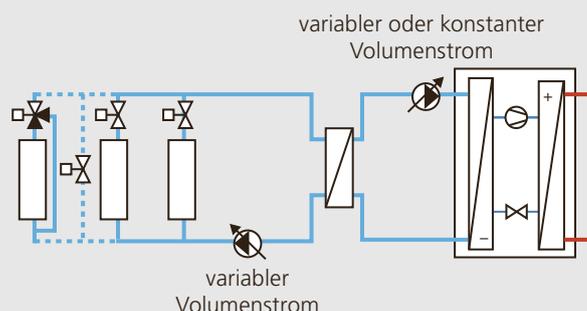
4. System mit hydraulischer Entkopplung mit einem Speicher

- 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 Drosselbeziehungsweise 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 Kaltwasserpumpe zugeordnet, eine Verbraucher-Netzpumpe entfällt. Der Parallelbetrieb der drehzahlgeregelten Pumpen stellt höhere Ansprüche an die Planerin der Anlage und ist daher bei Anlagen mit mehr als einer Kältemaschine nicht zu empfehlen. Bild 8.15 zeigt ein Beispiel.

Verhalten von Volumenstrom und Temperaturen

Die beiden Grafiken in Bild 8.16 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 Eintritts-temperatur in den Verdampfer und die Temperaturdifferenz über den Verdampfer sinkt bis auf 3 K (Abschalt- punkt).

Bild 8.15: Kälteanlage mit variablem Volumenstrom und einem Bypass.

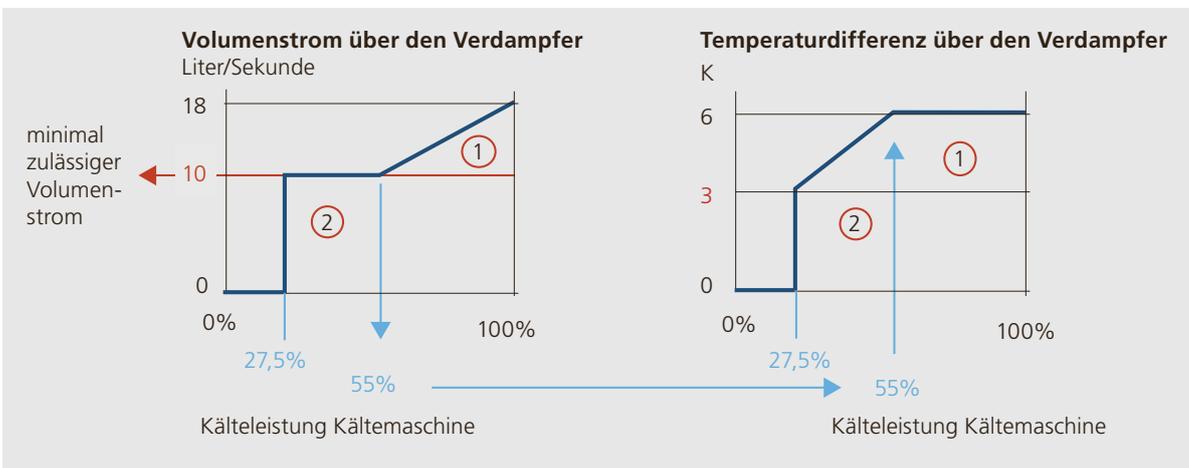
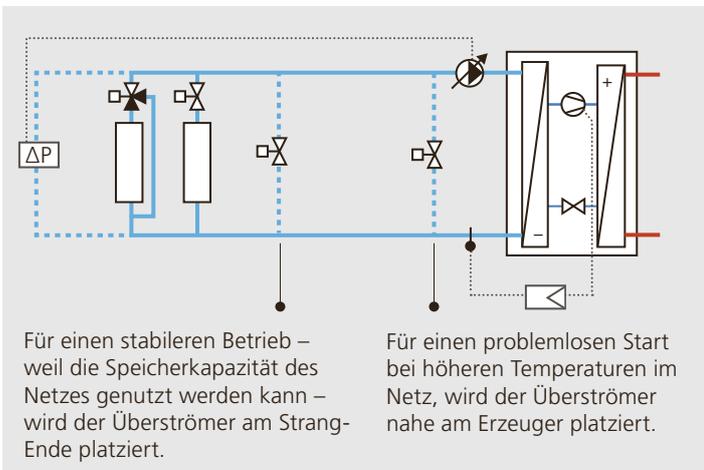


Bild 8.16: Verhalten von Volumenstrom und der Temperaturen bei unterschiedlichen Leistungen der Kälteanlage.

8.6 Kaltwasserspeicher

Kaltwasserspeicher dämpfen Temperaturveränderungen 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 leistungsgeregelte 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.

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 Leistungs-

spitzen (über 2 bis 3 Stunden) genutzt werden kann.

Auslegung des technischen Speichers

Der technische Speicher ist der kleinstmögliche Speicher, der für den störungsfreien, sicheren Betrieb der Kälteanlage notwendig ist. 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.

Bemessung des Kältespeichers

Die Norm SIA 384/4 (2025) beschreibt, wie das erforderliche Mindestvolumen eines Kältespeichers zu bestimmen ist. In einem ersten Schritt wird die Speichergrosse auf Grundlage der minimalen Laufzeit des Verdichters berechnet. In einem zweiten Schritt erfolgt die Berechnung anhand des Bedarfs des grössten Kälteverbrauchers. Weichen die beiden berechneten Volumina deutlich voneinander ab, wird zur

Plausibilisierung eine dritte Berechnung durchgeführt. Dabei wird das erforderliche Volumen auf Basis des minimal notwendigen Volumenstroms ermittelt.

Die detaillierte Berechnung ist im Anhang F gemäss der SIA 384/4 (2025) beschrieben.

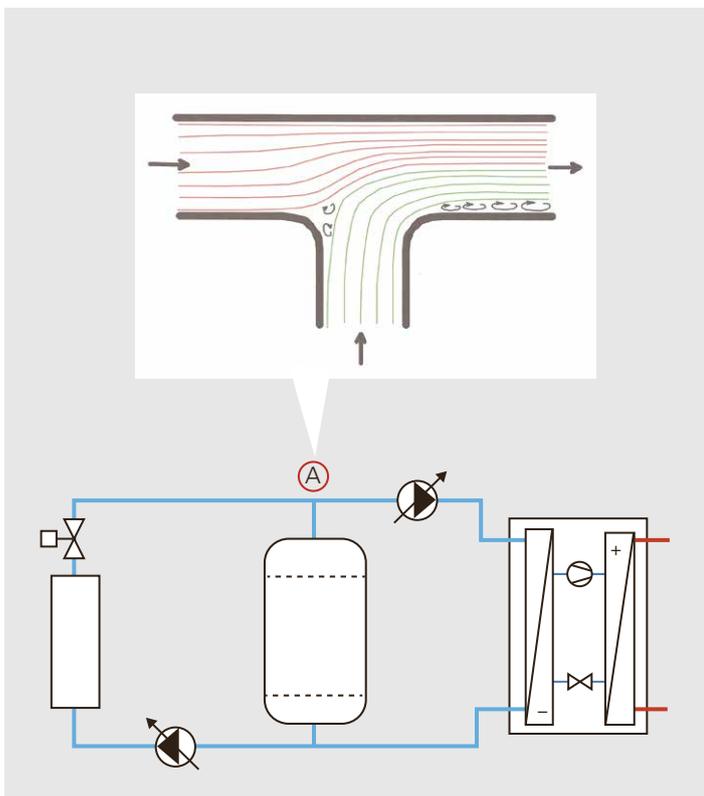
Einbindung von Kältespeichern

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 8.17).

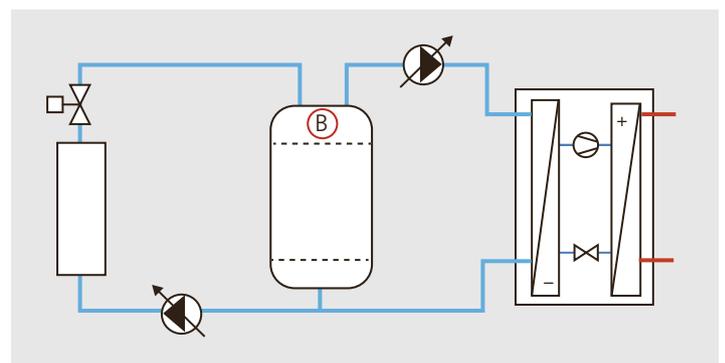
Falls in der Rücklaufleitung des Kältekreislaufes Temperaturschichtungen entstehen (siehe Bild 8.17, Punkt A), verursachen diese schwankende Temperaturen am Eintritt der Kältemaschine. Diese wiederum kann zu Instabilität bei der Regelung der Kältemaschine führen.

Bild 8.17: Hydraulische Einbindung eines Kaltwasserspeichers. Der Detailausschnitt zeigt, wie im Punkt A Temperaturschichtungen entstehen können.



Um dies zu vermeiden, kann der obere Teil des Speichers als Mischkammer verwendet werden (siehe Bild 8.18, 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 8.18: Hydraulische Einbindung eines Kaltwasserspeichers mit einer Mischkammer (B) im oberen Bereich des Speichers.



Beispiel: Anlage mit technischem Speicher

Im Beispiel in Bild 8.19 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 regeln, dass die zweite Maschine über die Kältekreislauf-Rücklauftemperatur ausschaltet, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur der Verdampfer die Hälfte des Auslegungswertes erreicht hat.

Die Steuerung muss ausserdem dafür sorgen, dass die Zuschaltung der Maschinen regelmässig in wechselnder Reihenfolge erfolgt, sodass beide Maschinen in etwa die gleiche Anzahl an Betriebsstunden erreichen.

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-Regelung. 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 10.6.

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).

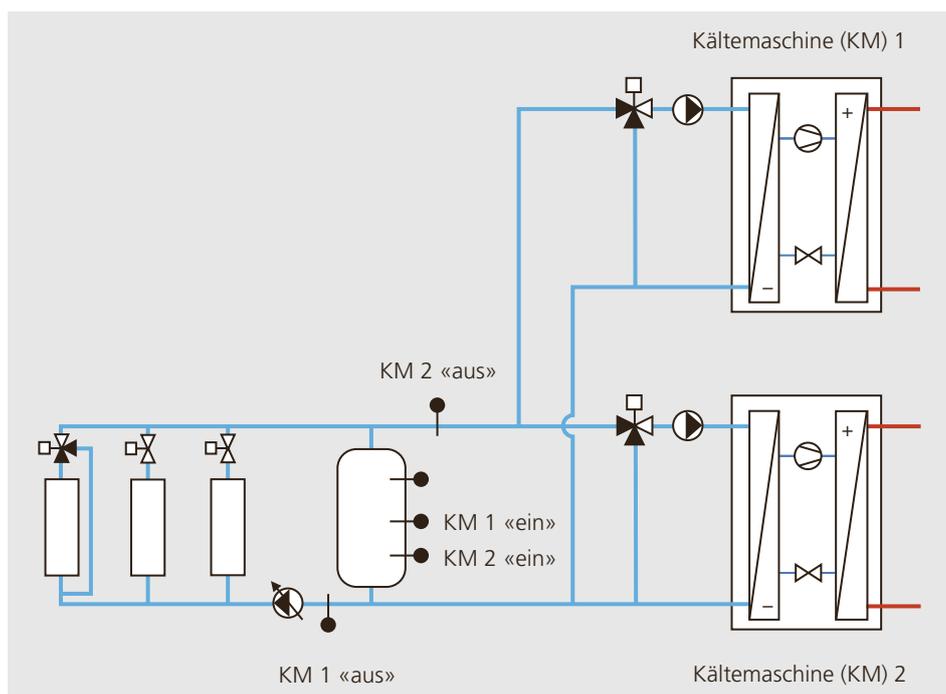


Bild 8.19: Beispiel einer Kälteanlage mit 2 identischen Kältemaschinen und einem (kleinen) technischen Speicher. Die Kältemaschinen erhalten unterschiedliche Ausschalt-Signale.

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.

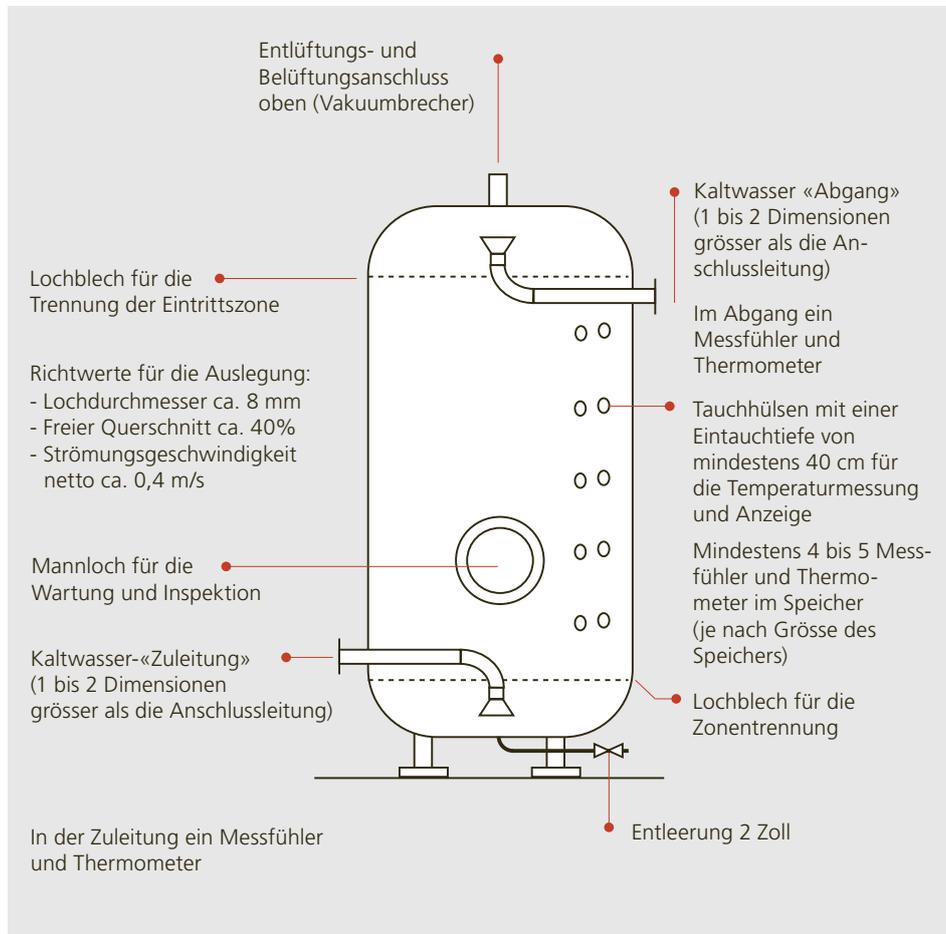


Bild 8.20:
 Beispiel der Konstruktion eines Kaltwasserspeichers mit Angaben zur Ausstattung.

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.

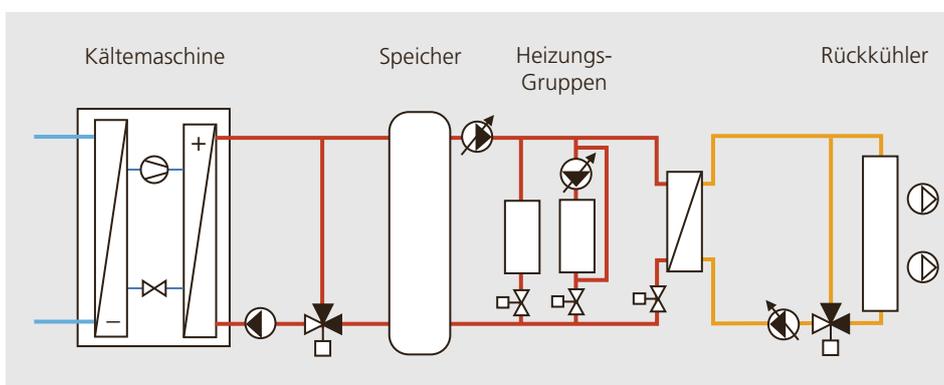


Bild 8.21: Kälte-Wärme-Maschine mit der Einbindung der Rückkühlung ins Wärmenetz. Die Wärme wird prioritär von der Heizung genutzt. Wärme, die von der Heizung nicht genutzt werden kann, wird an die Umgebung abgegeben (Rückkühlung).

Einfluss der Distanz zwischen der Kältemaschine und dem Rückkühler

Bei kleiner Distanz zwischen Kältemaschine und Rückkühlung genügt eine Beimischregelung 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 Regelung stabil zu halten.

Bei HLK-Anlagen wird die Einbindung gemäss Bild 8.22 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:

$$\text{Länge} = \frac{4 \times 15 \text{ Sekunden} \times \text{Volumenstrom}}{(\text{Innendurchmesser der Leitung})^2 \times \pi}$$

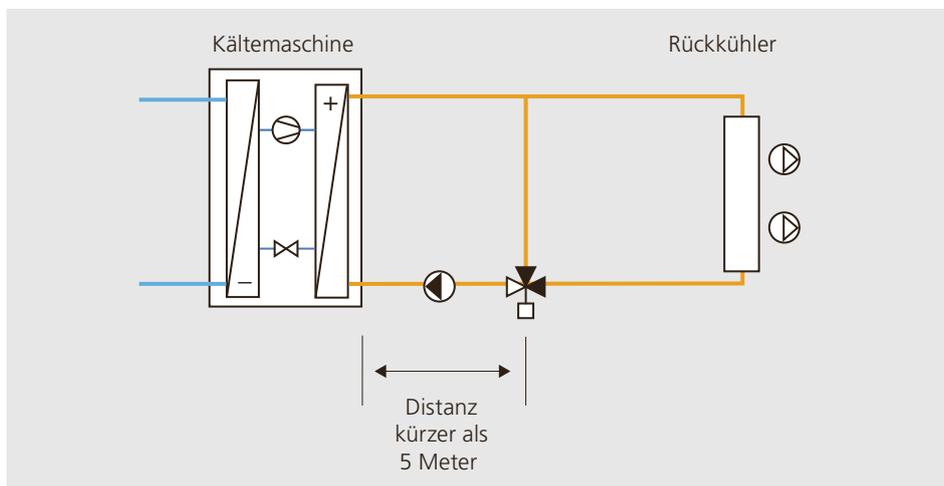


Bild 8.22:
Hydraulische Einbindung des Rückkühlers bei kurzer Distanz zwischen Verflüssiger und Rückkühler.

8.8 Aktives Free-Cooling mit Kaltwasser

Beim aktiven Free-Cooling mit Kaltwasser erfolgt die Kühlung ohne Kältemaschine. Es kann grundsätzlich mit variablem Volumenstrom betrieben werden und bedarf 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 des aktiven Free-Coolings mit Kaltwasser bei einer Kältemaschine (Bild 8.25) ist hydraulisch und regeltechnisch anspruchsvoll, da die Kältemaschine sehr sensibel auf schwankende und sich stark ändernde Temperaturen reagiert.

In Bild 8.23 bis Bild 8.27 sind verschiedene Einbindungen dargestellt. Die angegebenen Kältekreis-Vorlauftemperaturen sind Richtwerte, welche sich auf den Standort Zürich-Kloten beziehen.¹

¹ 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 Rückkühlern² grösser 22 °C

Vorteil

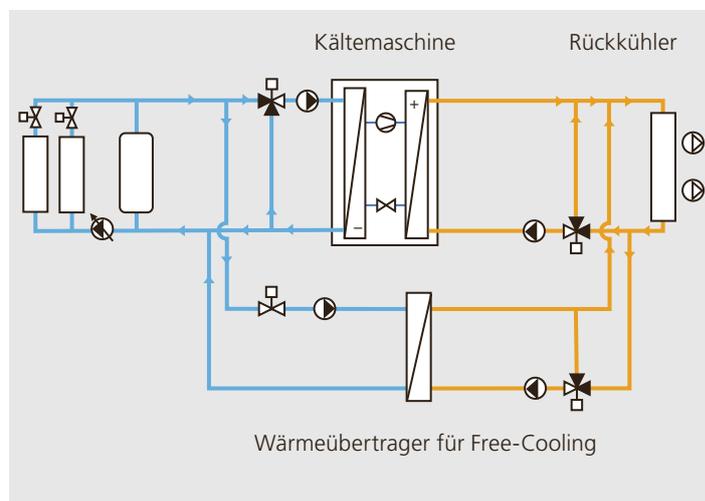
- kostengünstige Variante

Nachteil

- Temperaturdifferenz über den Wärmeübertrager verringert das Potenzial.

² Hybridrückkühler, die ständig benetzt werden.

Bild 8.23:
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 Kälte-träger 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 Kälte-träger einsetzen oder einen Rückkühler für das Free-Cooling nutzen, der sich selber entleert

Bild 8.24:
2. Free-Cooling über einen parallel eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.

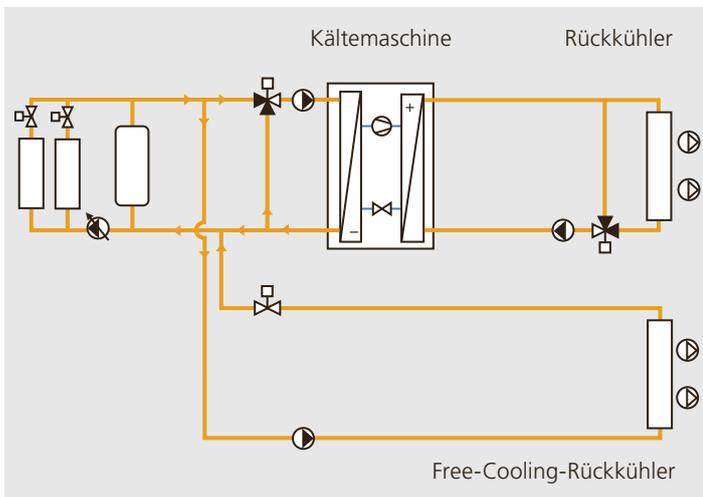
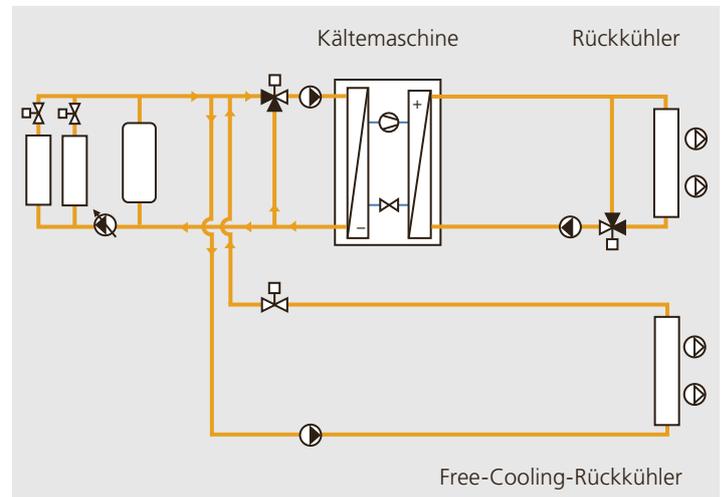


Bild 8.25:
3. Free-Cooling über einen seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.



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.

Bild 8.26:
4. Free-Cooling bei Direktkondensation mit einem parallel eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.

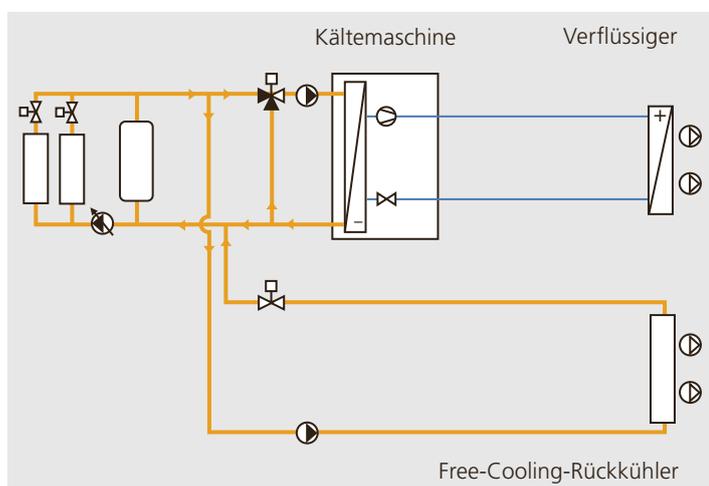
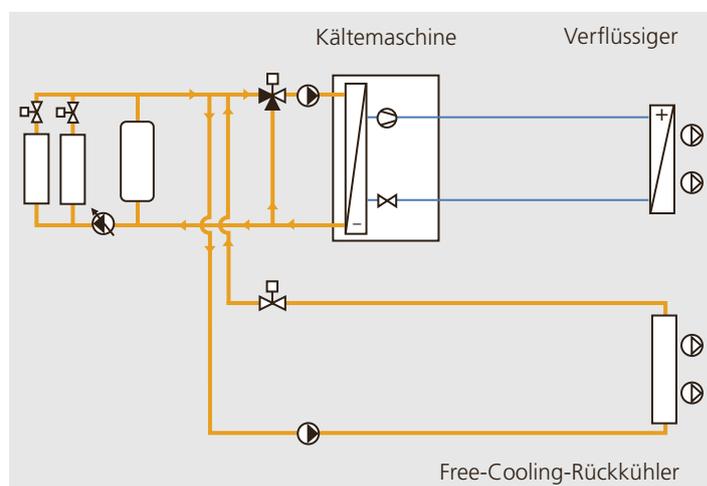


Bild 8.27:
5. Free-Cooling bei Direktkondensation mit einem seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler.



Systeme mit Direktkondensation (Bild 8.26 und Bild 8.27) haben, verglichen mit den Wärmeträgersystemen (Bild 8.24 und Bild 8.25) nur sehr geringfügige Vorteile bezüglich Stromeffizienz.

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).

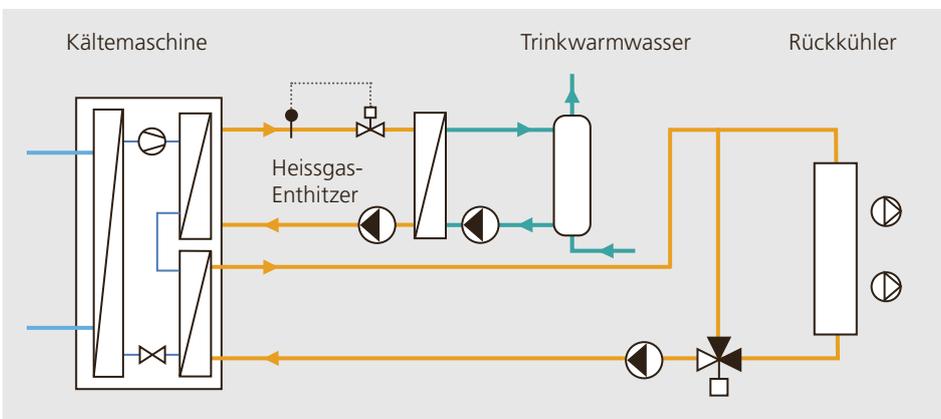


Bild 8.28:
Möglichkeit, wie das
Heissgas direkt ge-
nutzt werden kann.

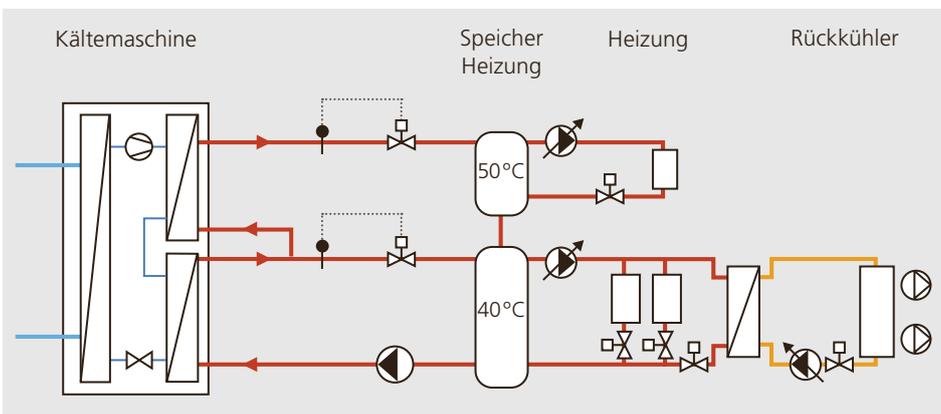


Bild 8.29:
Möglichkeit, wie das
Heissgas und die Kon-
densationswärme ge-
nutzt werden kann.

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 Anhang E).

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-Regelung. Die Eintrittstemperatur-Regelung 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 8.31). 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 J.

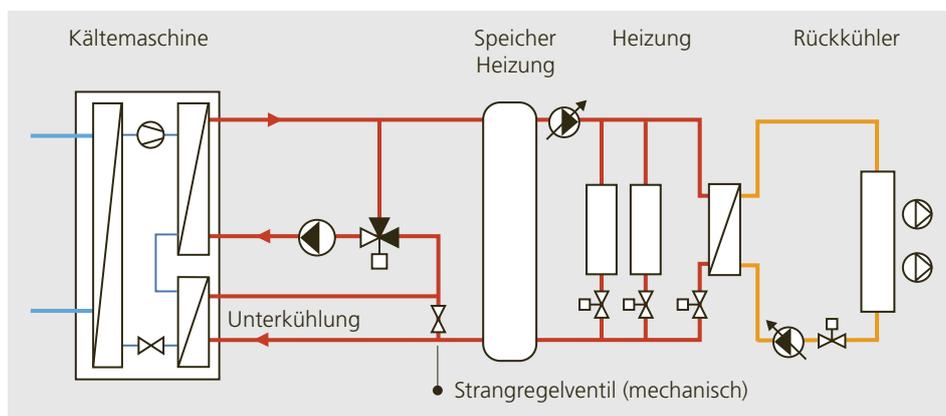


Bild 8.30:
Möglichkeit, wie mit einer Unterkühlung die Energieeffizienz zusätzlich verbessert werden kann.

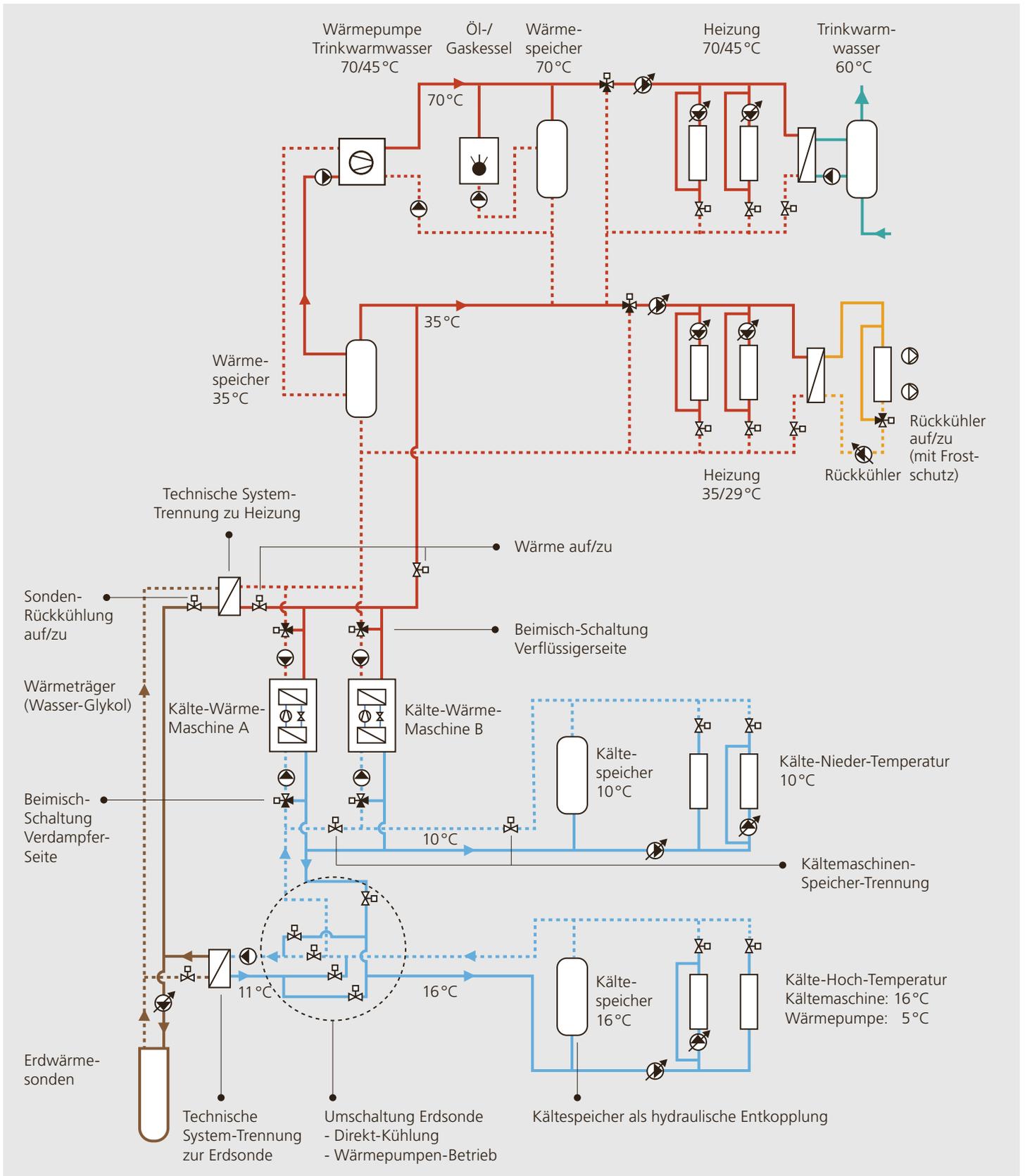


Bild 8.31: Beispiel einer Klimakälteanlage mit zwei Kältenetzen, Wärmenutzung und mit Erdwärmesonden.

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 Kälte-trägers 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 Klimaanlage» (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

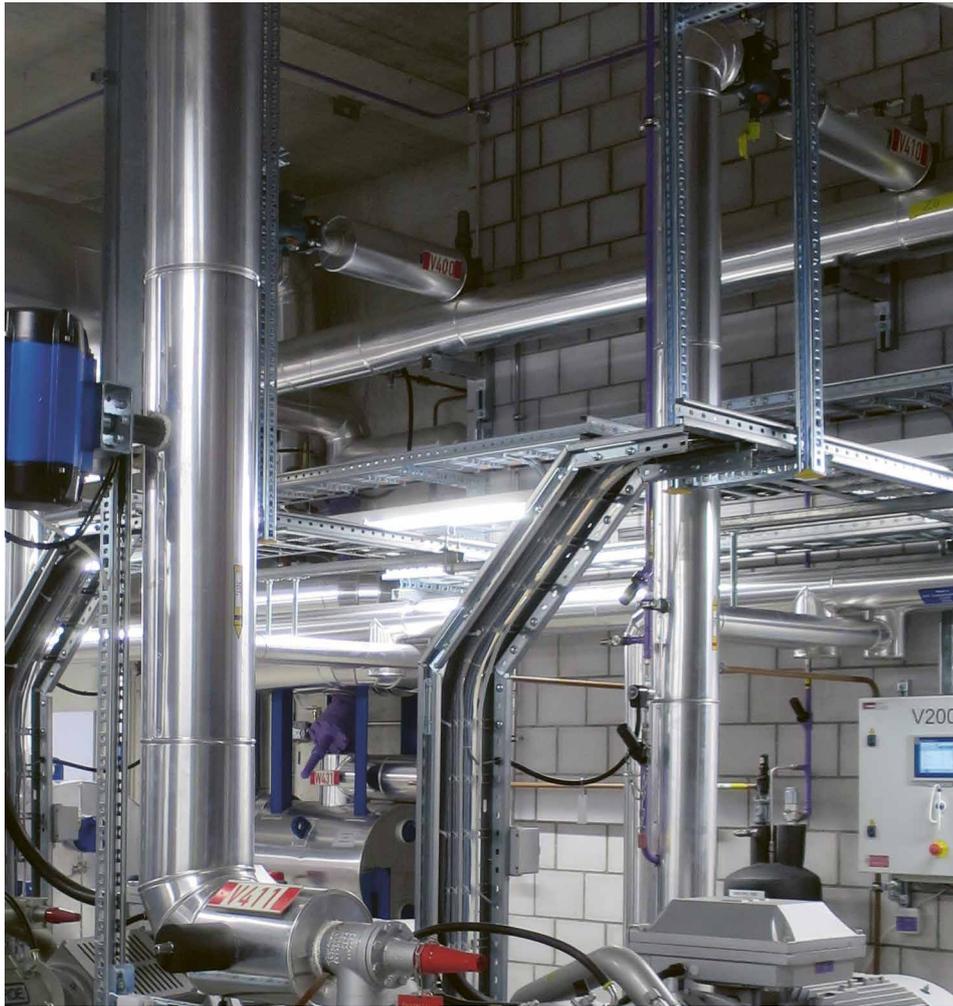
Als Werkstoff wird oft Polypropylen verwendet. Die Anwendung von Kunststoffrohren hat die folgenden Vor- und Nachteile:

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.

Kälteedämmung

Die Kälteedämmung 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 Kälteedämmung 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.

Gemäss SIA 384/4 (2025) muss der Wasserdampf-Diffusionswiderstandswert (s_d -Wert) der Dämmung mindestens 50 m betragen.

Die verschiedenen Dämmstoffe

Für Kühl- bzw. Kälteleitungen nutzt man hauptsächlich drei Dämmstoffe: synthetischer Kautschuk (flexibler Elastomerschaum), Alu-kaschierte PIR-Rohrschalen (Polyisocyanurat) und Schaumglas-Rohrschalen (Polyethylen).

Synthetischer Kautschuk

Synthetischer Kautschuk hat eine hohe Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl, wirkt als Dampfbremse und verhindert damit sicher Tauwasser. Synthetischer Kautschuk ist flexibel und leicht zu verarbeiten (auch bei Formteilen). Für Kautschuk-Dämmungen gibt es spezielle Kälterohrschellen, die für die Verteilsysteme angewendet werden können. Der Kautschuk-schlauch kann somit einfach mit der Kälteschelle verklebt werden.

Der halogenfreie, synthetische Kautschuk enthält keine halogenhaltigen Flamm-schutzmittel (wie Chlor oder Brom), sondern setzt stattdessen andere, weniger problematische Stoffe zur Flammwidrigkeit ein. Die Verarbeitung von halogen-freiem, synthetischem Kautschuk ist anspruchsvoll. Zudem verfügt er über eine höhere Wärmeleitfähigkeit als herkömmlicher synthetischer Kautschuk.

Aus verarbeitungstechnischen Gründen wird oft empfohlen, die Kälteleitungen

Bild 8.32:
Gedämmte Rohrhalterung für eine Kälteleitung. Sie vermeidet Kältebrücken und Kondensatbildung.

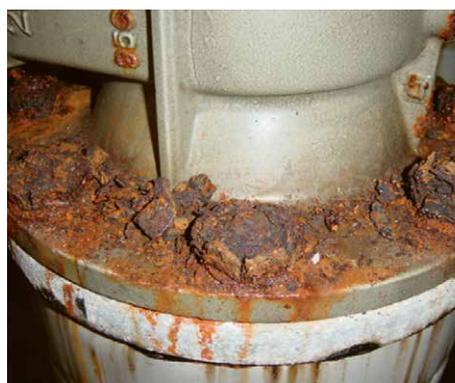


Bild 8.33:
Korrosionsschäden an Kaltwasserleitung (unter der Dämmung).

mindestens 19 mm stark mit synthetischem Kautschuk zu dämmen. Bei synthetischem Kautschuk darf – aufgrund der aktuellen Vorgaben des Brandschutzes – die maximale Dämmstärke von 60 mm nicht überschritten werden. Zudem gibt es beim halogenfreien synthetischen Kautschuk derzeit eine Beschränkung der Dämmstärke von 32 mm.

(siehe auch Merkblatt «Flexibler Elastomerschaum im Klima-/Kältebereich»).

PIR-Alu-System

PIR-Dämmstoffe haben eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und sind daher äusserst energieeffizient. Um eine Durchdringung mit Feuchtigkeit zu verhindern, muss zwingend eine Dampfbremse angebracht werden. Dazu werden heute mehrheitlich Kaschierungen aus Alu-Verbundfolien eingesetzt. Die PIR-Schalen und Formteile können auch mit flüssigem Kunststoffüberstrich eingestrichen werden und so dampfdiffusionsdicht verklebt werden. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass das vollflächige Überstreichen anspruchsvoll ist und die Gefahr besteht, dass es in schwer zugänglichen Bereichen Lücken gibt.

Die Rohraufhängungen (Formteile) mit PIR-Alu zu dämmen, braucht Sorgfalt und ist zeitintensiv. Bei starren Materialien wie PIR beträgt die empfohlene minimale Dämmstärke 30 mm. Mit 30 mm Dämmung können Rohraufhängungen (Rohrschellen) mitgedämmt und Wärmebrücken sowie die Tauwasserbildung vermieden werden.

Schaumglas

Dämmungen mit Schaumglas bieten eine hohe Druckfestigkeit, sind wasserdicht, dampfdicht und nicht brennbar. Schaumglas hat jedoch eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als PIR.

Die Schaumglas-Schalen und Formteile müssen sauber auf den Leitungen aufliegen und werden verklebt. Auch hier wird – wie beim PIR – eine minimale Dämmstärke von 30 mm empfohlen.

Abstände

Luftzirkulation (Konvektion) um die Leitungen herum hilft, die Bildung von Tauwasser auf der Dämmung zu vermeiden. Deshalb sollten gedämmte Anlagenteile nicht zu eng beieinander oder nah an Wänden, Decken oder Einbauten liegen. Die DIN 4140 empfiehlt einen Abstand von mindestens 100 mm zu Wänden oder Decken.

Dämmstärken

Ökonomisch und ökologisch ist es sinnvoll, die Kühlleitungen zum einen gegen Tauwasser (d. h. als Feuchteschutz) zu dämmen, was geringe Dämmdicken braucht. Andererseits 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 MuKE n massgebend. Gemäss SIA 384/4 (2025) muss die gesamte Kälteverteilung gedämmt werden.

Einzig bei Leitungen mit Kaltwassertemperaturen über 18°C, bei denen der Kondensationsschutz gewährleistet ist, kann beim Rücklauf auf die Dämmung verzichtet werden.

Der Anhang F enthält eine Tabelle mit den von Suissetec und Isolsuisse empfohlenen minimalen Dämmstärken von Kälteleitungen und Speichern.

Brandschutz

Bei Klimakälteanlagen muss hinsichtlich des Brandschutzes auf die Durchführungen durch brandabschnittsbildende Bauteile, auf Rohrdämmungen in Fluchtwegen sowie auf Brandabschottungen geachtet werden. Besonders bei Anlagen mit brennbaren Kältemitteln ist zudem der Aufstellungsort der Kältemaschine von Bedeutung.

Die Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe, die Verwendung der Baustoffe und die erforderlichen Massnahmen für die Brandabschnittsbildung sind in den Schweizerischen VKF-Brandschutz-

vorschriften (BSR 14-15 und BSR 15-15) festgelegt.

Es wird empfohlen, bereits in der Planungsphase die geplante Umsetzung mit der für die Qualitätssicherung (QS) im Brandschutz verantwortlichen Person zu besprechen und abzustimmen.

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 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.

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 8.34).

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.

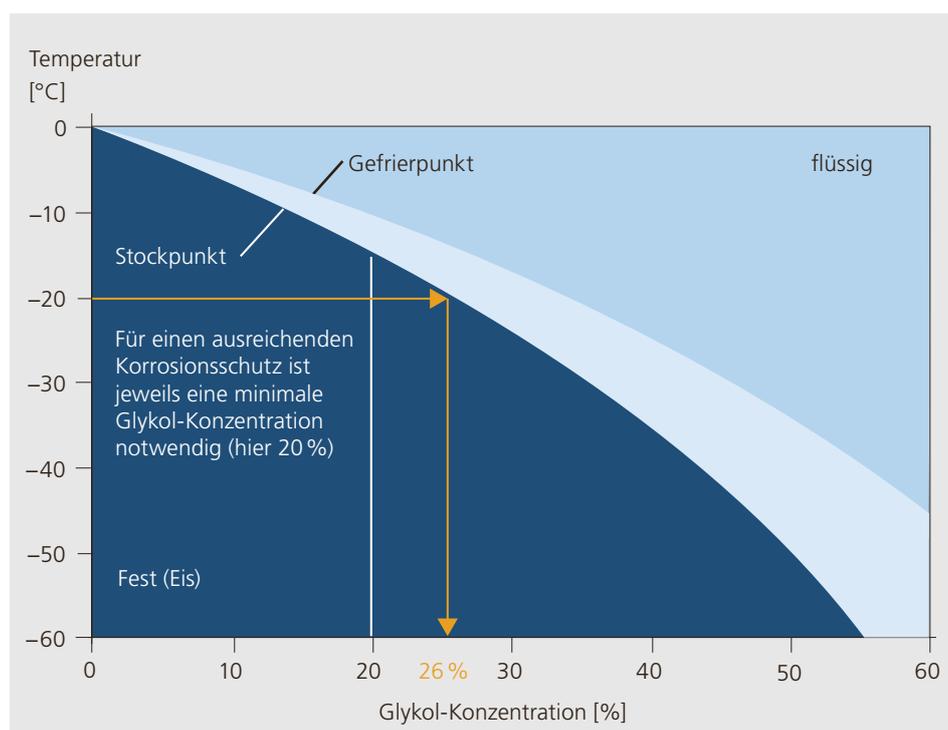


Bild 8.34: Frostsicherheit von Glykol-Wasser-Mischung. Lesebeispiel: Wird eine Frostsicherheit gemäss Auslegung bis -20°C gefordert, gibt dies gemäss der Grafik einen Glykol-Anteil im Wasser von 26 %.

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.

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-Kältewassertemperaturen 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.

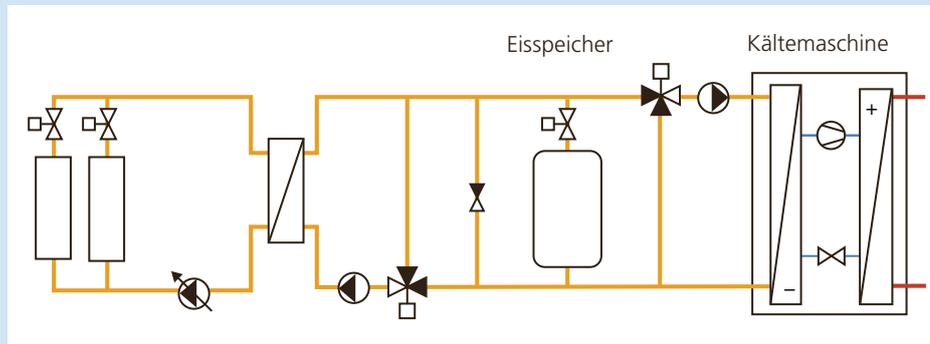


Bild 8.35:
Eisspeicheranlage
mit 3 Betriebsarten:
1. Speicher laden
2. Speicher ent-
laden
3. Kältemaschinen-
Betrieb

10 Merkmale 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. Der Volumenstrom im Primärkreislauf (Verdampfer- bzw. Verflüssiger-Kreislauf) muss immer ca. 5 % höher sein, als der Volumenstrom im Sekundärkreislauf (Kälteverbraucher- bzw. Wärmeverbraucher-Kreislauf).
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).

Steuerung und Regelung

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 Regelung.

9.1 Allgemeines

Die Art der Steuerung und Regelung 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.

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 statt-

finden muss, gibt es unterschiedliche Vorgehensansätze (siehe Kapitel 9.2).

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 Regelung, 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.

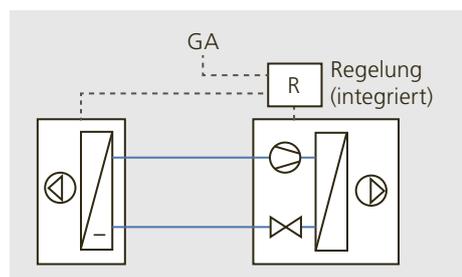


Bild 9.1:
Kältemaschine mit
Direktverdampfung
und Direktverflüssigung mit
integrierter Regelung.

Die Stabilität der Regelung wird stark durch die Hydraulik beeinflusst. Fehler bei der hydraulischen Einbindung einer Kälteanlage lassen sich durch die Regelung 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 Regelungen, 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 geregelt. Sie übernimmt die Leistungsregelung der Maschine inklusive der Sicherheitsfunktionen wie Rückmeldungen über den Betrieb der Pumpen, Strömungsüberwachung usw. Bei der Leistungsregelung 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:
Schnittstellen-
betrachtung einer
Kälteanlage aus regel-
technischer Sicht. Es
gibt drei mögliche Lö-
sungen (A, B und C),
wie die Schnittstellen
sinnvoll gelegt wer-
den können
(MSR: Messen, Steu-
ern, Regeln).

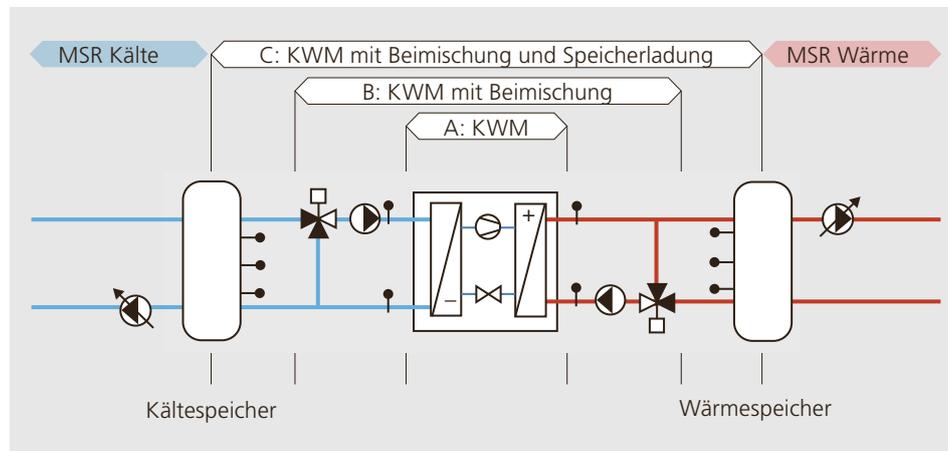
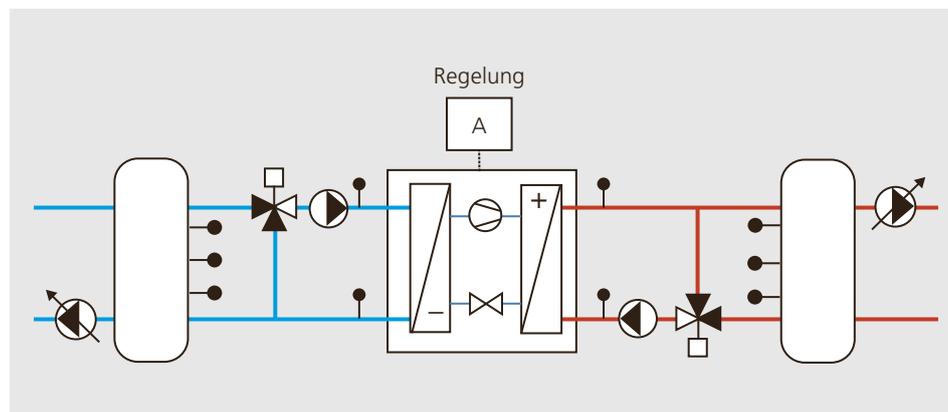


Bild 9.3:
Schnittstellen-
Lösung A: Kälte-
Wärme-Maschine.



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 Beimischungsschaltung:

- 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 Steu-

erung 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 Regelung der gesamten Kälte- und Wärmeerzeugung zuständig. Dazu gehören auch das Speichermanagement und eventuell sogar die Rückkühlung. Die Regelung des Herstellers kann somit auch die Bewirtschaftung des Speichers und der Gesamtanlage übernehmen. Insofern ist dies die ideale Schnittstellenlösung und sollte, falls möglich, gewählt werden.

Voraussetzung dafür ist, dass der Maschinenlieferant über das entsprechende Know-how in der Steuer- und Regeltechnik verfügt.

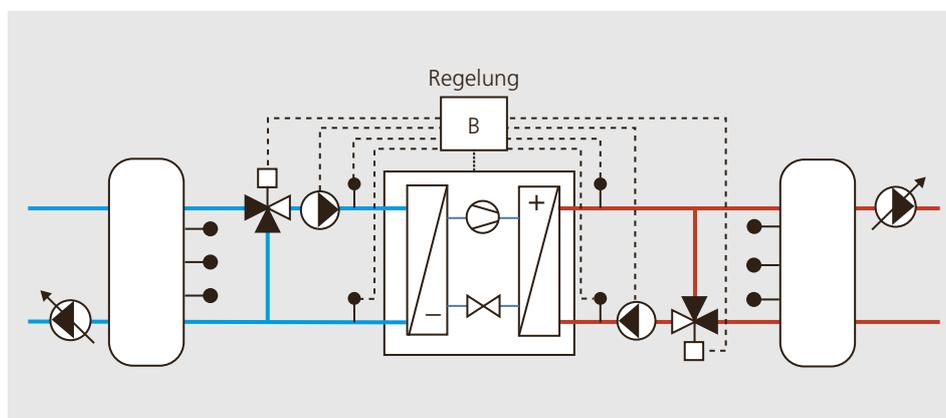


Bild 9.4:
Schnittstellen
Lösung B: Kälte-
Wärme-Maschine
mit Beimischung.

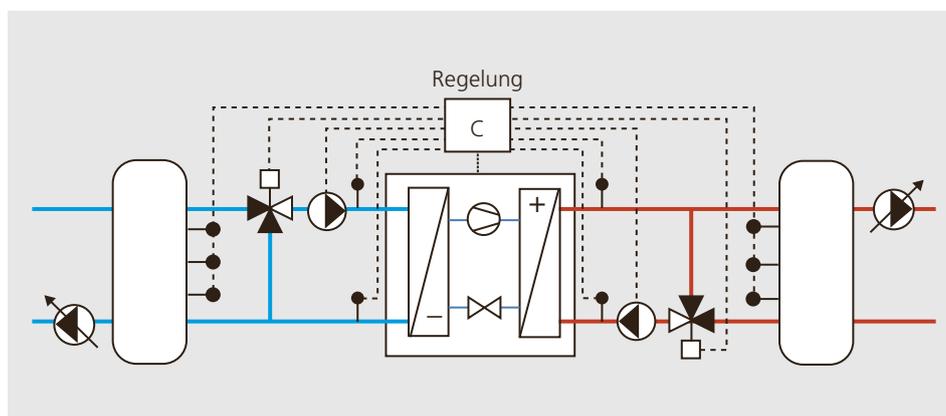


Bild 9.5:
Schnittstellen
Lösung C: Kälte-
Wärme-Maschine
bis und mit Speicher-
ladung.

9.3 Regelung der Kältemaschinenleistung

Die Leistung einer Kältemaschine kann an vier Stellen geregelt werden:

1. Regelung am 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. Regelung am Motor

Der Motor kann mit einer Drehzahlregelung ausgerüstet werden.

3. Anpassungen am 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-Regelung führen jedoch zur markanten Verschlechterung der Energieeffizienz der Anlage. Darum wird empfohlen, keine Kältemaschinen mit einer Heissgasbypass-Regelung einzusetzen.

4. Energiespeicher

Mit Energiespeicher können Leistungsspitzen der Kälteanlage gebrochen werden. Dadurch können die Kältemaschine eventuell kleiner dimensioniert, die Schaltheufigkeit reduziert und der Betrieb der Anlage stabiler gestaltet werden (siehe Kapitel 6).

Die Planerin kann nur die Dimensionierung des Energiespeichers beeinflussen. Die Art und Weise der Regelung der Kälteerzeugung ist Sache des Kältemaschinenherstellers. Der Planer aber muss bei der Bestellung und der Auswahl der Maschinen entsprechende Vorgaben machen.

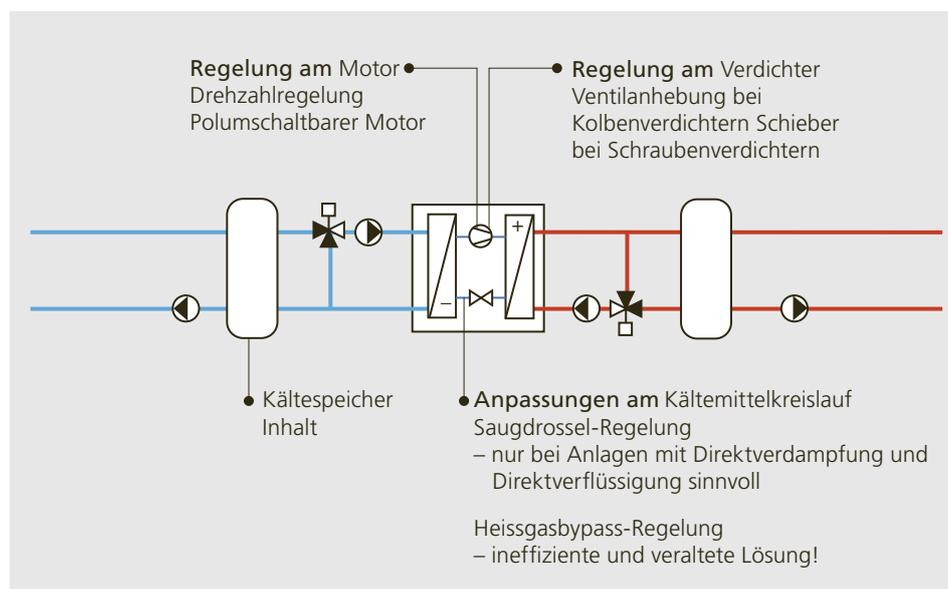


Bild 9.6:
Die vier Möglichkeiten, mit denen die Leistung der Kältemaschine geregelt werden kann.

9.4 Regelung 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 Leistungsregelung des Verdichters schneller auf Veränderungen reagieren kann, wird oft auch die Verdampfer-Eintrittstemperatur (T_{EK}) als Hilfsgrösse herangezogen.

Die Wahl der Regelungsart 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 $14^{\circ}\text{C}/8^{\circ}\text{C}$, entsprechend 1,5 K Differenz je Stufe)

Austrittstemperaturregelung (Verdampferseite)

Die Temperaturregelung am Verdampfer-Austritt wird vor allem bei Anlagen mit einer stufenlosen Leistungsregelung 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 Sollwert¹
- Reagiert empfindlich auf Temperaturschwankungen am Verdampfer-Austritt. Insbesondere bei Anlagen mit kleiner «Verdampfer-(Kälte-)Speicherkapazität»

Leistungssteuerung

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-Austritts-
temperatur-
Regelung, Verdichter
mit stufenloser
Leistungsregelung
(20%–100%).

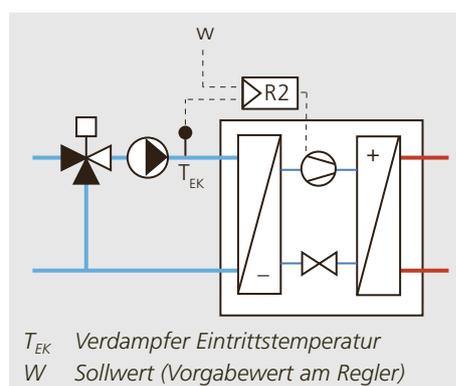
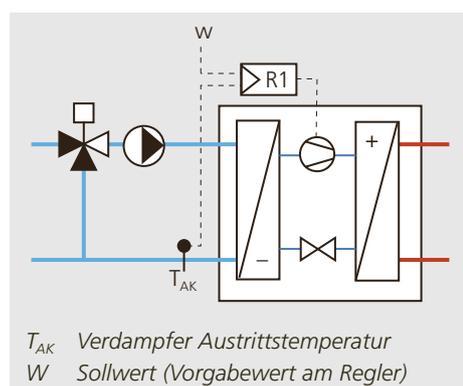


Bild 9.8:
Verdampfer-Eintritts-
temperatur-Steue-
rung.

Kombination von Ein- und Austrittstemperatur-Regelung

Wird bei Anlagen mit höheren Ansprüchen eine genauere Kaltwassertemperatur-Regelung verlangt, kann die Leistungsregelung noch mit einer Regelung zur Sollwert-Einhaltung ergänzt werden.

Die Leistungsregelung erfolgt hier in Abhängigkeit der Verdampfer-Austritts- und Verdampfer-Eintrittstemperatur. Die Kältemaschine regelt die Verdampfer-Austrittstemperatur. Das 3-Weg-Ventil regelt die Verdampfer-Eintrittstemperatur und stellt sicher, dass der Sollwert nicht überschritten wird. 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 Sollwertes 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 Regelung zur Begrenzung der Verdampfer-Eintrittstemperatur.

Hinweis zur Verdampferseite

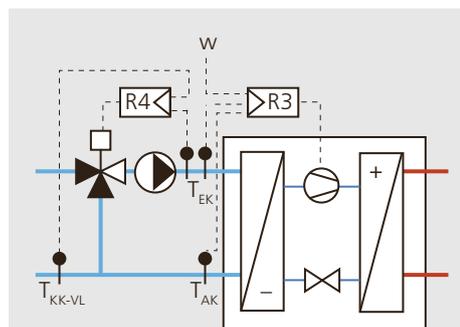
Die Beimisch-Schaltung (3-Wegventil) ist empfehlenswert beim System mit Speicher und bei Anlagen, bei denen die gewünschte Verdampfer-Austrittstemperatur zu jeder Zeit eingehalten werden muss. Dies gilt auch für das Anfahren der Kältemaschine bei hoher Netztemperatur (z. B. nach dem Wochenende). Die Installation der Beimisch-Schaltung verursacht jedoch zusätzliche Kosten.

Als etwas günstigere Alternative besteht die Möglichkeit, bei hoher Verdampfer-Eintrittstemperatur den Volumenstrom mittels einer drehzahlgeregelten Pumpe abzusenken, um damit den gleichen Effekt zu erreichen. Dabei muss die minimale Wassermenge, die vom Maschinenhersteller vorgegeben wird, eingehalten werden. 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.
- Anlagen, bei denen die Kältekreis-Rücklaufumtemperatur (stark) schwankt (z. B. grosse Verbraucher die zu- resp. abgeschaltet werden).



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 Austritts-
temperatur-
Regelung.

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).

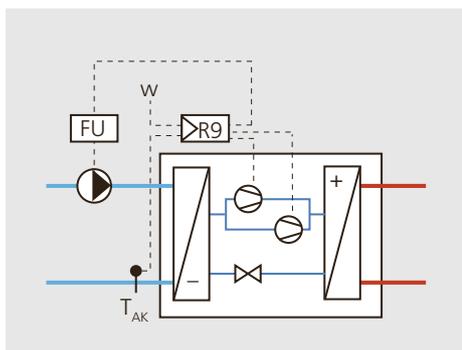
Leistungsregelung in Kombination mit variablem Volumenstrom

Bei der Anwendung einer drehzahlregelten Pumpe auf der Verdampferseite sind diverse Kombinationsvarianten möglich. Nachfolgend zwei Beispiele:

Beispiel 1: Sequenz-Regelung 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

Bild 9.10: Regelung, 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).



Reduktion der Wassermenge bis 30 %. Denn mit erheblich reduziertem Volumenstrom ändert sich der Wärmeübergang in den Plattenübertragern. Dabei können sich unkontrollierbare Betriebszustände einstellen.

Beispiel 2: Volumenstrom «Soll»: Vorgabe durch das übergeordnete System

Die übergeordnete Regelung (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 Maschinenregelung eingreift (z. B. durch eine Vorgabe der benötigten Kälteleistung). Die Maschine soll sich immer selber regeln.

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 die Planerin als auch an den Installateur höhere Anforderungen.

Diese Regelung kann zudem gut mit einer Null-Durchflussmessung auf dem Kältespeicher kombiniert werden.

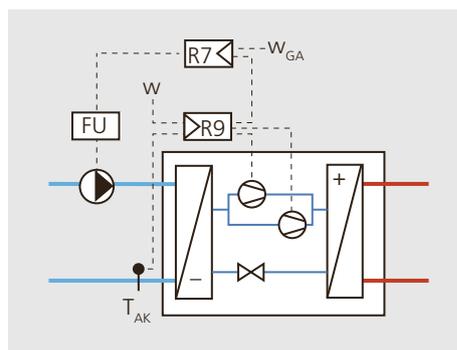


Bild 9.11: Regelung Austrittstemperatur kombiniert mit Sollvorgabe der Gebäudeautomation (R9).

9.5 Regelung des Kälteverbraucher-Kreislaufs

Eine gut durchdachte Regelung des Kälteverbraucher-Kreislaufs schafft ein angenehmes Raumklima bei minimalem Energieverbrauch und beugt Schäden durch Tauwasser vor. Dabei sind drei zentrale Aspekte zu beachten:

- Die Raumtemperatur sollte – sofern keine spezifischen Vorgaben bestehen – in einem Temperaturband zwischen 24°C und 26°C geregelt werden. Dieses Band erlaubt eine frühzeitige Freigabe der Kühlung, vermeidet abrupte Lastspitzen und reduziert die Gefahr einer Überdimensionierung der Anlage.
- Die Nutzung der Speichermasse des Gebäudes ermöglicht eine effizientere Kühlung. In der Nacht kann aktiv mit tieferen Temperaturen gearbeitet werden (z. B. 20°C), wodurch sich das Gebäude bis zum Morgen abkühlt und tagsüber mit geringerer Leistung gekühlt werden kann.
- Das Gesamtsystem muss ebenfalls optimiert werden, z. B. durch die Nutzung der anfallenden Wärme (Speicherung der Wärme in der Gebäudemasse oder die Regeneration einer Erdwärmesonde). In solchen Fällen kann die mechanische Kühlung auch Temperaturen unterhalb von 24°C ermöglichen.

Strategien zur Vorlauftemperaturregelung wassergeführter Kühlsysteme

Eine mögliche Regelstrategie für die Vorlauftemperatur bei wassergeführten Kühlsystemen, die nur kühlen, umfasst drei Bereiche. Solange die Aussentemperatur unter 12°C liegt, bleibt der Sollwert für die Kaltwassertemperatur im Vorlauf konstant bei 20°C. Steigt die Aussentemperatur auf Werte zwischen 12°C und 20°C, wird die Vorlauftemperatur bis auf 18°C abgesenkt. Bei Aussentemperaturen über 20°C gilt schliesslich ein fester Sollwert von 18°C. Diese Regelung hilft, den Energieeinsatz zu optimieren und gleichzeitig ein angenehmes Raumklima sicherzustellen (siehe Bild 9.12).

Bei wassergeführten Kühlsystemen kann beim Heizen im Winter auch eine andere Regelstrategie verfolgt werden. Die Kaltwassertemperatur wird beispielsweise so freigegeben, dass sie bis auf 8°C sinken kann, um so möglichst viel Energie für die Heizung zu gewinnen.

Eine Kondensatbildung an den Oberflächen führt zu Schäden an Bauteilen und muss unbedingt vermieden werden. Dazu ist eine Taupunktschiebung notwendig: Der Sollwert der Vorlauftemperatur (also die Temperatur des Kühlmediums) wird dabei angepasst, sodass die Kühlflächen nicht zu stark auskühlen und in der Regel 2 bis 3 K oberhalb des Taupunkts bleiben.

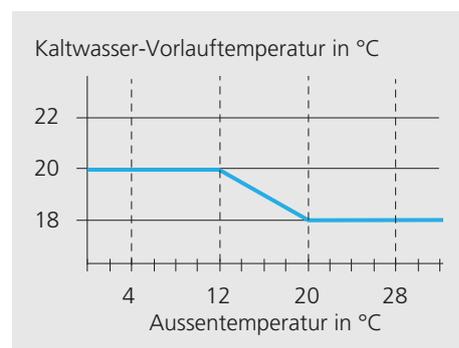


Bild 9.12:
Beispiel einer Regelstrategie bei wassergeführten Kühlsystemen.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

In der SIA 384/4 (2025) ist eine zweistufige Taupunktschiebung bei wassergeführten Kühlsystemen beschrieben.

- **Taupunktschiebung 1:** Die Kältekreislauf-Vorlauftemperatur wird anhand der Aussentemperatur vorgegeben (Hauptschiebung – hellblaue Kurve im Bild 9.13). Sobald die Luftfeuchtigkeit im Raum dem Taupunkt nahekommt, erkennt das der Taupunktregler und erhöht vorsorglich die Kältekreislauf-Vorlauftemperatur – zum Beispiel um etwa 0,5 bis 1 Kelvin (Taupunktschiebung 1 – dunkelblaue Kurve im Bild 9.13). Sinkt die Luftfeuchtigkeit wieder deutlich unter den kritischen Wert, wird die Temperatur wieder auf den ursprünglichen Sollwert zurückgesetzt (hellblaue Kurve). So bleibt die Kühlwirkung erhalten, ohne dass sich Feuchtigkeit an den Bauteilen niederschlägt (siehe Bild 9.13).

Die Taupunktschiebung 1 ist eine Schutzfunktion.

- **Taupunktschiebung 2:** Sie ist ein zusätzliches Sicherheitssystem, das die Taupunktschiebung 1 ergänzt – zum Beispiel, falls diese ausfällt. Besonders in den ersten Jahren nach der Inbetriebnahme hilft sie, Kondenswasserbildung zu vermeiden, solange die Anlage noch nicht optimal eingestellt ist. Dafür wird ein sogenannter Taupunktwärter an der Hauptleitung des Kaltwassers installiert.

Sobald dieser Feuchtigkeit (also beginnendes Kondensat) erkennt, gibt er ein Signal an den Kälteerzeuger und die Gebäudeleittechnik. Daraufhin erhöht die Steuerung die Kältekreislauf-Vorlauftemperatur auf 22 °C (dunkelblaue Kurve im Bild 9.14). Gleichzeitig öffnet die Gebäudeautomation alle Kühlventile, sodass alle Kühlkreise durchspült werden. Durch die höhere Wassertemperatur trocknen die Leitungen ab. Danach kann der normale Kühlbetrieb schneller wieder anlaufen. Wichtig ist: Die Kälteanlage bleibt dabei eingeschaltet und läuft weiter (siehe Bild 9.14).

Bild 9.13:
Beispiel wie der die Kältekreislauf-Vorlauf-temperatur bei einer Taupunktregelung 1 um 0,5 °C erhöht wird.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

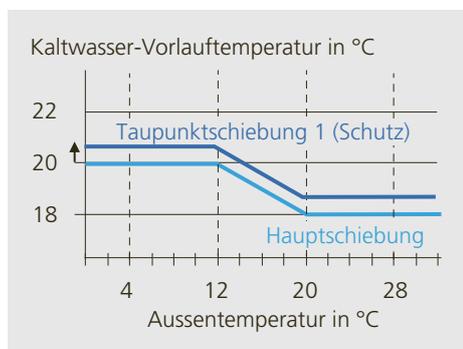
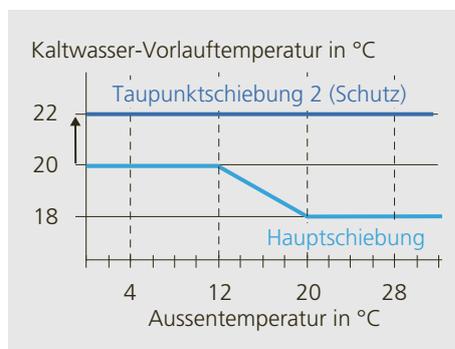


Bild 9.14:
Beispiel wie die Kältekreislauf-Vorlauf-temperatur bei einer Taupunktregelung 2 auf konstant 22 °C erhöht wird.
Quelle: SIA 384/4 (2025)



Strategien zur Vorlauftemperaturregelung luftgekühlter Kühlsysteme

Bei Luftkühlern muss der Sollwert der Vorlauftemperatur auf den tatsächlichen Kühlbedarf und der aktuellen Zulufttemperatur angepasst werden.

Dies kann beispielsweise wie folgt erfolgen: Solange die Aussentemperatur unter 20°C liegt, bleibt der Sollwert für die Kaltwassertemperatur im Vorlauf konstant bei 18°C. Steigt die Aussentemperatur auf Werte zwischen 20°C und 24°C, wird die Vorlauftemperatur schrittweise abgesenkt – bis auf 14°C. Bei Aussentemperaturen über 24°C gilt schliesslich ein fester Sollwert von 14°C (siehe Bild 9.15).

In der Praxis ist es leider nicht immer möglich, den Luftkühler auf die gewünschten 18°C auszulegen, weil oft der Platz fehlt. In diesem Fall kann der obere Wert auch ausnahmsweise bei 16°C festgelegt werden.

Bei Systemen mit Luftkühlern wird die Feuchtigkeit in den Räumen mit einem Taupunktregler gemessen. Steift die Luftfeuchtigkeit in den Räumen über den Taupunkt, signalisiert dies der Taupunktregler der Kälte-Wärme-Maschine. Im Gegensatz zu den wasserbasierenden Systemen wird bei den luftgekühlten Systemen die Kaltwassertemperatur nicht erhöht, sondern beispielsweise auf 10°C gesenkt. Dadurch wird die Zuluft in die Räume. Zudem wird – sofern die Luftfeuchtigkeit der Aussenluft dies zulässt – der Aussenluftanteil und der Luftvolumenstrom erhöht (siehe Bild 9.16).

Mit dieser Methode wird mehr und trockene Luft in die Räume geblasen und so die Entfeuchtungsdauer deutlich verkürzt. Sobald die Feuchtigkeit im Raum wieder unter den Taupunkt gesunken ist, wird der Sollwert der Kaltwassertemperatur (Vorlauf) wieder erhöht.

Bild 9.15:
Beispiel einer Regelstrategie bei luftgekühlten Kühlsystemen.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

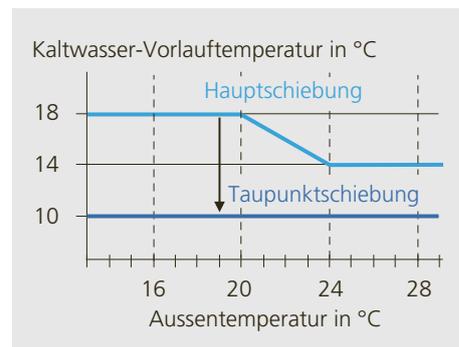
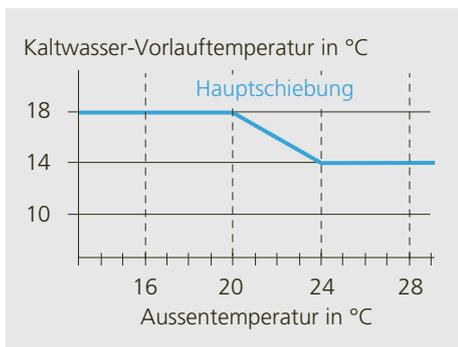


Bild 9.16:
Beispiel, wie die Kältekreislauf-Vorlauftemperatur bei einer Taupunktregelung auf konstant 10°C gesenkt wird.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

9.6 Regelung 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. In der Praxis wird eine nachträgliche Anpassung der Software nicht mehr durchgeführt.

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 9.17). Der eine Regelkreis (R5) stellt sicher, dass die Eintrittstemperatur in den Verflüssiger nicht zu tief ist (Minimalbegrenzung Verflüssiger Eintrittstemperatur). Der andere Regelkreis (R6) regelt die Austrittstemperatur aus dem Rückkühler in Abhängigkeit der Aussentemperatur und stellt so sicher, dass die Wärme effizient abgeführt wird.

Anstelle von Beimisch-Regelungen kann bei Maschinen, die nur im Sommer betrieben werden (kein Winter-Betrieb) auch mit

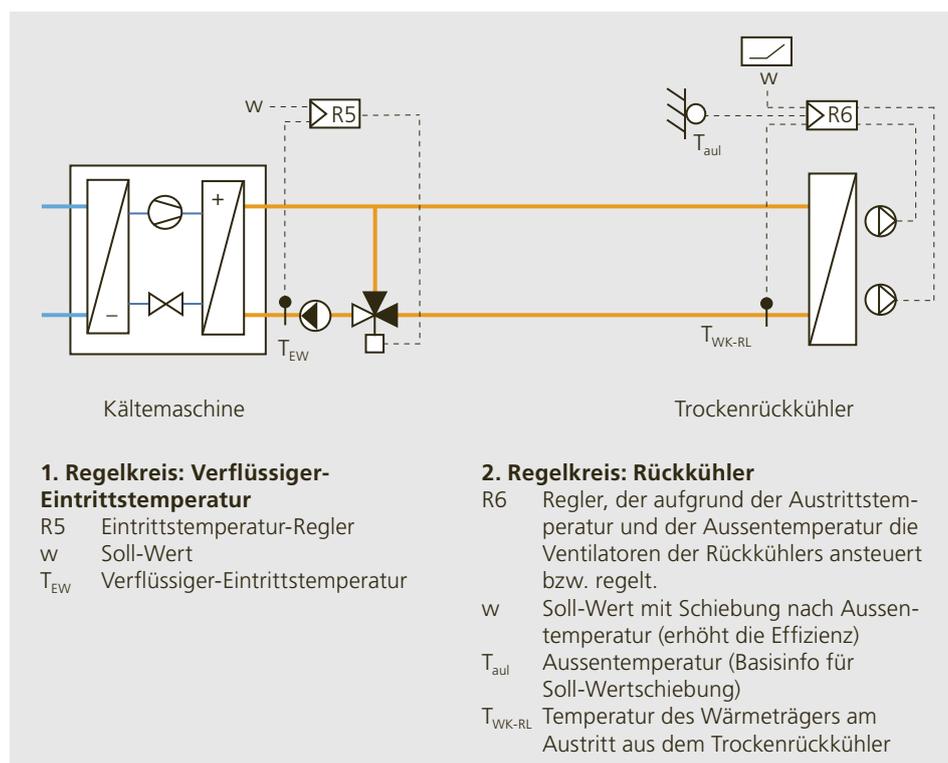


Bild 9.17: Regeltechnische Einbindung eines Trockenrückkühlers. Dabei wird der Verflüssiger der Kältemaschine mit konstantem Volumenstrom durchströmt und die Eintrittstemperatur geregelt.

variablen Volumenstrom gearbeitet werden (Option bei der Anwendung von Platten-Wärmeübertragern, Bild 9.18).

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.
- Schnelle Ventilantriebe verwenden, um Hochdruckstörungen zu vermeiden. Dabei soll Laufzeit des Ventilantriebes nicht mehr als 30 Sekunden betragen (siehe Kapitel 8.3).

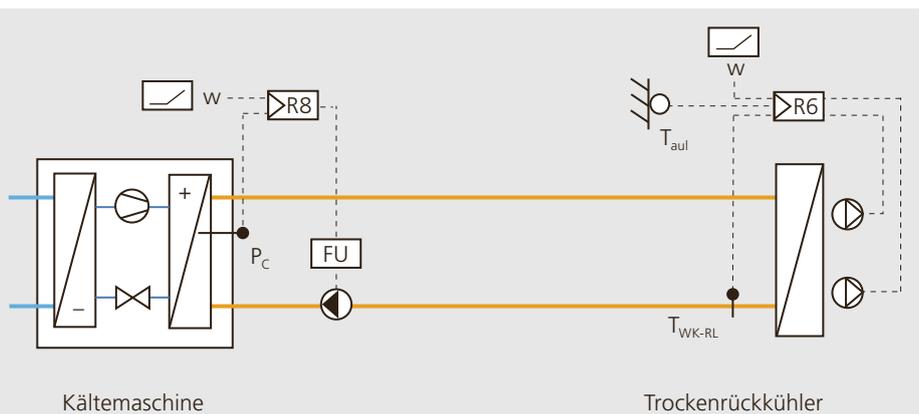


Bild 9.18:

Regelschema, bei dem der Verflüssigungsdruck (Verflüssigungstemperatur) mit variablem Volumenstrom geregelt wird. Für Kältemaschinen, die nur im Sommer betrieben werden.

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_{au} Aussentemperatur (Basisinfo für Soll-Wertschiebung)

T_{WK-RL} Temperatur des Wärmeträgers am Austritt aus dem Trockenrückkühler

9.7 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 Ausschaltvorgang einer Kältemaschine

Die Dauer des Hoch- beziehungsweise Herunterfahrens einer Kältemaschine ist vom Fabrikat und der Bauart abhängig. Beim Hochfahren liegt die Spanne in der Regel zwischen 2 und 20 Minuten. Dieser Aspekt ist für die Regelung 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 Ausschaltvorgang 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 8 «Hydraulische Systeme» beschrieben.

Es ist zu berücksichtigen, dass bei einem reduzierten Kälteleistungsbedarf der Verdichter nicht beliebig oft ein- und ausgeschaltet werden kann. Die sogenannte Wiedereinschaltsperrung 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 Sperrung 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.

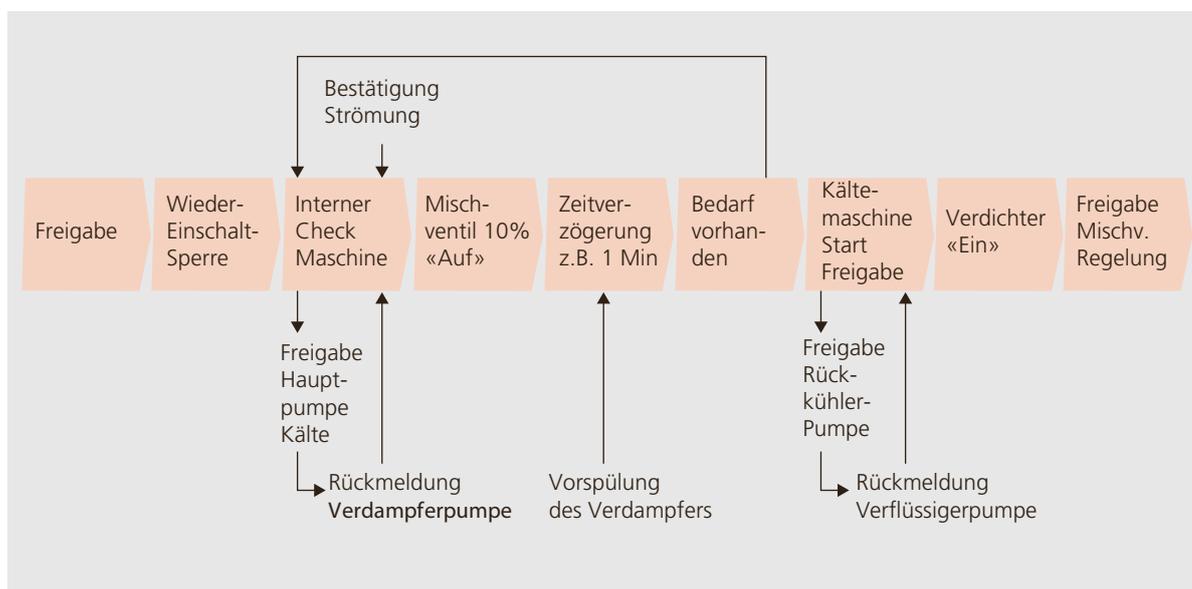


Bild 9.19:
Einschaltvorgang
einer Kältemaschine.



Bild: SSP Kälteplaner

9.8 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 9.22 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-Strömungsüberwacher¹ Bild 9.22). Die Überwachung kann auch mit einem

thermischen Durchflussmesser² oder Paddel-Wächter erfolgen. Die letzte Variante ist wegen ihrer Störanfälligkeit nicht empfehlenswert.

- Abschaltung des Verdichters über die zu tiefe Austrittstemperatur
- Überwachung des Verdampferdrucks mit einem Niederdruckpressostat

2 Ein thermischer Durchflussmesser (kalorimetrischer Durchflussmesser) misst elektronisch den Durchfluss. Dieses Messprinzip wird bei der Strömungsüberwachung und bei der Durchflussmessung angewendet.

1 PIC = Pressure Indicator + Controller = Druckanzeige und Steuerung



Bild 9.20:
Rohrbruch aufgrund
eines eingefrorenen
Verdampferkreises
(Frostschaden).



Bild 9.21:
Mit der Strömungs-
überwachung mittels
Differenzdrucküber-
wachung kann der
Durchfluss über den
Verdampfer gemes-
sen und so vor dem
Einfrieren geschützt
werden. Gleichzeitig
wird so die Druckdif-
ferenz angezeigt.

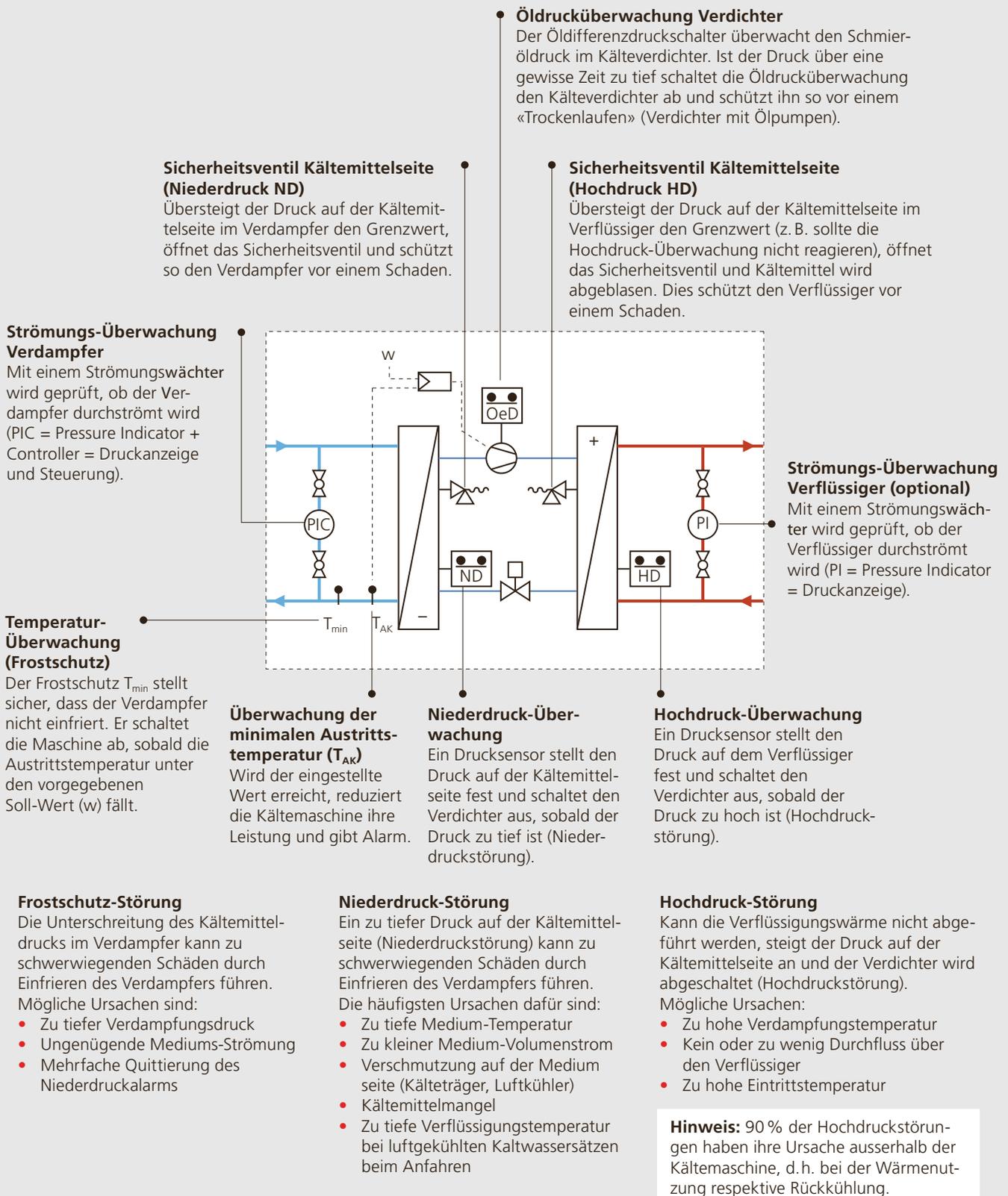


Bild 9.22: Sicherheitsrelevante Regel- und Steuergrößen bei Kältemaschinen.

Vertiefung

Regelung 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 Kältetechniker 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 Verdampfungsdrucktemperatur. Dank der genauen Elektronik kann das Einspritzventil in einem engen Bereich geregelt werden. Dadurch können die Temperaturen besser genutzt werden (weniger Reserve = energieeffizienter).

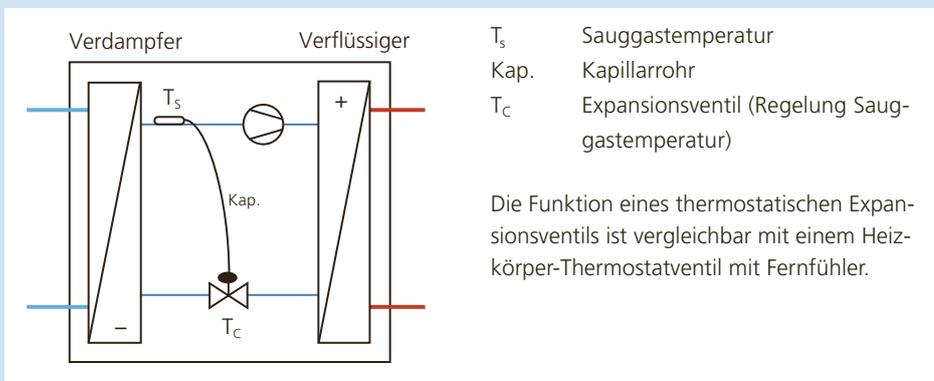


Bild 9.23:
Regelung der Sauggasüberhitzung mit einem thermostatischen Expansionsventil TEV.

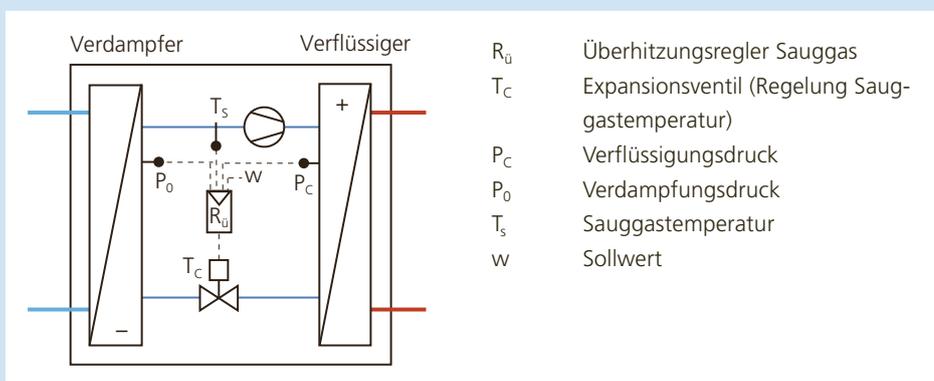


Bild 9.24:
Regelung der Sauggasüberhitzung mit einem elektronischen Expansionsventil EEV.

9.9 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 Regelung. Die Folge ist eine instabile Regelung mit schwankenden Betriebstemperaturen.

Zudem müssen Ventile verwendet werden, die schnell schliessen. Dabei soll die Laufzeit der Ventilantriebe auf der Verflüssiger- und Verdampferseite nicht mehr als 30 Sekunden betragen (siehe 8.3).

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.

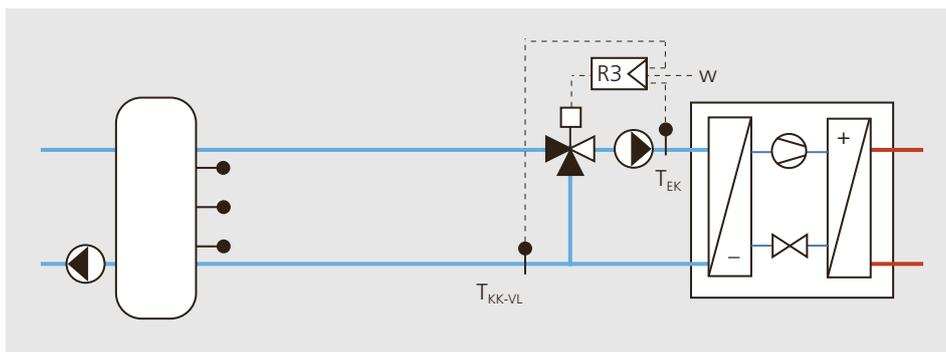
Werden Messfühler in Tauchhülsen eingebaut, müssen diese immer mit Kontaktpaste umhüllt sein. Nur so liefern sie genügend genaue Messergebnisse.

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 Regelung der Kältemaschine instabil.

Bild 9.25:
Werden die Verdampfer-Pumpe und das Regelventil nahe am Verdampfer installiert, reagiert das Regel-System schnell.



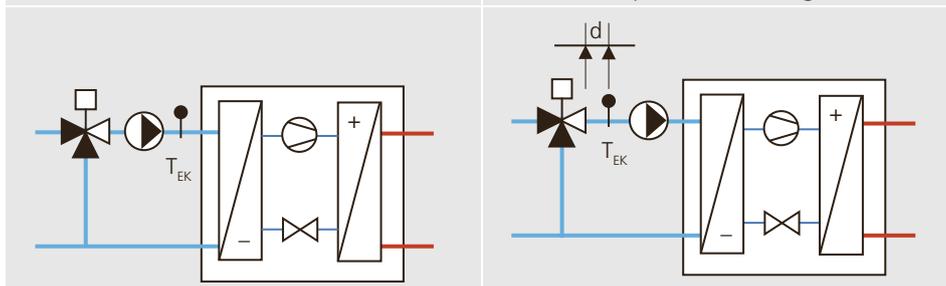
A: Nach der Pumpe

Korrekt platzierter Fühler (T_{EK}) nach der Verflüssiger-Pumpe. Hier haben sich die Wasserströme in der Regel vermischt und die Temperaturen sind «korrekt».

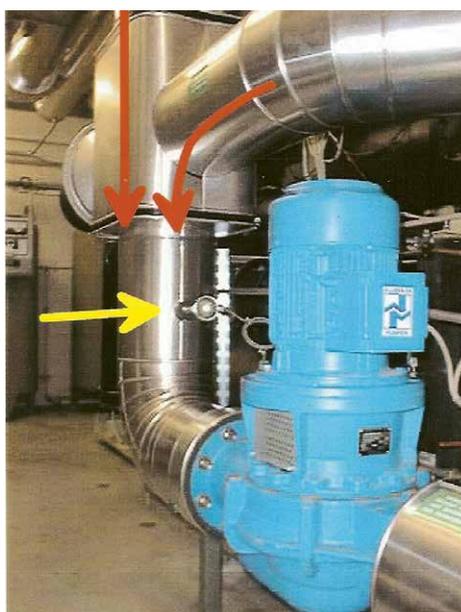
B: Nach dem Ventil

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 9.26:
Platzierung des Ventils.



Temperaturfühler bei Mischschaltungen können wie in Bild 9.26 platziert werden: 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 Regelung der Kältemaschine instabil. Siehe auch Kapitel 8 «Hydraulische Systeme».



*Bild 9.27:
Falsch platzierter
Messfühler (gelber
Pfeil) direkt nach dem
nach dem Mischventil
und vor der Pumpe.
Das Versetzen des
Fühlers nach Inbe-
triebnahme der An-
lage ist aufwendig.*

9.10 Beispiele zur Kombination von Regelungen

Aus den beschriebenen Regelkreisen wird die Gesamtregelung 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 Regelung der Kälteleistung
- R4 Regelung Maximalbegrenzung der Verdampfer-Eintrittstemperatur
- R5 Regelung Minimalbegrenzung Verflüssiger-Eintrittstemperatur
- R6 Regelung Rückkühler-Austrittstemperatur mit Sollwertschiebung in Abhängigkeit der Aussentemperatur

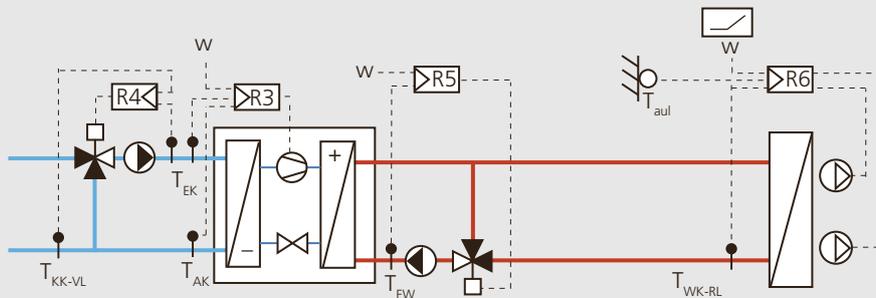


Bild 9.28: Gesamt-Regelung einer Kälteanlage mit Beimisch-Schaltungen.

Kombination Beispiel B

für Kältemaschinen, die nur im Sommer in Betrieb sind

- R6 Regelung Rückkühler-Austrittstemperatur mit Sollwertschiebung in Abhängigkeit der Aussentemperatur
- R7 Pumpendrehzahlregelung
- R8 Verflüssigungsdruck, Regelung über drehzahlgeregelte Pumpe
- R9 Sequenz-Regelung der Kältemaschinenleistung über den Volumenstrom (Vorab muss mit dem Maschinenhersteller die minimale Wassermenge geklärt werden und der Hersteller muss seine Einwilligung dazu geben.)

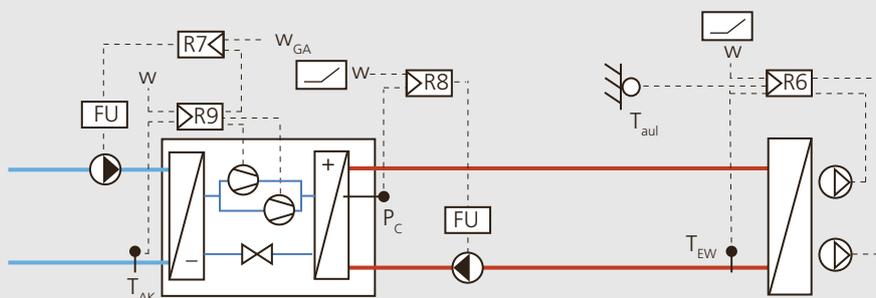


Bild 9.29: Regelung einer Kälteanlage mit variablen Volumenströmen.

9.11 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 ($COP_{\text{Kälte}}$) der Kältemaschine zu berechnen und laufend anzuzeigen.

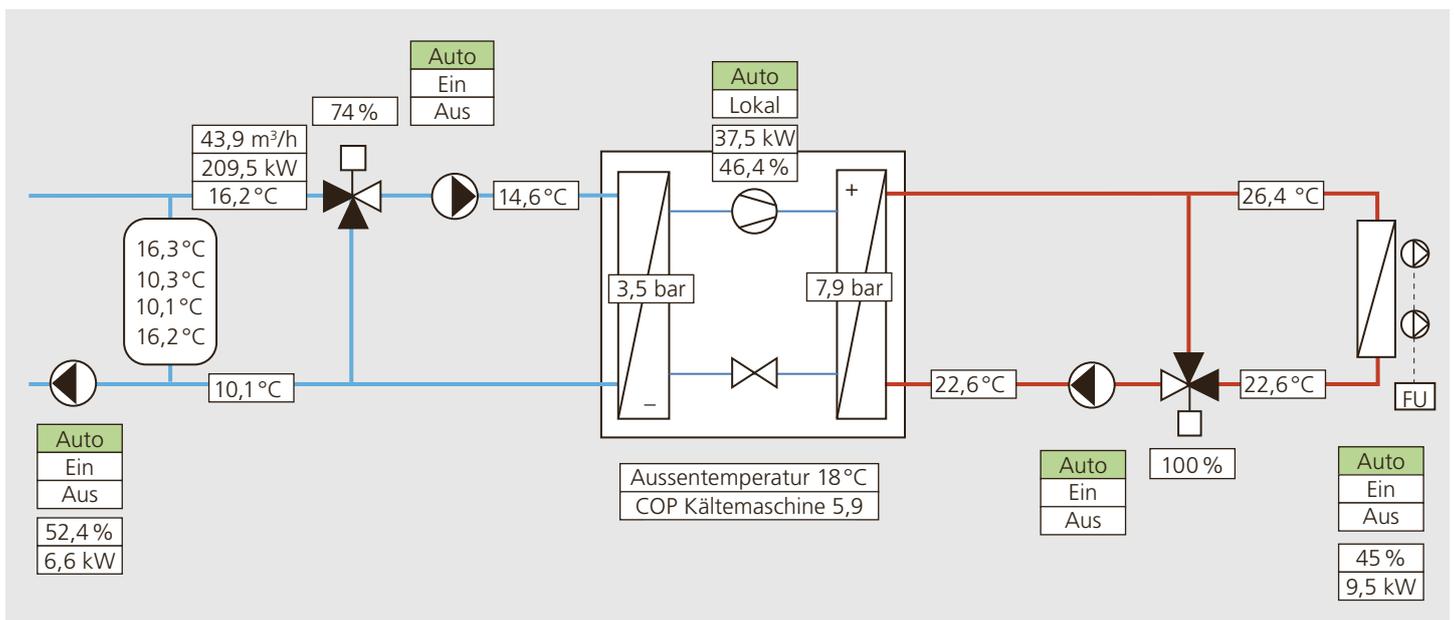
Weil die Energieeffizienz der Anlage in erster Linie von der Kältemaschinenleistung und von der Aussentemperatur abhängig ist, sollten diese Werte ebenfalls visualisiert werden, damit die aktuell angezeigte Leistungszahl besser beurteilt werden kann. Damit sind gute Voraussetzungen für eine laufende 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 9.30 zeigt eine Visualisierung einer Gebäudeautomation (GA) mit laufender Überwachung der Energieeffizienz.

Bild 9.30:
Visualisierung
Energieverbrauch
einer grösseren
Kältemaschine.



10 Merkmale 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. In der Praxis hat es sich bewährt, dass die Regelung des Gesamtsystems der Kältemaschine ein Freigabesignal liefert. Die eigentliche Maschinenregelung sollte anschliessend vom Maschinenlieferanten umgesetzt werden.
3. Regelung und Steuerung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz der gesamten Anlage.
4. Die Kältemaschine kann nur in bestimmten Temperaturbereichen eingesetzt werden. Die Regelung hat dafür zu sorgen, dass die Kältemaschine in diesem Bereich arbeitet. Wenn die Regelung den Temperaturbereich nicht einhält, kann die Kältemaschine nicht anfahren.
5. Bestandteil der Kälteerzeugung sind auch die Steuerung, Regelung, Sicherheits-einrichtungen 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-Regelungen sind:
 - Ein-Aus-Regelung (0 % und 100 %),
 - Stufenregelung (0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 %) oder
 - Regelung 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 Regelung 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.

Energieeffizienz und Teillastverhalten

Der energetisch optimale Betrieb von Klimakälteanlagen ist ein wichtiges Ziel der ingenieurtechnischen Planungsarbeit. Der Planende muss die Kennzahlen – wie beispielsweise COP, SCOP und SEER – 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 Abschnitt Wärmeabgabe in 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 arbeiten 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.

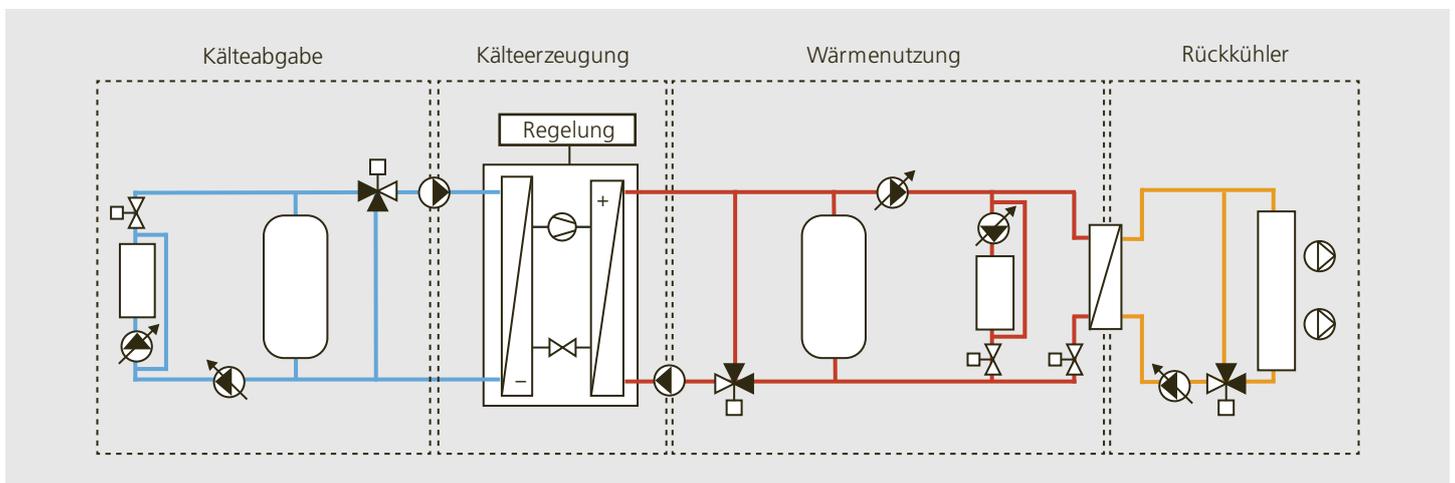
10.2 Energiebilanz einer Klimakälteanlage

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 der Kälte- oder Wärmeverteilung 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 der Kältemaschine an den jeweiligen Kälte- und Wärmeverbrauchern orientieren. Die Angabe von Leistungszahlen sollte der SIA 384/4 (2025), SN EN 14825 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. In der Regel befindet sich der Rückkühler nicht direkt bei der Kältemaschine. Er wird daher oft mit einer separaten, von der Kältemaschine unabhängigen, elektrischen Zuleitung angeschlossen. In diesem Fall muss der Stromverbrauch gesondert erfasst werden. Gleichzeitig ist zu beachten, dass nicht weitere Verbraucher an der Zuleitung angeschlossen sind, deren Verbrauch miterfasst wird. 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 ($\dot{Q}_{\text{Wärme}}$) und werden hier vernachlässigt.

Bild 10.1:
Exemplarische
Einteilung einer Kälte-
anlage in
Teilsysteme.



10.3 Energetische Beurteilung von Klimakälteanlagen

EnergieSchweiz stellt mit dem Kälte-Tool online kostenlos ein Werkzeug zur energetischen Beurteilung von Kälteanlagen zur Verfügung. Zudem gibt es noch weitere Berechnungsprogramme (www.effizientekaelte.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 Norm SIA 384/4 (2025) 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 im untersuchten Betriebspunkt.

Der COP bei einer Wärmepumpe ($COP_{\text{Wärme}}$) ist das Verhältnis zwischen der Heizleistung und der eingesetzten elektrischen Leistung in einem Betriebspunkt, der angegeben werden muss.

Energy Efficiency Ratio (EER)

In der Praxis trifft man sowohl die Bezeichnung EER (Energy Efficiency Ratio), wie auch den $COP_{\text{Kälte}}$ 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 $\varepsilon_{\text{C Kälte}}$ (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

$COP_{\text{Kälte}}$ (Coefficient of Performance) oder EER (Energy Efficiency Ratio) bezeichnet:

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

Gleichung 10-1

mit

$\dot{Q}_{\text{Kälte}}$ Kälteleistung in kW
 P_{el} effektive elektrische Anschlussleistung (Klemmenleistung) in kW¹

Als Grenzwert des $COP_{\text{Kälte}}$ kann die Carnot-Leistungszahl $\varepsilon_{\text{C Kälte}}$ betrachtet werden. Sie stellt das Potenzial des $COP_{\text{Kälte}}$ unter idealen Bedingungen dar (unerreichbar). Wie dicht die Realität am Idealzustand liegt, kann über das Verhältnis von $COP_{\text{Kälte}}$ und $\varepsilon_{\text{C Kälte}}$ ausgedrückt werden. Dieses Verhältnis wird als Carnot-Gütegrad η_{c} bezeichnet:

$$\eta_{\text{c}} = \frac{COP_{\text{Kälte}}}{\varepsilon_{\text{C Kälte}}}$$

Gleichung 10-2

Der $COP_{\text{Kälte}}$ 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 definiert. Die nachzuweisenden Punkte entsprechen in der Regel nicht den Auslegungspunkten der Kälteanlage.

Eine genauere Voraussage des Energiebedarfs 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).

¹ Der Klarheit halber wird hier auf die Leistung der Umwälzpumpen verzichtet, die anteilmässig noch einzurechnen sind. Wird die Pumpenleistung mit eingerechnet – so wie es die Norm SN EN 14511 vorsieht – sinkt der $COP_{\text{Kälte}}$ um 5 % bis 10 %.

Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER)

Die SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) beschreibt die Kühleffizienz einer Kältemaschine (Flüssigkeitskühler) für Komfortkühlungsanwendung übers Jahr in drei Klimazonen: Helsinki, Strassburg und Athen. Dabei wird die Effizienz der Kältemaschine bei vier Aussentemperaturen (D = 20°C, C = 25°C, B = 30°C und A = 35°C) ermittelt und die Performance-Werte entsprechend den Laufzeiten gewichtet. Mit diesem Berechnungsverfahren sollen die Betriebsbedingungen praxisnah abgebildet werden.

Die SEER wird am Punkt A für folgende zwei Anwendungen mit unterschiedlichen Innenwärmeübertragern von den Herstellern berechnet und publiziert:

- SEER-Niedertemperatur 12/7°C für Gebläsekonvektoren
- SEER-Mitteltemperatur 23/18°C für Kühldeckenanwendungen

Die SEER-Werte bei 23/18°C liegen aufgrund der höheren Temperaturen deutlich über denjenigen bei 12/7°C. Es ist daher wichtig, beide Kennzahlen klar zu unterscheiden und jeweils die passende – in der Regel die SEER 12/7°C – anzuwenden.

Die Ermittlung der SEER-Werte ist in der Norm SN EN 14825 (2019) beschrieben.

Die SEER 12/7°C ist massgebend

Die SIA 384/4 (2025) bezieht sich auf die SEER 12/7°C.

Seasonal Energy Performance Ratio (SEPR)

Bei Prozesskühlungsanwendungen wird von einem kontinuierlichen industriellen Kühlbedarf ausgegangen, der im Sommer durch die zusätzlichen Anforderungen der Klimatisierung überlagert wird. Die entsprechende Energieeffizienz-Kennzahl ist die SEPR.

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 $COP_{\text{Kälte}}$ 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.

$COP_{\text{Kälte}}$	3,3
SEER	7,4
ESEER	8,2

In der Praxis zeigt sich, dass die SEER die effektiven Betriebsbedingungen am besten abbildet. Darum wird sie in der SIA 384/4 (2025) als Beurteilungskriterium der Energieeffizienz des Kälteerzeugers genutzt.

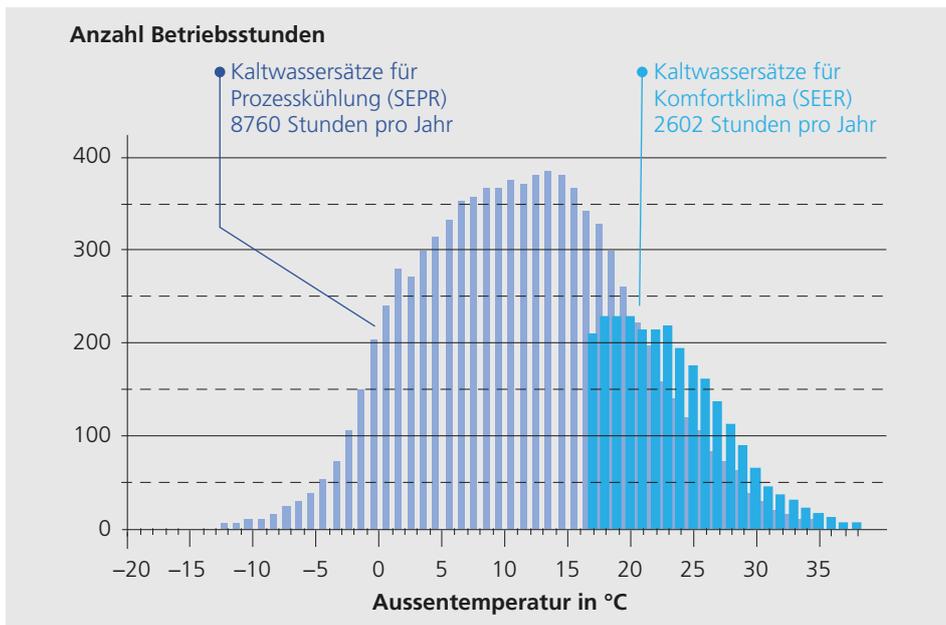


Bild 10.2: Anzahl Betriebsstunden und Aussentemperaturen in Strassburg über das Jahr für Prozesskühler (SEPR) und Komfortklimaanlagen (SEER). Für Komfortklimaanlagen liegt der relevante Temperaturbereich zwischen 17 °C und 39 °C. Dieser Bereich kommt allerdings nur während etwa 2600 Stunden im Jahr vor – das sind rund 30 % der Jahresstunden. Das bedeutet, dass die Kältemaschine für Komfortanwendungen die meiste Zeit ausgeschaltet ist.

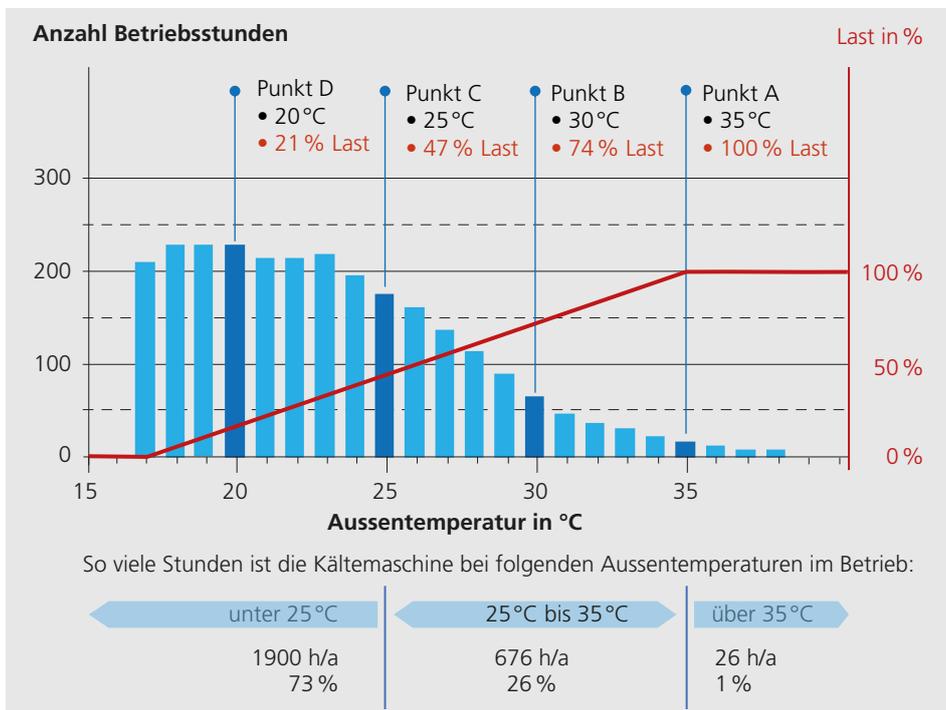


Bild 10.3: Verlauf der Kühlleistung einer Komfortklimakälteanlage bei verschiedenen Aussentemperaturen an der Referenzklimastation Strassburg. Bei 35 °C (Punkt A) arbeitet das Gerät mit voller Leistung (100 %). Mit sinkender Aussentemperatur nimmt die Leistung linear ab, bis sie bei 17 °C auf 0 % fällt. Da die meisten Betriebsstunden (blaue Balken) im Teillastbereich liegen, beeinflussen diese Werte die SEER deutlich stärker als der Volllastpunkt (A). So liegen 73 % Betriebsstunden (1'900 Stunden im Jahr) unterhalb des Punkts C. In diesem Bereich benötigt die Anlage eine Kälteleistung die weniger als 47 % der Volllast. Der Teillastbetrieb in diesem Bereich hat somit einen sehr grossen Einfluss auf die Jahresbewertung.

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:

$$\text{ETV}_{\text{Rückkühlung (Ventilatoren)}} = \frac{\dot{Q}_{\text{RK}}}{P_{\text{Ventilatoren}}}$$

$$\text{ETV}_{\text{Rückkühlung (Pumpen)}} = \frac{\dot{Q}_{\text{RK}}}{P_{\text{Pumpen}}}$$

\dot{Q}_{RK} thermische Rückkühlleistung in kW

$P_{\text{Ventilatoren}}$ elektrische Anschlussleistung
(Klemmenleistung) in kW.

P_{Pumpen} elektrische Anschlussleistung
(Klemmenleistung) in kW

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 «abgerechnet». 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 den Normen SIA 382/1 (2025) und SIA 180 vorgegeben.

Teillastverhalten von Kältemaschinen

Der Begriff der Teillast einer Kältemaschine ist für Anwendungen in der Klimakälte genauer zu definieren. Die notwendige Nutzttemperatur ist immer konstant. Teillast für eine Kältemaschine bedeutet also, dass weniger Kälteleistung angefordert wird, die Kälte-träger-Temperatur aber konstant bleiben muss. Die Kältemaschine kann über eine Massenstromregelung für das Kältemittel bei ansonsten konstanten Prozessparametern darauf reagieren (vgl. z. B. Zylinderabschaltung, Drehzahlregelung 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 Drehzahlregelung eingesetzt. Bei der Planung ist daher dringend vom Hersteller ein Verlauf über das Teillastverhalten der Verdichter im benötigten Leistungsbereich anzufordern.

Einfluss des Verdichtertyps auf die Teillastperformance

Die Kälteleistung einer allgemeinen Kältemaschine wird hauptsächlich über die Veränderung des Kältemittelmassenstroms eingeregelt, 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 der SEER 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 L eingehend präzisiert.

Die «richtige» Verdichterwahl

Üblicherweise definiert der Planer die Randbedingungen für die Anlage. Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der verfügbaren Verdichter entscheidet der Maschinenhersteller, welche Verdichterart am besten geeignet ist.

Die ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften hat im Auftrag von EnergieSchweiz verschiedene Verdichterbauarten untersucht. Die daraus resultierende Studie «Kälteverdichter: Schlüssel zu Energieeffizienz und Betriebssicherheit» ermöglicht es Fachleuten, Verdichterbauarten hinsichtlich ihres energetischen Verhaltens zu bewerten. Mit dem eigens entwickelten Verdichter-Tool können sie zudem mit wenigen Eingaben die einsetzbaren Verdichter und deren Effizienz (COP) ermitteln. So lässt sich der Einfluss der Verdichterbauart auf das Anlagenkonzept abschätzen.

Link zur Studie

<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10836>

Link zum Verdichter-Tool

<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10877>

10.5 Anforderungen an die Effizienz des Kälteerzeugers

Die SIA 384/4 (2025) verlangt, dass die minimale Effizienz eines Kälteerzeugers durch die SEER definiert wird. In Klimakälteanlagen mit mehreren Kälteerzeugern ist die $SEER_{Grenzwert}$ für jede einzelne Maschine separat zu berechnen. Massgebend ist dabei die maximale Kälteleistung des jeweiligen Kälteerzeugers am Auslegungspunkt. Diese Leistung bestimmt die zugehörige $SEER_{Grenzwert}$. Das gilt für jede Kältemaschine innerhalb der gesamten Anlage – auch dann, wenn sich die Leistungen der einzelnen Kälteerzeuger unterscheiden. Bei redundanten Kälteerzeugern muss jede Maschine einzeln betrachtet werden, unabhängig von ihrer tatsächlichen Kühllast oder ihrer Funktion innerhalb der Anlage. Eine Ausnahme bilden reine Backup-Systeme, die ausschliesslich im Notfall – etwa bei einem Ausfall der regulären Kälteerzeugung – in Betrieb genommen werden. Die einzuhaltende $SEER_{Min}$ wird aus der $SEER_{Grenzwert}$ und der $SEER_{Anlage}$ bestimmt. Der grössere der beiden Werte bestimmt den massgeblichen Wert für die $SEER_{Min}$, die der geplante und installierte Kälteerzeuger im Minimum erfüllen muss.

Massgebender SEER-Grenzwert

Die $SEER_{Grenzwert}$ für die verschiedenen Kälteerzeugerleistungen von luft- und wassergekühlten Kälteerzeugern wird in der Energieeffizienzverordnung (EnEV) vorgegeben und ist in Bild 10.4 dargestellt. Die massgebende Kälteerzeugerleistung wird bei 100 % Last betrachtet.

Kälteerzeugerleistung in kW (bei 100 % Last)	< 100	100 bis < 250	250 bis < 400	400 bis < 1500	≥ 1500
luftgekühlte Maschinen	4,10	4,10	4,10	4,55	4,55
wassergekühlte Maschinen	5,08	5,08	5,08	6,38	6,88

Berechnung der SEER-Anlage

Mit der $SEER_{Anlage}$ werden die objektspezifischen Anforderungen an die Kälteanlage berücksichtigt. Dazu werden der Standort, das Kältemittel, die Kältemittel-Füllmenge und die Betriebsart berücksichtigt. Die $SEER_{Anlage}$ berechnet sich wie folgt:

$$SEER_{Anlage} = SEER_{Basis} \cdot (1 + f_{Ort} + f_{KM} + f_{Vol} + f_{Mod})$$

- $SEER_{Anlage}$ anlagespezifischer SEER-Wert
- $SEER_{Basis}$ Basis-SEER (siehe Bild 10.5)
- f_{Ort} Korrekturfaktor für den Standort (siehe Bild 10.6)
- f_{KM} Korrekturfaktor für das Kältemittel (siehe Bild 10.7)
- f_{Vol} Korrekturfaktor für die Kältemittel-Füllmenge (siehe Bild 10.8)
- f_{Mod} Korrekturfaktor für die Betriebsart (siehe Bild 10.9)

Im Folgenden werden die Berechnung der $SEER_{Basis}$ und die dazu notwendigen Faktoren erläutert.

Bild 10.4: $SEER_{Grenzwert}$ für luftgekühlte und wassergekühlte Kälteerzeuger. Quelle: SIA 384/4 (2025)

Basis-SEER (SEER_{Basis})

Die Basis-SEER ist strenger als die SEER-Grenzwert und wurde anhand einer umfassenden Marktanalyse für die SIA 384/4 (2025) festgelegt. Die massgebende Kälteerzeugerleistung wird auch hier bei 100 % Last betrachtet. Dem Bild 10.5 können die entsprechenden Werte entnommen werden.

Korrekturfaktor für den Standort**(f_{Ort})**

Der Faktor «Standort» soll die Temperaturverhältnisse der unterschiedlichen Klimaregionen in der Schweiz berücksichtigen. Kältemaschinen, die an kühlen Standorten aufgestellt sind, werden häufiger an effizienteren Betriebspunkten betrieben und haben weniger Einsatzstunden, respektive eine geringere Kühllast pro Jahr. Deshalb haben Kältemaschinen in kühleren Regionen einen geringeren Strombedarf als in wärmeren Regionen.

Der Korrekturfaktor für den Standort kann dem Bild 10.6 entnommen werden.

Bild 10.5:

SEER_{Basis} für luftgekühlte und wassergekühlte Kälteerzeuger.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

Kälteerzeugerleistung in kW (bei 100 % Last)	< 100	100 bis < 250	250 bis < 400	400 bis < 1500	≥ 1500
luftgekühlte Maschinen	4,20	4,40	4,60	4,80	4,80
wassergekühlte Maschinen	5,40	5,40	5,60	7,20	8,10

Bild 10.6:

Korrekturfaktor f_{Ort} für verschiedene Klimastationen in der Schweiz.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

Klimastation	f_{Ort}	Klimastation	f_{Ort}	Klimastation	f_{Ort}
Adelboden	-0,04	Grand-St-Bernhard	-0,05	Samedan	-0,05
Altdorf	-0,02	Güttingen	-0,03	San Bernardino	-0,05
Basel-Binningen	-0,02	La Chaux-de-Fonds	-0,04	Schaffhausen	-0,02
Bern-Liebefeld	-0,02	Locarno-Monti	0,00	Scuol	-0,04
Buchs-Aarau	-0,02	Lugano	0,00	Sion	-0,01
Chur	-0,02	Luzern	-0,02	St. Gallen	-0,03
Davos	-0,04	Magadino	0,00	Vaduz	-0,02
Disentis	-0,04	Montana	-0,04	Wynau	-0,02
Engelberg	-0,04	Neuchâtel	-0,02	Zermatt	-0,04
Genève-Cointrin	-0,01	Payerne	-0,02	Zürich SMA	-0,03
Glarus	-0,03	Robbia	-0,04		

Korrekturfaktor für das Kältemittel

(f_{KM})

Mit dem Korrekturfaktor Kältemittel (f_{KM}) sollen Anlagen, die mit umweltschonenden, natürlichen Kältemitteln betrieben werden, gefördert werden. Deshalb werden solche Kältemaschinen mit einem Bonus unterstützt.

Der Korrekturfaktor für das Kältemittel kann dem Bild 10.7 entnommen werden.

Korrekturfaktor für die Kältemittel-Füllmenge (f_{Vol})

Mit dem Korrekturfaktor Kältemittel-Füllmenge (f_{Vol}) werden die Anforderungen an Anlagen mit grossen Kältemittel-Füllmengen erhöht. Dies betrifft nur Anlagen mit synthetischen Kältemitteln. Eine Kältemaschine mit einem überfluteten Verdampfer benötigen deutlich mehr Kältemittel, kann jedoch unter Prüfbedingungen gemäss SEER eine deutlich bessere Effizienz erreichen.

Der Korrekturfaktor für die Kältemittel-Füllmenge kann dem Bild 10.8 entnommen werden.

Art des Kältemittels	Kälteerzeuger	Kälteerzeugerleistung in kW bei 100 % Last	f_{KM}
Synthetisch	luft- und wassergekühlt	gesamter Leistungsbereich	0,00
Natürlich	luftgekühlt	gesamter Leistungsbereich	-0,03
Natürlich	wassergekühlt	bis 400 kW	-0,05
Natürlich	wassergekühlt	über 400 kW	-0,10

Bild 10.7:
Korrekturfaktor f_{KM}
für verschiedene Kälteerzeuger und Leistungsbereiche.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

Art des Kältemittels	Luft-Wasser Maschine, reversibel	Kältemittel-Füllmenge	f_{Vol}
Natürlich			0,00
Synthetisch	nein	< 0,4 kg/kW	0,00
Synthetisch	nein	> 0,4 kg/kW	0,03
Synthetisch	ja	< 0,6 kg/kW	0,00
Synthetisch	ja	> 0,6 kg/kW	0,03

Bild 10.8:
Korrekturfaktor f_{Vol}
für verschiedene Kältemittel-Füllmengen.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

Korrekturfaktor für die Betriebsart (f_{Mod})

In der SIA 384/4 (2025) werden anhand der Betriebsart drei Maschinentypen unterschieden.

1. **Kältemaschine:** Kältemaschinen können «nur» kühlen. Die Prüfbedingungen der SEER ist auf diese Anwendung ausgerichtet.
2. **Reversible Kältemaschine:** Eine reversible Kältemaschine kann kühlen und heizen, aber nicht gleichzeitig. Diese Doppelnutzung vergrößert den Einsatzbereich der Kältemaschine und hat einen Einfluss auf die eingesetzten Komponenten. In den Prüfbedingungen gemäss SEER wird jedoch lediglich die Effizienz im Kältebetrieb überprüft. Eine reversible Kältemaschine kann aufgrund der beiden Betriebsmodi weniger stark optimiert werden und hat im reinen Kältebetrieb deshalb eine schlechtere Effizienz. Deshalb werden diese Systeme durch einen Bonusfaktor unterstützt.
3. **Kälte-Wärme-Maschine:** Kälte-Wärme-Maschinen können gleichzeitig heizen und kühlen. Bei der Wärmenutzung unterscheidet man zwischen Anwendungen ohne und mit zusätzlichem Energieaufwand.
 - Bei Anwendungen ohne zusätzlichen Energieaufwand wird die Abwärme des Heissgases direkt zum Heizen genutzt. Das beeinflusst die SEER nicht und bringt keinen Bonus. Bei dieser Art der Wärmenutzung ist daher keine Korrektur erforderlich ($f_{Mod} = 0,00$).
 - Bei Anwendungen mit zusätzlichem Energieaufwand (beispielsweise bei Temperaturen über 50 °C) wird mittels Hochhaltung die Verflüssigungstemperatur angehoben und gleichzeitig Wärme und Kälte erzeugt. In

der Praxis bedeutet diese Doppelnutzung, dass eine deutlich grössere Druckdifferenz überwunden werden muss. Deshalb müssen andere Verdichtertypen eingesetzt werden. Im reinen Kühlbetrieb, wie die Anlagen unter SEER-Prüfbedingungen getestet werden, führt dies zu einer Reduktion der Effizienz. Deshalb werden diese Systeme mit einen Bonus ($f_{Mod} = -0,08$) unterstützt.

In der SIA 384/4 (2025) werden Anlagen, die unterschiedliche Betriebsarten wahrnehmen können, mit dem Korrekturfaktor Betriebsart (f_{Mod}) unterstützt. Der Korrekturfaktor für die Betriebsart kann dem Bild 10.9 entnommen werden.

Bild 10.9:
Korrekturfaktor f_{Mod}
für verschiedene
Betriebsarten.
Quelle: SIA 384/4
(2025)

Betriebsart	Maschinen-Typen	f_{Mod}
Nur kühlen	Kältemaschine	0,00
Reversibel (nicht gleichzeitig kühlen und heizen)	Reversible Maschine	-0,02
Wärmenutzung (gleichzeitig kühlen und heizen)	Kälte-Wärme-Maschine	-0,08
(Beachte: Einschränkung bei reiner Heissgasnutzung – siehe oben)		

Bestimmung der massgebenden

SEER_{Min}

Gemäss der SIA 384/4 (2025) muss der Kälteerzeuger mindestens die SEER_{Min} erreichen. Die SEER_{Min} entspricht dem grösseren der beiden SEER-Werte (SEER_{Grenzwert} und SEER_{Anlage}).

In der SIA 384/4 (2025) ist zudem eine Ausnahme definiert. Sie betrifft

- reversible Maschinen,
- die natürliche Kältemittel verwenden,
- hauptsächlich der Wärmeerzeugung dienen (die erforderliche Wärmeenergie ist deutlich grösser als die erforderliche Kälteenergie)
- und die die Effizianzorderungen an Wärmepumpen erfüllen.

Im Kühlbetrieb muss die Maschine in diesem Fall lediglich die SEER_{Anlage} erfüllen, auch wenn die SEER_{Grenzwert} strengere Anforderungen verlangen würde.

Folgende Beispiele zeigen, wie die SEER_{Min} ermittelt wird.

Beispiel 1

Sie möchten eine luftgekühlte Kältemaschine mit 420 kW Kälteleistung in Luzern bauen. Die Maschine nutzt R1234ze als Kältemittel. Die Wärme wird direkt über den Rückkühler an die Umgebung abgegeben.

Anlagentyp / Parameter	Wert / Beschreibung	SEER / Faktor	Quelle
Luftgekühlte Kältemaschine	Kälteleistung 420 kW	SEER _{Basis} = 4,80	Bild 10.5
Standort	Luzern	f _{Ort} = -0,02	Bild 10.6
Kältemittel	R1234ze	f _{KM} = 0,00	Bild 10.7
Kältemittel-Füllmenge	185 kg (bzw. 0,44 kg/kW)	f _{Vol} = 0,03	Bild 10.8
Betriebsart	nur kühlen	f _{Mod} = 0,00	Bild 10.9

Berechnung

$$SEER_{Anlage} = SEER_{Basis} \cdot (1 + f_{Ort} + f_{KM} + f_{Vol} + f_{Mod})$$

$$SEER_{Anlage} = 4,80 \cdot (1 - 0,02 + 0,00 + 0,03 + 0,00)$$

$$SEER_{Anlage} = 4,80 \cdot 1,01 = 4,85$$

$$SEER_{Anlage} = 4,85$$

$$SEER_{Grenzwert} = 4,55 \text{ (siehe Bild 10.4)}$$

SEER_{Min} entspricht dem grösseren der beiden Werte, das heisst die Kältemaschine für die Anlage in Luzern muss somit eine SEER_{Min} von mindestens 4,85 aufweisen.

Beispiel 2

Sie möchten dieselbe Kältemaschine wie im Beispiel 1 bauen. Diesmal soll sie jedoch mit R290 (Propan) statt R1234ze als Kältemittel betrieben werden.

Anlagentyp / Parameter	Wert / Beschreibung	SEER / Faktor	Quelle
Luftgekühlte Kältemaschine	Kälteleistung 420 kW	SEER _{Basis} = 4,80	Bild 10.5
Standort	Luzern	f _{Ort} = -0,02	Bild 10.6
Kältemittel	R290 (Propan)	f _{KM} = -0,03	Bild 10.7
Kältemittel-Füllmenge	–	f _{Vol} = 0,00	Bild 10.8
Betriebsart	nur kühlen	f _{Mod} = 0,00	Bild 10.9

Berechnung

$$SEER_{Anlage} = SEER_{Basis} \cdot (1 + f_{Ort} + f_{KM} + f_{Vol} + f_{Mod})$$

$$SEER_{Anlage} = 4,80 \cdot (1 - 0,02 - 0,03 + 0,00 + 0,00)$$

$$SEER_{Anlage} = 4,80 \cdot 0,95 = 4,56$$

$$SEER_{Anlage} = 4,56$$

$$SEER_{Grenzwert} = 4,55 \text{ (siehe Bild 10.4)}$$

SEER_{Min} entspricht dem grösseren der beiden Werte, das heisst die Kältemaschine mit dem natürlichen Kältemittel muss somit eine SEER_{Min} von mindestens 4,56 aufweisen.

Beispiel 3

Sie möchten eine wassergekühlte Kälte-Wärme-Maschine mit 300 kW Kälteleistung in St. Gallen bauen. Die Maschine nutzt R290 (Propan) als Kältemittel. Die Wärme wird für die Gebäudeheizung und die Warmwassererzeugung genutzt und die Verflüssigungstemperatur muss dazu angehoben werden.

Anlagentyp / Parameter	Wert / Beschreibung	SEER / Faktor	Quelle
Wassergekühlte Kältemaschine	Kälteleistung 300 kW	SEER _{Basis} = 5,60	Bild 10.5
Standort	St. Gallen	f _{Ort} = -0,03	Bild 10.6
Kältemittel	R290 (Propan)	f _{KM} = 0,00	Bild 10.7
Kältemittel-Füllmenge	–	f _{Vol} = 0,00	Bild 10.8
Betriebsart	Wärmenutzung	f _{Mod} = -0,08	Bild 10.9

Berechnung

$$SEER_{Anlage} = SEER_{Basis} \cdot (1 + f_{Ort} + f_{KM} + f_{Vol} + f_{Mod})$$

$$SEER_{Anlage} = 5,60 \cdot (1 - 0,03 + 0,00 + 0,00 - 0,08)$$

$$SEER_{Anlage} = 5,60 \cdot 0,89 = 4,98$$

$$SEER_{Anlage} = 4,98$$

$$SEER_{Grenzwert} = 5,08 \text{ (siehe Bild 10.4)}$$

SEER_{Min} entspricht dem grösseren der beiden Werte, das heisst die Kältemaschine für die Anlage in St. Gallen muss somit eine SEER_{Min} von mindestens 5,08 aufweisen.

10.6 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 Speichermanagement je nach Ladezustand des Speichers und Ladetendenz vorgegeben werden.

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.

10.7 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 $\dot{Q}_{\text{Kälte}}$ und $\dot{Q}_{\text{Wärme}}$ zusammen. Der Aufwand (Antriebsleistung des Verdichters) ist unverändert geblieben, woraus sich die Leistungszahl für Kälte-Wärme-Nutzung ($\text{COP}_{\text{Kälte+Wärme}}$) ergibt:

$$\text{COP}_{\text{Kälte+Wärme}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Kälte}} + \dot{Q}_{\text{Wärme}}}{P_{\text{el}}}$$

$\text{COP}_{\text{Kälte+Wärme}}$ Leistungszahl für Kälte-Wärme-Nutzung

$\dot{Q}_{\text{Kälte}}$ nutzbare Kälteleistung in kW

$\dot{Q}_{\text{Wärme}}$ 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.

Die Kennzahl für eine kombinierte Kälte- und Wärmenutzung befindet sich zur Zeit (2025) noch in der Entwicklung. Wir empfehlen die Ergebnisse dieser Entwicklung rund um den «STER» (Seasonal Total Efficiency Ratio) aufmerksam zu verfolgen.

Bild 10.10 analysiert den Nutzen einer Wärmenutzung für das Kältemittel R290 (Propan) 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 10.10 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. Kön-

nen 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 kWh Wärme aus der Ölheizung kostet 10,8 Rappen (A). Wird die Wärme aus der Kälte-Wärme-Maschine genutzt und muss dafür die Verflüssigungstemperatur von 30°C auf 45°C angehoben werden. Dann kostet 1 kWh

Wärmenutzung durch Hochhaltung der Kondensationstemperatur

Die untenstehende Tabelle zeigt, ausgehend von einer Kondensationstemperatur von 20°C, wie viel eine kWh Wärme kostet, wenn die Verflüssigungstemperatur (20°C) angehoben werden muss.

Verdampfungstemperatur	[°C]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verflüssigungstemperatur	[°C]	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Kältemittel		R290									
COP _{Kälte}	[-]	8,1	6,3	5,1	4,3	3,6	3,1	2,7	2,3	2,0	1,8
Kälteleistung	Q _{Kälte} [kW]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Leistungsaufnahme	P _{el} [kW]	12	16	20	23	28	32	37	43	50	57
Kondensationsleistung	Q _{Wärme} [kW]	112	116	120	123	128	132	137	143	150	157
Strompreis	[Rp./kWh]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Zusätzlich notwendige Verdichterleistung	[kW]	-	-	-	4,0	8,2	12,9	17,9	23,6	30,8	37,4
Kondensationsleistung	Q _{Wärme} [kW]	-	-	-	123	128	132	137	143	150	157
COP _{Wärme}	[-]	-	-	-	31,2	15,6	10,3	7,7	6,1	4,9	4,2
Wärmenutzungs-Preis	[Rp./kWh]	0,0	0,0	0,0	0,8	1,6	2,4	3,3	4,1	5,1	6,0
Heizölpreis	[CHF/100l]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Kesselwirkungsgrad	[-]	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %
Energiekosten Öl	[Rp./kWh]	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8

Energiepreis in Rp./kWh

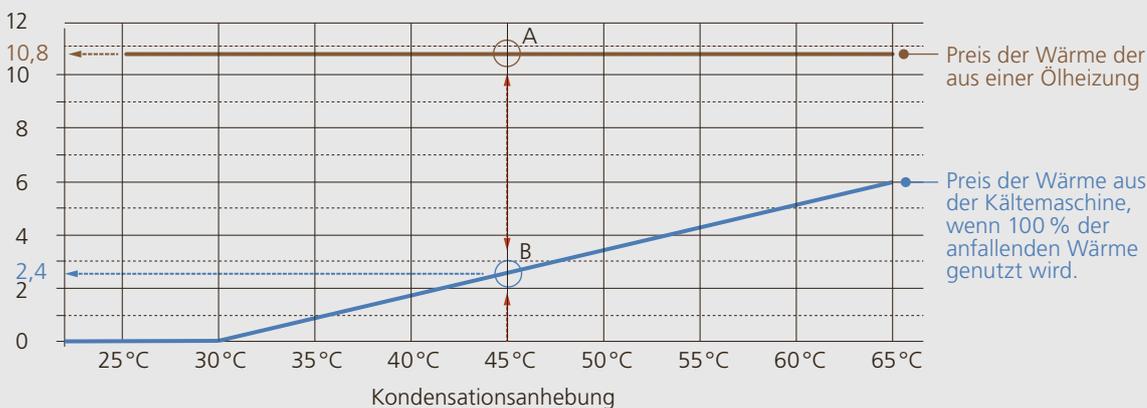


Bild 10.10: Preis der Wärme, wenn die Verflüssigungstemperatur einer Kälte-Wärme-Maschine für die Wärmenutzung angehoben wird. Quelle: Leplan AG

Wärme nur 2,4 Rappen (B) – also 8,4 Rappen weniger als mit der Ölheizung.

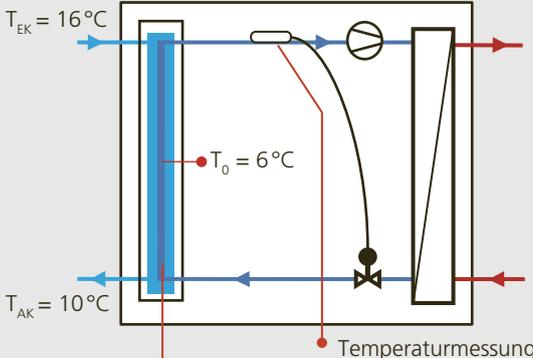
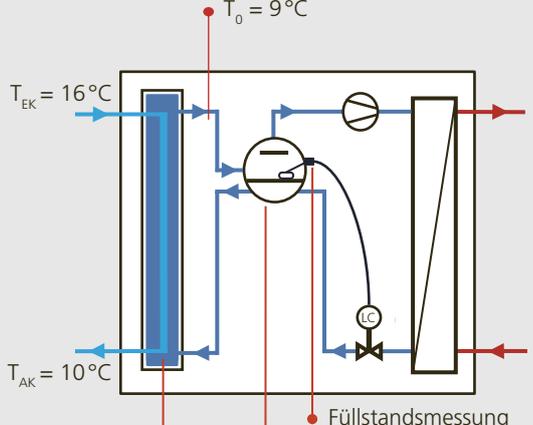
Wichtig: Das gilt, wenn 100 % der Wärme genutzt wird. Wird «nur» 50 % der Wärme genutzt sinkt die Effizienz und 1 kWh kostet dann an diesem Betriebspunkt 4,8 Rappen.

10.8 Energieeffizienz verschiedener 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.

Für einen umfassenden Vergleich der beiden Systeme müsste auch noch der TEWI berechnet werden.

Prinzip	Trockenexpansion	Überfluteter Verdampfer
Beschreibung	<p>Bei Verdampfer mit Trockenexpansion wird die Kältemittelmenge mit einem Expansionsventil so geregelt, dass das Kältemittel am Austritt vollständig verdampft und überhitzt ist.</p> <p>Das Kältemittel befindet sich in den Rohren des Verdampfers. Dadurch benötigt das System eine kleine Kältemittelmenge.</p>	<p>Der Verdichter saugt das vollständig verdampfte Gas aus dem oberen Bereich des Abscheiders ab. Anhand des Füllstandes im Abscheider regelt das Expansionsventil das Niveau im Abscheider und stellt so sicher, dass nur vollständig verdampftes Kältemittel angesaugt wird.</p> <p>Da der Verdampfer mit Kältemittel überflutet ist, benötigt das System bei Rohrbündel-Verdampfer eine relativ grosse Kältemittelmenge. Bei Systemen mit kassetten-geschweissten Plattenwärmetauschern, die sich durch einen hohen Wärmeübergangskoeffizienten auszeichnen, ist die Kältemittelmenge nicht wesentlich grösser als beim Trockenexpansions-Verdampfer.</p>
Übersicht	 <p>Das Kältemittel befindet sich im Rohr des Verdampfers.</p>	 <p>Abscheider</p> <p>Das Kältemittel befindet sich im Mantel des Verdampfers.</p>

Prinzip	Trockenexpansion	Überfluteter Verdampfer
System-temperaturen		
	<p>Benötigt man 10°C kaltes Wasser muss mit einem Trockenexpansions-Verdampfer mit einer Verdampfungstemperatur von 6°C gearbeitet werden.</p>	<p>Benötigt man 10°C kaltes Wasser kann in Kältemaschinen mit einem überfluteten Verdampfer – ohne Überhitzung – mit einer Verdampfungstemperatur von 9°C gearbeitet werden.</p>
	<p>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.</p>	
Betrachtung log p,h-Diagramm		
	<p>Aufgrund der notwendigen Überhitzung verschieben sich die Arbeitspunkte im log p,h-Diagramm.</p>	
	<p>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).</p>	
Performance	<p>$COP_{Kälte} = 7,0$ (gerechnet) (Energieverbrauch: 100 %)</p>	<p>$COP_{Kälte} = 8,0$ (gerechnet) (Energieverbrauch: 87,5 %) Faustregel: 3 K mal 3 % = ca. 9 % tieferen Energieverbrauch</p>
	<p>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.</p>	

10.9 Energieeffizienz von Raumklimageräten < 12 kW

Netzbetriebene Raumklimageräte mit einer Nennleistung von 12 kW oder weniger unterstehen der Energieeffizienzverordnung (EnEV). In der Praxis findet man hauptsächlich Split-Geräte (Bild 11.1), Multi-Split-Geräte (Bild 11.2), Wandklimaanlagen (Bild 11.5) und mobile Raumklimageräte (Bild 11.6), die unter die EnEV fallen. Bei diesen Geräten müssen der Energieverbrauch, die Energieeffizienz und der Schall mit der Energieetikette (siehe Bild 10.11) deklariert werden. Zudem müssen die Geräte Mindestanforderungen bezüglich SEER bzw. EER erfüllen. Diese sind an die Nennleistung und Klimaschädlichkeit des Kältemittels gekoppelt. Die Anforderungen an die Energieeffizienz von Raumklimageräten ist im Bild 10.12 ersichtlich. Details zu den genauen Nennbedingungen können in der EnEV bzw. EU-Verordnung 206/2012 nachgelesen werden.

Die Energieetikette ordnet die effizientesten Raumklimageräte aktuell (Stand 2025) der Effizienzklasse A+++ zu. Es lohnt sich somit, beim Kauf die beste Energieeffizienzklasse zu wählen.

Die Wahl eines effizienten Modells allein genügt nicht – entscheidend ist auch der korrekte Einsatz des Geräts (siehe Kapitel 11.9).



Bild 10.11: Energieetikette netzbetriebene Raumklimageräte. Für die Beurteilung der Effizienz im Kühlbetrieb ist der EER massgebend.

	Raumklimageräte, ausser Einkanal- und Zweikanal-Raumklimageräte		Zweikanal-Raumklimageräte		Einkanal-Raumklimageräte	
	SEER	SCOP (Heizperiode mittel)	EER _{rated}	COP _{rated}	EER _{rated}	COP _{rated}
GWP des Kältemittels > 150 bei <6 kW	4,60	3,80	2,60	2,60	2,60	2,04
GWP des Kältemittels ≤ 150 bei <6 kW	4,14	3,42	2,34	2,34	2,34	1,84
GWP des Kältemittels > 150 bei 6–12 kW	4,30	3,80	2,60	2,60	2,60	2,04
GWP des Kältemittels ≤ 150 bei 6–12 kW	3,87	3,42	2,34	2,34	2,34	1,84

Bild 10.12: Mindestanforderungen an die Energieeffizienz gemäss EnEV resp. EU-Verordnung 206/2012, Tabelle 6.

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 Verflüssigungstemperatur betreiben. 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.

Direktverdampfungs- und Direktverflüssigungs-Systeme

Direktverdampfungs- und Direktverflüssigungs-Systeme führen das Kältemittel ohne Zwischenkreisläufe direkt zum Verflüssiger bzw. zum Verdampfer. Die Systeme lassen sich oft nicht ohne weiteres in ein System mit einer Kälte-Wärme-Maschine einbinden. Trotzdem kann eine Split-Anlage für die Kühlung eines einzelnen Serverraums sinnvoll sein. Und auch das Wissen über VRF/VRV-Systeme oder die mobilen Raumklimageräte sind wichtig, um verschiedene Lösungen und Systeme beurteilen zu können.

Direktverdampfungs- und Direktverflüssigungs-Systeme (DX-/DV-Systeme) – beispielsweise Split-Anlagen – haben selten mehr als 20 kW Kälteleistung und sind eigentlich zu «klein» für dieses Fachbuch. Zudem sind die meisten DX-/DV-Systeme proprietär aufgebaut: Jeder Hersteller entwickelt sein System nach seinen eigenen Bedürfnissen, und der Kunde muss in der Regel alle Elemente vom selben Hersteller beziehen. DX-/DV-Systeme lassen sich daher nicht ohne weiteres in ein System mit einer Kälte-Wärme-Maschine einbinden. Trotzdem kann eine Split-Anlage für die Kühlung eines einzelnen Serverraums geeignet sein. Für die Evaluation ist es ebenfalls sinnvoll, die verschiedenen DX-/DV-Systeme zu kennen und beurteilen zu können. Auch muss der Planer bewusst sein, dass diese Geräte die Anforderungen der ChemRRV erfüllen müssen und es absehbar ist, dass die synthetischen Kältemittel nicht mehr erlaubt sind.

11.1 Funktion von DX-/DV-Systemen

Bei DX-/DV-Systemen zirkuliert das Kältemittel – anders als bei Systemen mit einer Kälte-Wärme-Maschine (Chillersysteme) – ohne ein zusätzliches Wassermedium direkt zwischen der Ausseneinheit (Verflüssiger, Verdichter) und den Inneneinheiten (Verdampfer). Das macht die DX-/DV-Systeme energieeffizient. Zudem ist die Bauweise sehr kompakt, und die Investitionskosten für Einzelraumanwendungen sind oft kleiner als von Systemen mit einem Wasser- oder Wasser-Frostschutzkreislauf.

Die DX-/DV-Systeme eignen sich hingegen weniger gut bei grossen und weitläufigen Anlagen, weil Verdampfer und Verflüssiger direkt miteinander verbunden werden müssen. Auch ist die Leitungslänge der Systeme begrenzt und schnell ist viel Kältemittel im Umlauf. Besonders bei DX-/DV-Systemen in Räumen mit Publikumsverkehr oder mit beschränktem Personenzutritt werden den Anforderungen an die Sicherheit (praktischer Grenzwert, Explosionsschutz, Toxizität etc.) in der Praxis oft zu wenig Beachtung geschenkt. Je nach Art und Füllmenge des Kältemittels sowie dem Standort (Kategorie des Zugangsbereiches, siehe Bild 4.4) sind Sicherheitsmassnahmen wie eine Kältemittelüberwachung notwendig. Solche Massnahmen sind kostenintensiv und wirken sich auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Die DX-/DV-Systeme können in sechs Gruppen eingeordnet werden:

- Split-Anlagen
- Multi-Split-Systeme
- VRF/VRV-Systeme
- HVRF-Systeme
- Wandklimaanlagen
- Mobile Raumklimageräte

Alle DX-Systeme geben die «Kälte» über den Verdampfer direkt an die Umgebungsluft ab. Dabei führt ein Ventilator die warme Umgebungsluft zum Verdampfer und die gekühlte Luft in den Raum. Dies führt zu Luftbewegungen, die teilweise angenehm empfunden werden (beschleunigte Verdunstung von Schweiß wird als zusätzliche Kühlung wahrgenommen), teilweise aber auch unangenehme (kalte Zugluft). Zudem verursacht der Ventilator Geräusche.

11.2 Split-Anlagen

Eine Split-Anlage besteht aus einer Ausseneinheit (Verflüssiger, Verdichter und Ventilator) und einer Inneneinheit (Verdampfer, Expansionsventil und Ventilator). Aussen- und Inneneinheiten sind mit kältemittelführenden Leitungen verbunden (Bild 11.1). Die meisten Split-Systeme können reversibel betrieben werden: Bei einem Kühlbedarf im Raum arbeitet die Ausseneinheit als Verflüssiger und gibt die dem Raum entzogene Wärme an die Umwelt ab. Im Heizbetrieb arbeitet die Ausseneinheit hingegen als Verdampfer, entzieht der Umwelt Wärme und gibt sie über das Innengerät im Raum ab (Luft-Luft-

Wärmepumpe). Bei der Evaluation eines geeigneten Produktes sind die Einsatzgrenzen (Aussentemperatur) für den erwünschten Kühl- und Heizbetrieb zu beachten.

Split-Anlagen können eine gute und energieeffiziente Lösung sein, wenn es darum geht, einen einzelnen Raum (z. B. Serverraum) zu kühlen oder wenn ein einzelner Raum deutlich tiefere Kaltwassertemperaturen verlangt als die Räume im restlichen Gebäude (siehe 2.5).

Aus energetischer Sicht ist immer eine Inverter-Steuerung zu empfehlen. Sie spart gegenüber einer herkömmlichen Steuerung – gemäss Angaben der Hersteller – bis zu 30 % Energie.

Wenn ein Raum mit mehreren Split-Klimaanlagen gekühlt wird, die alle das gleiche Kältemittel verwenden, gilt:

Die maximal zulässige Kältemittelmenge und die erforderlichen sicherheitsrelevanten Alarminrichtungen richten sich nach dem Kältekreislauf mit der grössten Kältemittelfüllmenge im gesamten System. Hingegen ist die Kälteleistung die Summe aus sämtlichen Kältekreisläufen, die derselben Verwendung dienen.

11.3 Multi-Split-Systeme

Bei Multi-Split-Anlagen versorgt eine Ausseneinheit mehrere Innengeräte (oft bis zu 5) mit Kälte resp. Wärme. Verbunden sind Ausseneinheit und die Inneneinheiten – wie bei den Split-Anlagen – mit Kältemittelleitungen (Bild 11.2).

Das Kältemittel befindet sich ebenfalls immer in Bereichen mit Publikumsverkehr

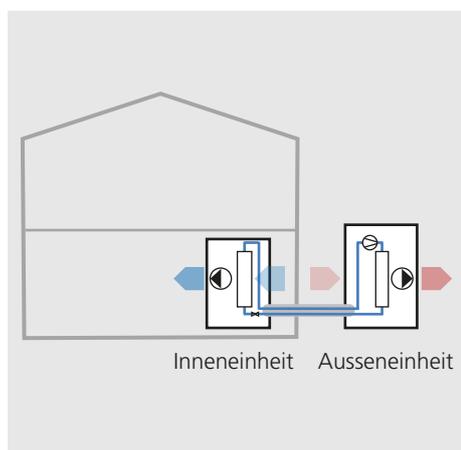


Bild 11.1:
Split-Anlage.

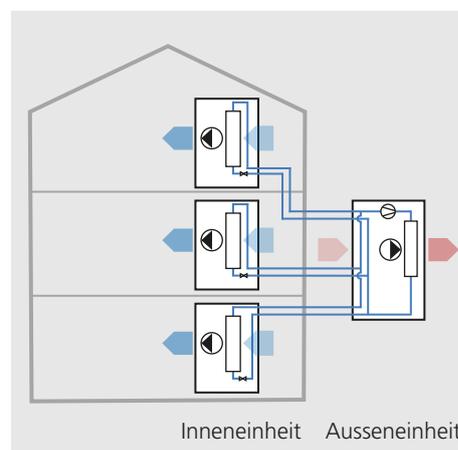


Bild 11.2:
Multi-Split-System.

oder mit beschränktem Personenzutritt. Weil Multi-Split-Anlagen mehrere Innengeräte und ein ausgedehnteres Netz mit kältemittelführenden Leitungen aufweisen, ist die Kältemittelfüllmenge deutlich höher als bei Mono-Split-Anlagen. Bei der Überprüfung der Anforderungen an die Sicherheit (praktischer Grenzwert, Explosionsschutz, Toxizität etc.) muss jeweils die gesamte Kältemittelfüllmenge beigezogen werden. Allenfalls sind eine Kältemittelüberwachung und Detektoren in den gefährdeten Räumen notwendig.

Müssen bei einem bestehenden Gebäude nur einige, exponierte Räume gekühlt werden, ist in der Regel eine Multi-Split-Anlagen eine effizientere Lösung als mehrere Mono-Split-Systeme. Zudem gibt es Multi-Split-Anlagen, die mit der Wärme aus den Räumen auch Warmwasser erzeugen können. Besonders bei proprietären Lösungen lohnt es sich, die Wirtschaftlichkeit der Wärmenutzung zu prüfen. Aus energetischer Sicht ist immer eine Inverter-Steuerung zu empfehlen (siehe Split-Anlage).

11.4 VRF/VRV-Systeme

VRF/VRV-Systeme sind erweiterte Multi-Split-Systeme mit einer variablen Kältemittelverteilung. Sie können in einem Gebäude die verschiedenen Gebäudezonen nach Bedarf beheizen oder kühlen. Zudem kann die Wärme zurückgewonnen werden. Die Ausseneinheit (Verdichter-Verflüssiger-Einheit) beliefert über ein mit Kältemittel gefülltes Leitungssystem (mit 4-Leiter wie im Bild 11.3, 3-Leiter oder

2-Leiter) die in den Räumen montierten Inneneinheiten mit Kälte oder Wärme. Dabei übernimmt eine sogenannte Controller-Einheit die Steuerung der Wärme- respektive Kälteflüsse. Die Verteilung der Kälte bzw. der Wärme im Gebäude mit Kältemittelkreisläufen macht das System energieeffizient.

Gleichzeitig ist zu beachten, dass je nach Kältemittel die Räume mit den entsprechenden Sicherheitsalarmeinrichtungen (Kältemitteldetektoren, Warnlampen etc.) ausgerüstet werden müssen. So wird in den Räumen im Falle eines Lecks im Kältemittelkreislauf ein Alarm ausgelöst, die Anlage schaltet den Verdichter ab und im Kältekreislauf werden die Magnetventile geschlossen, um das weitere Austreten von Kältemittel zu verhindern.

VRF/VRV-Systeme, die mit mehr als 3 kg Kältemittel gefüllt sind, müssen dem BAFU gemeldet werden. Zudem ist eine regelmäßige Dichtigkeitsprüfung vorgeschrieben.

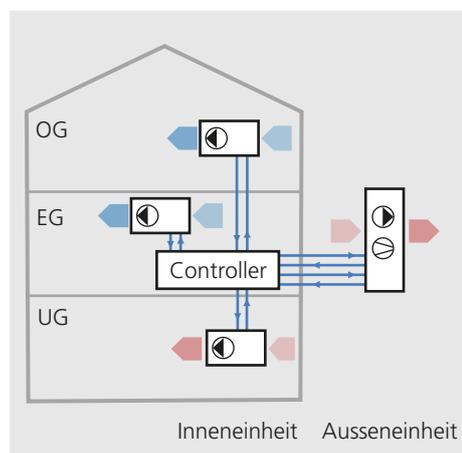
VRF oder VRV?

VRF (Variable Refrigerant Flow) und VRV (Variable Refrigerant Volume) bezeichnen im Grunde dasselbe Systemprinzip – es handelt sich lediglich um unterschiedliche Bezeichnungen:

- VRF ist der allgemeinere Begriff, der von verschiedenen Herstellern verwendet wird
- VRV ist der Markenname eines Herstellers

Beide Systeme arbeiten mit einem variablen Kältemittelmassenstrom, und der Unterschied in der Benennung (Volumenstrom bzw. Massenstrom) ist technisch nicht substantiell, da Volumen- und Massenstrom über die Dichte des Kältemittels miteinander verknüpft sind.

Bild 11.3:
VRF/VRV-System. Erd- und Obergeschoss werden gekühlt, während das Untergeschoss beheizt wird. Die Wärme bzw. Kälte wird vom Controller mittels Kältemittel der jeweiligen Inneneinheit zugeführt.



11.5 HVRF-Systeme

Das HVRF-System – es wird als auch Hybrid-VRF-, Kombi-Split- oder Bi-Bloc-System bezeichnet – ist eine Hybrid-Variante des DX-Grundprinzips. Bei diesem System wird die Energie über ein Kältemittel von der Ausseneinheit in eine Box (Hydro-Unit, Hybrid-Controller) geführt. Darin befinden sich zwei Platten-Wärmeübertrager, Pumpen und die Steuerung. Die Kälte respektive die Wärme wird in der Box auf Wasserkreise übertragen. Die Wärme- oder Kälteverteilung von der Box zu den Räumen erfolgt mit einem Kälte-/Wärmeträger (Wasser-Frostschutz-Gemisch).

Die Box kann so angesteuert werden, dass sie simultan kühlt und heizt (siehe Bild 11.4). Gibt es im Gebäude gleichzeitig Räume mit Kühl- und Heizbedarf, kann die anfallende Wärme genutzt werden. Leider sind im heutigen Markt HVRF-Systeme mit natürlichen Kältemitteln noch nicht etabliert. Derzeit dominieren synthetische Kältemittel wie R32, R410A oder R454B.

11.6 Wandklimaanlagen

Wandklimaanlagen werden innerhalb des Raumes an einer Aussenwand montiert. Es gibt keine Ausseneinheit. Über zwei Bohrungen (je ca. 180 mm Durchmesser) wird Zuluft zu- und die warme Abluft abgeführt. Da kein Aussengerät notwendig ist, bleibt die Fassadestruktur optisch weitgehend unverändert. Sichtbar sind lediglich zwei Gitterabdeckungen.

Allerdings durchbrechen die beiden Bohrungen den Dämmperimeter. Dies muss unbedingt mit einem Bauphysiker besprochen werden.

Weil das Gerät an einer Aussenwand montiert werden muss, sind die Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt. Zudem befinden sich bei Wandklimaanlagen Verdichter und Ventilatoren im Innenraum, was den Geräuschpegel im Raum erhöht.

Bild 11.4:
HVRF-System. Erd- und Obergeschoss werden gekühlt, während das Untergeschoss geheizt wird. Die Wärme bzw. Kälte wird von der Box mit einem Wärme-/Kälte-träger zur Inneneinheit geführt.

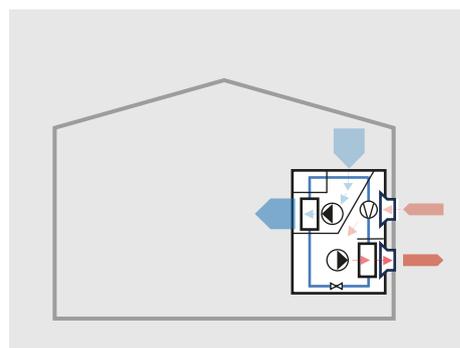
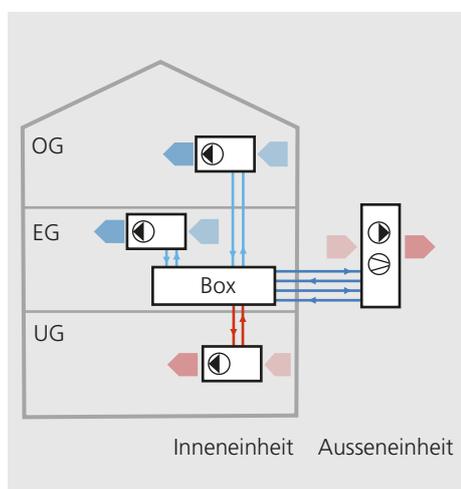


Bild 11.5:
Eine Wandklimaanlage kommt ohne Ausseneinheit an der Fassade aus, erhöht jedoch den Geräuschpegel im Innenraum.

11.7 Mobile Raumklimageräte

Oft sind es Mieter oder Eigenheimbesitzer, die mobile Raumklimageräte anschaffen, um im Sommer die Raumtemperatur in gewissen Räumen zu senken. Es gibt Kompaktgeräte, welche die warme Luft über einen Schlauch ins Freie blasen. Dies kann durch

- ein leicht geöffnetes Fenster oder eine geöffnete Türe,
- eine Durchführung durch das Mauerwerk (ca. 150 mm Durchmesser)
- oder eine Durchführung durch ein Fenster (ca. 150 mm Durchmesser)

erfolgen. Wird die Wärme über ein geöffnetes Fenster oder eine geöffnete Türe ins Freie geleitet, muss mit einer Fenster- resp. Türabdichtung sichergestellt werden, dass die heiße Luft aus dem Schlauch nicht direkt wieder in den Raum strömt.

Bei den Einschlauch-Kompaktgeräten (Bild 11.6) strömt jedoch immer warme Aussenluft in den Raum. Die Effizienz dieses Systems ist entsprechend gering.

Etwas effizienter – aber noch immer nicht optimal – sind Kompaktgeräte mit einem Zu- und einem Abluftsystem (Zweischlauch-Systeme, Bild 11.7). Die Kühlluft wird über den Zuluftschlauch von aussen angesaugt. Der «kühlen» Aussenluft wird über den Verflüssiger die Wärme aus dem Raum mitgegeben und über den Abluftschlauch ins Freie geblasen. Auch bei diesem System müssen entsprechende Öffnungen für die Zu- und Abluft geschaffen werden. Hier sind zwei Durchführungen mit je ca. 150 mm Durchmesser notwendig. Das ist für viele Mieter und Eigenheimbesitzer ein zu grosses Hemmnis, um sich für das etwas effizientere Zweischlauch-System zu entscheiden.

Eine dritte Möglichkeit sind mobile Split-Klimaanlagen (Bild 11.8), die das Innengerät mit einem 2 bis 5 Meter langen Schlauch mit einem Aussengerät verbinden. Der Schlauch hat einen Durchmesser von 3 bis 4 cm und enthält zwei Kältemittelleitungen und ein Kabel für die Stromversorgung und die Steuerung der Ausseneinheit. Der Schlauch kann durch eine Fenster- oder eine Türöffnung geführt werden. Oft ist der Schlauch fest mit beiden Einheiten verbunden. Es gibt jedoch auch Modelle, bei denen dieser Schlauch mit Schnellverschraubungen gekoppelt ist. So kann eine erfahrene Person die Innenvon der Ausseneinheit trennen, den Schlauch durch eine 50 mm grosse Durchführung in der Wand führen und so Aussen- und Inneneinheit ohne offene Fenster und Türen verbinden. Zudem können bei Modellen mit Schnellverschraubungen die Leitungen auch um einige Meter verlängert werden.

Mobile Split-Klimageräte sind deutlich effizienter als Ein- und Zweischlauch-Kompaktgeräte. Wird der Schlauch durch ein offenes Fenster oder eine offene Türe geführt, muss auch hier die Öffnung vollständig abgedichtet und gesichert werden (Einbruchschutz, Wettereinflüsse). Zudem sind die mobilen Split-Klimaanlagen eher schwer. Ein Innengerät (Verdichter, Verdampfer, Ventilator) wiegt zwischen 30 und 50 kg, das Aussengerät (Verflüssiger, Ventilator) ca. 10 bis 15 kg. Auch sind Geräte, bei denen Aussen- und Innengerät mit einem durch einen Wanddurchbruch geführten Schlauch verbunden sind, nur bedingt «mobil».

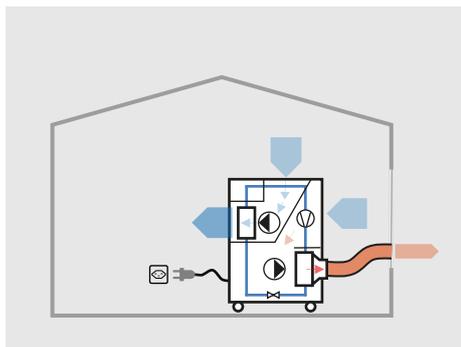


Bild 11.6:
Mobiles Einschlauch-
Klimagerät.

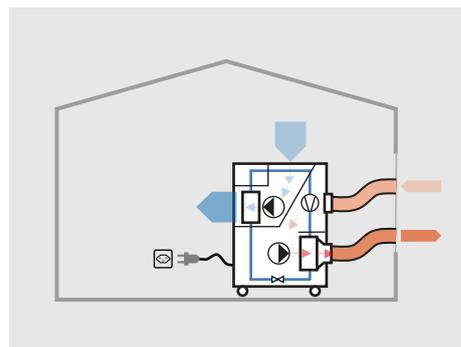


Bild 11.7:
Mobiles Zwei-
schlauch-Klimagerät.

Mobile Raumklimageräte neigen dazu, Komfortprobleme (kalte Zonen und unangenehme Luftbewegungen) und hohe Betriebskosten zu verursachen – besonders die wenig effizienten, mobilen Ein- und Zweischlauch-Systeme. Weil sich bei den mobilen Raumklimageräten Verdichter und Ventilator jeweils im Innenbereich befinden, erhöhen sie zudem den Geräuschpegel im Raum.

Alle mobilen Raumklimageräte erzeugen Kondenswasser, das abgeführt werden muss. Bei Geräten mit integriertem Auffangbehälter stoppt der Betrieb automatisch, sobald der Behälter voll ist – das Gerät kühlt dann nicht weiter. Solche Geräte erfordern daher regelmässige Betreuung und Wartung.

11.8 Aufstellung einer Ausseneinheit

Die Ausseneinheit wird an eine Aussenwand montiert oder auf den Balkon oder Boden gestellt. Hier einige Punkte, die dabei zu beachten sind:

- Den Aufstellungs- bzw. Montageort so wählen, dass die verschiedenen Innengeräte einfach mit der Kältemittelleitung verbunden werden können
- Für Geräte mit den natürlichen Kältemitteln Propan und Isobutan (Sicherheitsklasse A3) gelten wegen der hohen Brennbarkeit strengere Vorgaben an den Aufstellungsort. Zu beachten sind unter anderem:
 - Abstände zu Türen, Fenstern, Lichtschächten, etc.,
 - Abstand zu Zündquellen wie elektrische Anlagen (Lampen, Steckdosen etc.), Motorfahrzeuge oder offenen Flammen und funkenbildenden Arbeitswerkzeugen,
 - Abstand zu den Zu- und Abluftauslässen von Lüftungsanlagen, Dachabläufen, Kanalisationseinläufen etc.,
 - Aufstellung nicht in Senken oder Vertiefungen, in denen sich austretendes Kältemittel ansammeln kann.

Am besten klärt man die Anforderungen mit dem Lieferanten oder ermittelt sie anhand der Vorgaben der SN EN 378-3 und dem SUVA-Merkblatt 66139. Im Suissetec-Merkblatt «Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln» finden sich weitere Informationen zum Aufstellungsort. Die Ausseneinheit muss mit genügend Abstand von der Wand montiert werden (min. 12 cm), damit sie einfach gereinigt werden kann.

- Zusätzlich muss auf die Nachbarn Rücksicht genommen werden (Lärm und Optik).
- Der Lieferant soll das Formular «Lärmrechtliche Beurteilung von Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Kälteanlagen» des Cercle Bruit Schweiz ausfüllen.
- Es muss geklärt werden, wohin das Abtauwasser abgeleitet wird.

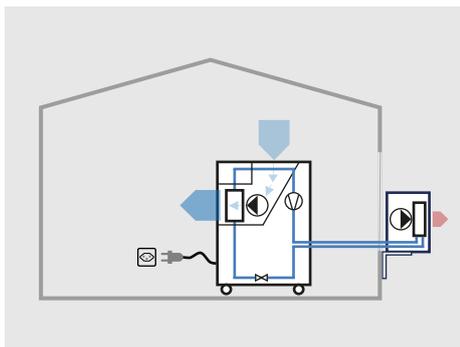


Bild 11.8:
Mobiles Split-Klima-
gerät.

In den meisten Kantonen bedeutet die Montage einer Ausseneinheit eine bauliche Veränderung und benötigt aufgrund der optischen Veränderung an der Fassade und den Lärmemissionen eine Baubewilligung mit einem Lärnmachweis.

Das Bild 11.9 zeigt die Fassade eines Gebäudes in der Stadt Zürich mit mehreren Aussengeräten. Die gewählte Anordnung ist ungünstig, da die höher montierten Geräte die warme Abluft der tiefer installierten Geräte ansaugen. Dies führt – wie in Kapitel 10.4 beschrieben – zu einer verminderten Effizienz der Anlage. Denn eine um 1 °C höhere Kondensationstemperatur erhöht den Energieverbrauch der Kälteanlage um rund 2,5 %. Bei hohen Aussentemperaturen, wenn die Klimaanlage besonders stark beansprucht wird, steigt zudem das Ausfallrisiko aufgrund überhöhter Kondensationstemperaturen.

11.9 Platzierung der Inneneinheit

Einige Punkte zur Platzierung der Inneneinheiten.

- Empfohlen wird ein Aufstellungsort im Deckenbereich. Dabei ist zu beachten, dass die SN EN 378-1 für Inneneinheiten Vorgaben zur Kältemittel-Füllmenge macht. Da die maximale Füllmenge von der Mindest-

Raumfläche und der Montagehöhe der Inneneinheit abhängig ist, beeinflusst die gewählte Montagehöhe auch die maximale Füllmenge. Dies betrifft vor allem Anlagen der Sicherheitsklasse A3 mit den natürlichen Kältemitteln Propan und Isobutan.

Bei Innengeräten von Luft-Luft-Wärmepumpen ist hingegen eine bodennahe Platzierung besser.

- Bei der Gerätekonfiguration muss ein Modell gewählt werden, das die Luft oben ansaugt.
- Bei verschiedenen Modellen kann ein Teil des Kaltluftstroms nach oben und ein Teil nach unten geleitet werden. So wird eine gleichmässige Kaltluftverteilung erreicht und der Komfort erhöht.
- Die Inneneinheit muss periodisch gereinigt werden und dafür gut zugänglich sein.
- Es muss geklärt werden, wie und wohin allfälliges Kondenswasser abgeleitet wird.

11.10 Richtiger Einsatz ist ausschlaggebend

Damit das Gerät effizient arbeiten kann, müssen neben der guten Energieeffizienz auch die Raum- und Gerätegrößen aufeinander abgestimmt sein. Zudem müssen die Geräte korrekt genutzt werden. In der Praxis sieht man besonders bei mobilen Einschlauch-Raumklimageräten (Bild 11.6), dass die Öffnung, durch die der Abluftschlauch die Wärme ins Freie leitet, oft nicht vollständig abgedichtet ist. Dadurch strömt warme Luft von aussen in den Raum zurück.

Ein weiterer Punkt ist die eingestellte Raumtemperatur. Auch mit diesen Geräten sollte nicht zu stark gekühlt werden. Im Sommer ist eine Raumtemperatur zwischen 22 °C und 26 °C anzustreben. Zudem sollten nur die benutzten Räume gekühlt werden. Und die Luft sollte um das Gerät herum frei zirkulieren können.



*Bild 11.9:
Beispiel einer
ungünstigen
Anordnung. Die
Ausseneinheiten im
oberen Bereich
saugen die warme
Luft der unten-
liegenden Geräte an.*

10 Merkpunkte zu den Direktverdampfungs- und Direktverflüssigungs-Systemen

1. DX-/DV-Systeme sind ideal für die Kühlung von einzelnen Räumen mit speziellen Kühlbedürfnissen (z. B. Serverräume).
2. Auch DX-/DV-Systeme müssen die Anforderungen der ChemRRV erfüllen – es ist absehbar, dass die synthetischen Kältemittel auch für diese Systeme in absehbarer Zeit nicht mehr erlaubt sein werden.
3. Proprietäre DX-/DV-Systeme lassen sich schwer in zentrale Anlagen integrieren. Daher muss immer zuerst die Systemkompatibilität geprüft werden.
4. Die Ausseneinheit richtig platzieren. Sie muss gut zugänglich und gut «belüftet» sein. Bei der Wahl des Aufstellungsortes sind die Geräuschemissionen zu beachten. Je nach Kältemittel müssen Sicherheitsabstände zu Fenstern, Lichtschächten, Elektroinstallationen, Dachabläufen etc. eingehalten werden. In den meisten Kantonen ist zudem eine Baubewilligung notwendig.
5. Füllmenge nach dem grössten Kältekreislauf bewerten. Je nach Kältemitteltyp und Füllmenge sind in den Räumen (teure) Sicherheitseinrichtungen wie Detektoren etc. nötig.
6. Besonders bei brennbaren Kältemitteln wie Propan oder Isobutan gelten strenge Sicherheitsvorgaben. Die entsprechenden Normen und Vorgaben (z. B. SN EN 378, SUVA-Merkblatt) sind einzuhalten.
7. Besondere Beachtung muss der Sicherheit im Publikumsbereich geschenkt werden. Je nach Kältemittelfüllmenge und Kältemitteltyp sind Überwachungssysteme in den öffentlich zugänglichen Räumen erforderlich.
8. Bei kleinen Anlagen (< 12 kW) sollten die Effizienzklasse A+++ und Anlagen mit Invertertechnik bevorzugt werden. Diese sparen bis zu 30 % Energie gegenüber konventionellen Systemen.
9. HVRF-Systeme ermöglichen es, Heizen und Kühlen zu kombinieren und so die Wärme direkt zu nutzen.
10. Mobile Geräte kritisch hinterfragen: Ein- und Zweischlauchgeräte sind wenig effizient. Wenn mobil, dann ein mobiles Split-Gerät.

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 2024: Senior Consultant bei Vadea (Teilzeit). 2012 bis 2017: hauptamtlicher Dozent für Gebäudetechnik an der Hochschule Luzern, Abteilung T&A. 2017 bis 2018: Lehrbeauftragter an der HSLU. Bis 2024 aktiv im nationalen und internationalen Normenschaften (SIA, SWKI, VDI, CEN, ISO).



Michael Kriegers, Dipl. Ing. FH HLK
2007 bis heute: Partner, Mitglied der Geschäftsleitung und 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: Diplomexperte, seit 2006 auch nebenamtlicher Lehrer HF Gebäudetechnik – Fachrichtung Heizung an der BBZ. 2007 bis 2017: Mitarbeit im SWKI-Vorstand als Delegierter für die Richtlinien. 2019 bis heute: Mitglied der Kommission SIA 384 Heizungsanlagen und Vorsitz der Arbeitsgruppe SIA 384/4 Klimakälteanlagen in Gebäuden 2025.

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 Normenschaften (SIA, SWKI, CEN).



Frank Tillenkamp, Dr.-Ing., Professor für Energiesysteme und Kältetechnik
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: Axima, u. a. als Leiter des Technologiezentrums Axima Lab. 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. 2023: Gründung des Kompetenzzentrums für Kältemaschinen und Wärmepumpentechnik kkwin.ch, in Zusammenarbeit mit der STFW.



Anhang B

Dokumentation

SIA-Normen

- SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden (2014)
- SIA 380/1 Heizwärmebedarf (2016)
- SIA 380/2 Energetische Berechnungen von Gebäuden (2022)
- SIA 382/1 Mechanische Lüftung in Gebäuden (2025)
- SIA 384/1 Heizungsanlagen in Gebäuden (2022)
- SIA 384/4 Klimakälteanlagen in Gebäuden (2025)
- SIA 384/6 Erdwärmesonden (2021)
- SIA 384/7 Grundwasserwärmenutzung (2015)

SWKI-Richtlinien

- Rückkühlung, 2003-3
- Wasser-Wärmespeicher, 2002-1
- Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen, BT102-01
- Sicherstellung des hygienegerechten Betriebs von Verdunstungskühlanlagen, RE200-02

Merkblätter

- Klimadaten für Bauphysik, Energie und Gebäudetechnik, Nr. 2028, SIA (2010)
- Integrale Tests von Gebäudetechniksystemen, Nr. 2046, SIA (2015)
- Kühlung mit der Fussbodenheizung, Suissetec (2021)
- Technische Dämmung in der Gebäudetechnik, Suissetec, 2023
- Flexibler Elastomerschaum im Klima-/Kältebereich, Isolsuisse, 2023

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)
- Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln, Merkblatt, Suissetec (2024)
- Umgang mit Wärmepumpen und Kälteanlagen mit gering toxischen, brennbaren Kältemitteln der Sicherheitsklasse A3 und A2L, Merkblatt, SVK (2025)
- Kälteanlagen und Wärmepumpen sicher betreiben, SUVA-Merkblatt 66139
- Kältemittel-Fibel für Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Fachleute, EnergieSchweiz

Energie und Sicherheit

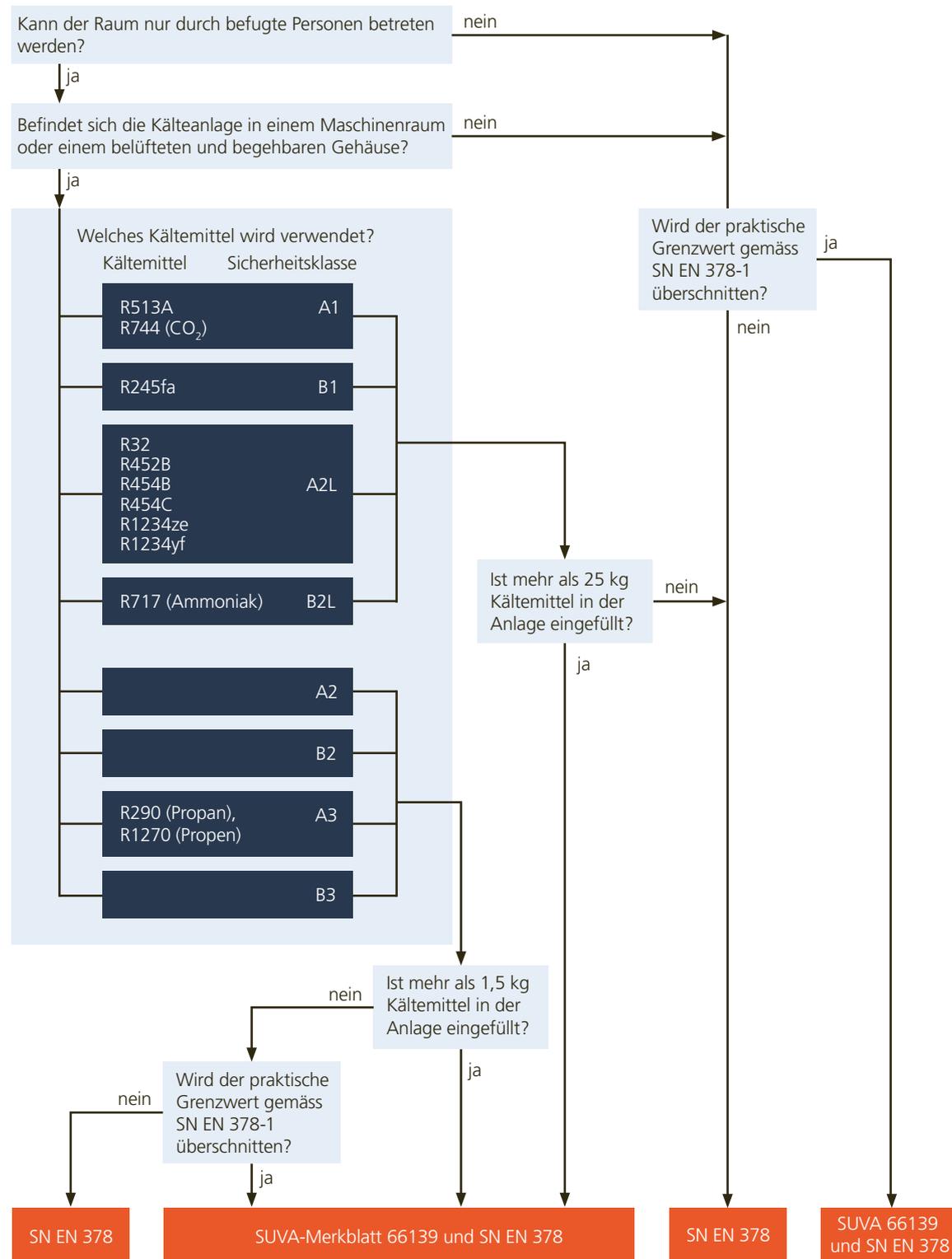
- Energiegesetz – Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich, (MuKE)en
- Verordnung über die Sicherheit von Druckgeräten (Druckgeräteverordnung), SR 819.121
- Kälte-Tool von EnergieSchweiz: Energiebedarf, TEWI und Wirtschaftlichkeit von Kälteanlagen abschätzen

Hinweis zu den hinterlegten Links: Zugriff am 1. Oktober 2025

Anhang C

Sicherheitsanforderungen

Je nach Raumsituation und Kältemittel (Arbeitsicherheit) verschärft. Der Entscheidungsbaum ist eine Orientierung, welche Anforderungen in welchem Fall zu beachten sind.



Anhang D

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 2022)

	Am Standort zusammengesetzte 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

Anhang E

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 $COP_{\text{Kälte}}$ 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 Planerinnen das Kältemittel zusätzlich. Das erhöht die Kälteleistung (respek-

tive 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.

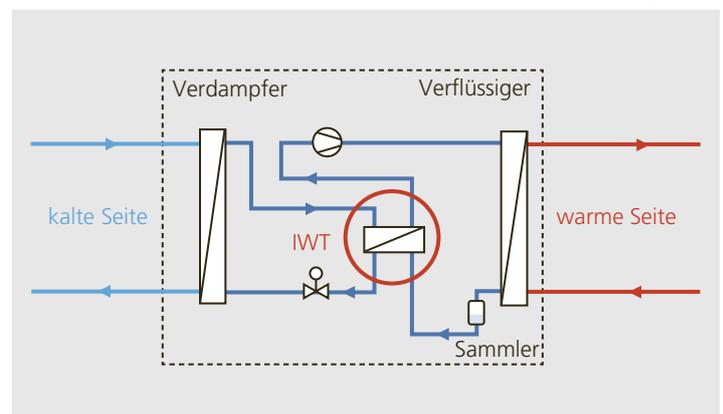
Leider haben viele der heute in der Klimakälte eingesetzten Kältemittel bedeutend höhere Isentrope-Exponenten ($T = 0^\circ\text{C}$): 1,10 (R134a) oder 1,30 (CO_2). Diese Kältemittel eignen sich aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften nur bedingt für eine Unterkühlung mit einem IWT.

Bild E.1:
Unterkühlung mit
einem internen
Wärmeübertrager.

Unterkühlung verbessert die Effizienz

Erfolgt die Unterkühlung mit einem internen Wärmetauscher, kann die Anlageneffizienz 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 %.



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 E.3 (oben): Unterkühlung mit einem Wärmeübertrager, der mit Wasser oder einem Kältemittel kühlt.

Bild E.4 (Mitte): Unterkühlung mit einem Wärmeübertrager, der mit Luft kühlt.

Bild E.5 (unten): Unterkühlung mit integriertem Unterkühlungsregister, das mit Luft kühlt.

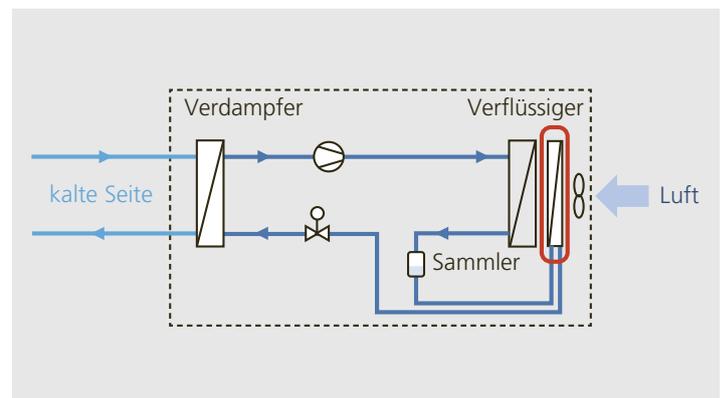
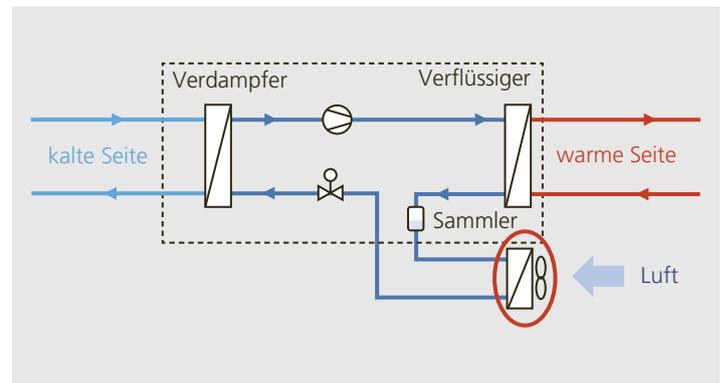
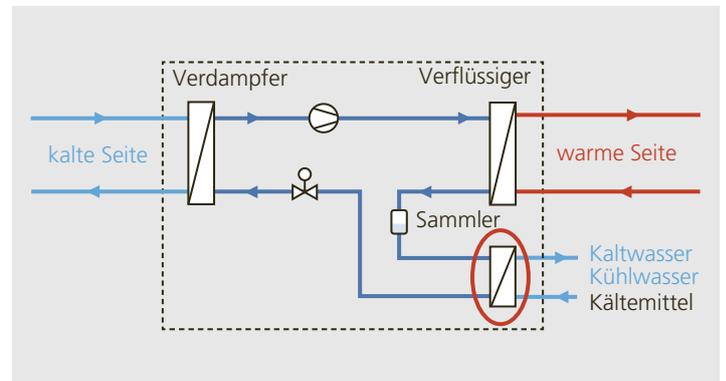
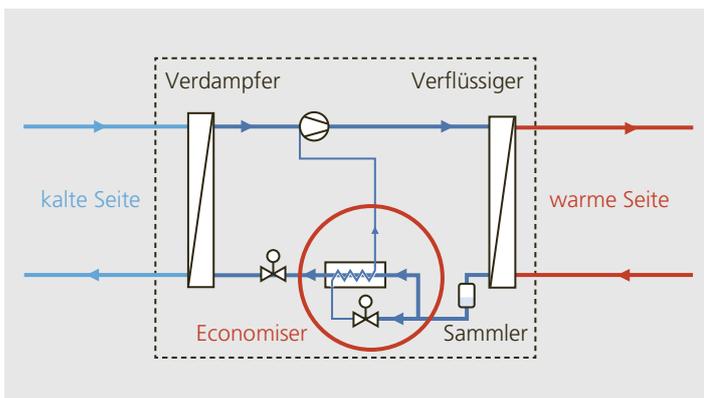


Bild E.2: Unterkühlung mit einem Economiser.



Das Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering der ZHAW hat mit einer Grundlagenstudie das Thema Unterkühlung von Kälteanlagen untersucht. Das Bild E.6 zeigt einen Überblick der Ergebnisse mit den wichtigsten Unterkühlungsarten und ihren Eigenschaften.

Im Faktenblatt «Unterkühlung: Der Schlüssel für Effizienz und Betriebssicherheit» finden sich die wichtigsten Ergebnisse der ZHAW-Studie knapp und verständlich zusammengefasst: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11204>

Bild E.6:
Die wichtigsten Unterkühlungsarten und deren Eigenschaften.
Quelle: ZHAW-IEFE

Die wichtigsten Unterkühlungsarten und deren Eigenschaften. Die Unterkühlung ...

... beeinflusst die Verdichtungsendtemperatur (Heissgastemperatur)					
... führt zu einer zusätzlichen Überhitzung					
... eignet sich für folgenden Verdichterbauarten					
... benötigt eine externe Wärmesenke					
... erhöht die Energieeffizienz					
	↓	↓	↓	↓	↓

Interne Unterkühlung

Interner Wärmetauscher IWT	nur bei Kältemitteln mit kleinen Isentropenexponenten	keine Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	erhöht die Überhitzung	erhöht die Heissgastemperatur deutlich
Interner Wärmetauscher IWT mit Flüssigbypass	nur bei Kältemitteln mit kleinen Isentropenexponenten	keine Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	erhöht die Überhitzung	erhöht die Heissgastemperatur
Economiser	erhöht die Effizienz bis zu 15%	keine Wärmesenke notwendig	nur für Scroll-, Schrauben- und Turbo-Verdichter oder zweistufige Prozesse	kein Einfluss auf die Überhitzung	reduziert die Heissgastemperatur
Eigenunterkühlung	keinen Einfluss auf die Effizienz	keine Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur

Externe Unterkühlung

Externer Unterkühler	erhöht die Effizienz bis zu 30%	Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur
CO ₂ -Booster mit externer Unterkühlung	erhöht die Effizienz bis zu 15%	Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur

sehr gute Voraussetzung
 Eigenschaften prüfen
 Eigenschaft genau prüfen – evtl. ungeeignet

Dämmung von Kälteleitungen und Speicher

Dämmung der Kälteleitungen

Die minimal erforderliche Dämmstärke bei Kälteleitungen wird in erster Linie durch den Kondensatschutz bestimmt. Dabei sind der Taupunkt sowie die Oberflächentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur zu berücksichtigen. Alle Elemente der Klimakälteanlage müssen so gedämmt werden, dass sich an den Oberflächen kein Kondensat bilden kann. Sämtliche Komponenten der Kälteverteilung sind über ihre gesamte Länge zu dämmen. Ausgenommen davon sind Rücklaufleitungen mit einer Kaltwassertemperatur über 18 °C – hier kann auf eine Dämmung verzichtet werden, sofern der Kondensationsschutz dennoch sichergestellt ist (siehe SIA 384/4 (2025)).

Eine zusätzliche Dämmung aus energetischer Sicht führt – aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Kaltwasser und Raumluft – zu geringeren Einsparungen als bei Heizungsanlagen.

Bild F.1:
Empfohlene minimalen Dämmstärken von Kälteleitungen.

Die in den Bildern F.1 und F.2 angegebenen minimalen Dämmstärken für Kälteleitungen basieren weitgehend auf den Empfehlungen des Suissetec-Merkblattes «Technische Dämmung in der Gebäudetechnik» von 2021 und gelten, sofern nicht durch Anforderungen an den Kondensatschutz grössere Dämmstärken notwendig werden.

Je nach Konsistenz (Beweglichkeit) des Dämmmaterials muss eine bestimmte Mindeststärke eingehalten werden, um eine fachgerechte Verarbeitung zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden die Dämmmaterialien in den Bildern F.1 und F.2 in die Kategorien «starre» und «flexible» Materialien unterteilt.

1. Für «starre» Dämmmaterialien mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\leq 0,030$ W/(m K)

z. B. PIR

Rohrdimension DN	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	
Kaltwasser-Temperatur	minimale Dämmstärke in mm													
6 °C bis kleiner 10 °C	30											40	(1)	
10 °C bis kleiner 14 °C	30													(1)
14 °C bis kleiner 18 °C	30													(1)
18 °C und wärmer	30													(2)
	30 mm = die minimale Materialstärke, damit die Dämmung fachgerecht angebracht werden kann.													

2. Für «starre» Dämmmaterialien mit einer Wärmeleitfähigkeit von $> 0,030$ – $\leq 0,040$ W/(m K)

z. B. Schaumglas, Polyethylen

Rohrdimension DN	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	
Kaltwasser-Temperatur	minimale Dämmstärke in mm													
6 °C bis kleiner 10 °C	30							40			50			(3)
10 °C bis kleiner 14 °C	30										40			(3)
14 °C bis kleiner 18 °C	30												40	(3)
18 °C und wärmer	30													(3)
	30 mm = die minimale Materialstärke, damit die Dämmung fachgerecht angebracht werden kann													

Fortsetzung Bild F.1

3. Für «flexible» Dämmmaterialien mit einer Wärmeleitfähigkeit von $> 0,030 - \leq 0,040 \text{ W/(m K)}$

z. B. synthetischer Kautschuk

Rohrdimension DN	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
Kaltwasser-Temperatur	minimale Dämmstärke in mm												
6°C bis kleiner 10°C	19		25					32			38		50
10°C bis kleiner 14°C	19							25		32			38
14°C bis kleiner 18°C	19								25				32
18°C und wärmer	19												
	19 mm = die minimale Materialstärke, damit die Dämmung fachgerecht angebracht werden kann												

(1)
(1)
(1)
(2)

4. Für «starre» Dämmmaterialien mit einer Wärmeleitfähigkeit von $> 0,040 - \leq 0,050 \text{ W/(m K)}$

z. B. Schaumglas, Polyethylen

Rohrdimension DN	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
Kaltwasser-Temperatur	minimale Dämmstärke in mm												
6°C bis kleiner 10°C	30				40				50			60	80
10°C bis kleiner 14°C	30							40				50	60
14°C bis kleiner 18°C	30												40
18°C und wärmer	30												
	30 mm = die minimale Materialstärke, damit die Dämmung fachgerecht angebracht werden kann												

(1)
(1)
(1)
(2)

5. Für «flexible» Dämmmaterialien mit einer Wärmeleitfähigkeit von $> 0,040 - \leq 0,050 \text{ W/(m K)}$

z. B. halogenfreier synthetischer Kautschuk

Rohrdimension DN	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
Kaltwasser-Temperatur	minimale Dämmstärke in mm												
6°C bis kleiner 10°C	25		32		38*	44*			50*			**	**
10°C bis kleiner 14°C	19	25					32	38*	44*			50*	**
14°C bis kleiner 18°C	19					25			32				44*
18°C und wärmer	19						25						
	19 mm = die minimale Materialstärke, damit die Dämmung fachgerecht angebracht werden kann												

(4)
(4)
(4)
(4)

(1) Dämmstärken gemäss Merkblatt «Technische Dämmung in der Gebäudetechnik», Suissetec 2021.

(2) Dämmstärken etwas strenger als im Suissetec-Merkblatt. In diesem werden die Stärken für Temperaturen von 19°C und wärmer empfohlen.

(3) Dämmstärken abgeleitet aus den Werten des Suissetec-Merkblattes – die Werte fehlen im Suissetec-Merkblatt.

(4) Die Werte wurden aus den Werten von (2), (3) und (4) extrapoliert.

* Brandschutz-Zulassung halogenfreier Produkte prüfen.

** Aufgrund der Brandschutzvorschriften nicht erlaubt.

Die Wärmeleitfähigkeit ist bei 25°C und 60 % rel. Luftfeuchtigkeit zu bestimmen.

Dämmung der Kältespeicher

Auch hier wird die minimal erforderliche Dämmstärke – wie bei den Kälteleitungen – in erster Linie durch den Kondensat-schutz bestimmt.

Um Kondensatbildung zu vermeiden, müssen gemäss SIA 384/4 (2025) vor Ort gedämmte Speicher auf Füßen stehen und dürfen nicht auf einem Ring montiert werden.

Speicher mit werkseitig aufgebracht, geschäumter Dämmung dürfen hingegen auf einem Ring stehen, sofern der Hersteller gewährleistet, dass dabei kein Kondensat entsteht.

Zudem ist zu beachten, dass Dämmungen mit synthetischem Kautschuk – aufgrund der aktuellen Vorgaben des Brandschutzes – maximal 60 mm betragen dürfen. Und bei den Dämmungen mit halogenfreiem, synthetischem Kautschuk ist die Brandschutz-Zulassung zu prüfen (speziell für Dämmungen von mehr als 32 mm).

Wärmeleitfähigkeit	≤ 0,030 W/(m K)		> 0,030 – ≤ 0,050 W/(m K)	
	beispielsweise: PIR		beispielsweise: Schaumglas, Polyethylen, synthetischer Kautschuk oder halogenfreier synthetischer Kautschuk	
Speichergrosse	≤ 2000 Liter	> 2000 Liter	≤ 2000 Liter	> 2000 Liter
Kaltwasser-Temperatur	minimale Dämmstärke in mm		minimale Dämmstärke in mm	
6 °C bis kleiner 10 °C	100	120	110 ^{1,2}	150 ^{1,2}
10 °C bis kleiner 14 °C	70	80	83 ^{1,2}	100 ^{1,2}
14 °C bis kleiner 18 °C	50	60	64 ^{1,2}	75 ^{1,2}
18 °C und wärmer	40 ³	40 ³	32 ³	32 ³

Die Dämmstärken basieren weitgehend auf den Werten des Suissetec-Merkblattes Technische Dämmung (2021).

- 1 Dämmungen mit synthetischem Kautschuk dürfen – aufgrund der aktuellen Vorgaben des Brandschutzes – maximal 60 mm betragen.
- 2 Bei halogenfreiem synthetischem Kautschuk muss die Brandschutzzulassung geprüft werden.
- 3 Dämmstärken etwas strenger als im Suissetec-Merkblatt. In diesem werden die Stärken für Temperaturen von 19 °C und wärmer empfohlen.

Die Wärmeleitfähigkeit ist bei 25 °C und 60 % rel. Luftfeuchtigkeit zu bestimmen.

Bild F.2:
Empfohlene minimale
Dämmstärken von
Kältespeichern.

Anhang G

Bemessung des Kältespeichers

Die Norm SIA 384/4 (2025) beschreibt, wie das erforderliche Mindestvolumen eines Kältespeichers zu ermitteln ist. Je nach Situation erfolgt die Bemessung auf eine der folgenden Arten:

- A: Basierend auf der minimalen Laufzeit des Verdichters
- B: Basierend auf dem Bedarf des grössten Kälteverbrauchers

Unterscheiden sich die beiden berechneten Volumina deutlich, wird zur Plausibilisierung zusätzlich eine dritte Berechnung durchgeführt:

- C: Ermittlung des Volumens auf Basis des minimal erforderlichen Volumenstroms.

A Speichervolumen anhand der minimalen Laufzeit des Verdichters

Das minimale Volumen des Kältespeichers richtet sich nach der Zeit, die zwischen Ab- und Einschalten des Verdichters abgewartet werden muss.

$$V_{\text{Speicher A}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Verdichter,min}} \cdot t_{\text{Verdichter,min}} \cdot 60}{c \cdot \rho \cdot \Delta T}$$

Gleichung G1. Quelle: SIA 384/4 (2025)

$V_{\text{Speicher A}}$	Volumen des Kältespeichers, in m^3
$\dot{Q}_{\text{Verdichter,min}}$	minimale Kälteleistung des Verdichters, in kW
$t_{\text{Verdichter,min}}$	minimale Laufzeit des Verdichters gemäss Bild G.2, in Minuten
c	Wärmekapazität des Speichermediums, in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Kaltwasserverbraucher, in K
ρ	Dichte des Speichermediums, in kg/m^3
60	Umrechnung von Minuten in Sekunden

B Speichervolumen anhand des grössten Kälteverbrauchers

Hier bestimmt die Kälteleistung des grössten Kälteverbrauchers das minimale Volumen des Kältespeichers.

$$V_{\text{Speicher B}} = \frac{\dot{Q}_{\text{KW-V,max}} \cdot t_{\text{Sprung}}}{c \cdot \Delta T \cdot \rho}$$

Gleichung G2. Quelle: SIA 384/4 (2025)

$V_{\text{Speicher B}}$	Volumen des Kältespeichers, in m^3
$\dot{Q}_{\text{KW-V,max}}$	Kälteleistung des grössten Kaltwasserverbrauchers, der zu- oder abgeschaltet werden kann, in kW
t_{Sprung}	Zeitdauer, bis die Kälteerzeugung auf den grössten Leistungssprung der Verbraucher reagiert, in s (siehe Gleichung G4)
c	Wärmekapazität des Speichermediums, in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Kälteverbraucher, in K
ρ	Dichte des Speichermediums, in kg/m^3

C Speichervolumen anhand des minimalen Volumenstroms

Der minimal notwendige Volumenstrom über den Verdampfer und die Speicherladezeit geben das minimal notwendige Speichervolumen vor.

$$V_{\text{Speicher C}} = \frac{(\dot{Q}_{0,\text{min}} - \dot{Q}_{\text{Kälte}}) \cdot t_{\text{Ladung}}}{c \cdot (T_{\text{EK}} - T_{\text{AK}}) \cdot \rho}$$

Gleichung G3. Quelle: SIA 384/4 (2025)

$V_{\text{Speicher C}}$	Volumen des Kältespeichers, in m^3
$\dot{Q}_{0,\text{min}}$	Verdampferleistung bei minimalem Massenstrom des Kälteerzeugers, in kW
$\dot{Q}_{\text{Kälte}}$	minimaler Leistungsbezug der Kälteverbraucher, in kW
T_{EK}	Verdampfer-Eintrittstemperatur, in $^{\circ}\text{C}$
T_{AK}	Verdampfer-Austrittstemperatur, in $^{\circ}\text{C}$
t_{Ladung}	Speicherladezeit, in s (der Standard-Wert für die Speicherladezeit beträgt 900 s)
c	spezifische Wärmekapazität von Wasser, in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ρ	Dichte in kg/m^3 (die Dichte von Wasser bei 4°C beträgt ca. $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)

Die Reaktionszeit des Speichers (t_{Sprung}) kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$t_{\text{Sprung}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Kälte,max}} \cdot t_{\text{VZZ}} \cdot 60 \cdot f_{\text{komplex}}}{\dot{Q}_{\text{Verdichter,max}}}$$

Gleichung G4. Quelle: SIA 384/4 (2025)

t_{Sprung}	Zeitdauer, bis die Kälteerzeugung auf den grössten Leistungssprung der Verbraucher reagiert, in s
$\dot{Q}_{\text{Kälte,max}}$	Leistung des grössten zu bzw. abschaltenden Kaltwasserverbrauchers, in kW
t_{VZZ}	Verdichter-Zuschalt-Zeitkonstante, in Minuten (Bild G.1)
f_{komplex}	Komplexitätsfaktor (Bild G.3)
$\dot{Q}_{\text{Verdichter,max}}$	maximale Kälteleistung des Verdichters, in kW
60	Umrechnung von Minuten in Sekunden

Verdichter-Zuschalt-Zeitkonstanten (VZZ)

Die Zuschalt-Zeitkonstante eines Verdichters gibt die Mindestzeit an, die nach dessen Abschaltung vergehen muss, bevor er erneut eingeschaltet werden darf. Bei Kälteerzeugern mit mehreren Verdichtern richtet sich diese Zeitkonstante nach dem Verdichter mit der höchsten Kälteleistung bzw. nach jenem Verdichter, dessen Zuschaltung den grössten Leistungssprung verursacht. Die Verdichter-Zuschalt-Zeitkonstante ist abhängig von der Bauart, der Betriebsart und der Kälteleistung und wird im Bild G.1 in Minuten angegeben.

Bild G.1:
Verdichter-Zuschalt-Zeitkonstanten (t_{VZZ}) in Minuten.
Quelle SIA 384/4 (2025)

Minimale Laufzeit des Verdichters

Die minimale Laufzeit eines Verdichters bezeichnet die kürzeste Zeitspanne, die ein Verdichter nach dem Einschalten ununterbrochen in Betrieb bleiben muss. Bei

Bild G.2:
Minimale Laufzeit der Verdichter ($t_{Verdichter,min}$) in Minuten.
Quelle SIA 384/4 (2025)

Verdichterbauart	Betriebsart	Kälteleistung in kW		
		10 bis < 100	100 bis < 200	≥ 200
Rollkolben-Verdichter	Ein/Aus	5	- ¹	- ¹
	Inverter	8	- ¹	- ¹
Scroll-Verdichter	Ein/Aus	5	5	6
	Inverter	8	8	9
Hubkolben-Verdichter	Ein/Aus	8	8	10
	Inverter	12	12	15
Schrauben-Verdichter	Ein/Aus	8	8	10
	Inverter	12	12	15
Turbo-Verdichter	Inverter	- ¹	15	15

¹ Die Bauart ist in diesem Leistungsbereich nicht üblich.

Verdichterbauart	Kälteleistung des einzelnen Verdichters in kW			
	10 bis < 100	100 bis < 200	200 bis < 500	≥ 500
Rollkolben-Verdichter	10	- ¹	- ¹	- ¹
Scroll-Verdichter	10	15	20	25
Hubkolben-Verdichter	15	20	25	30
Schrauben-Verdichter	15	20	25	30
Turbo-Verdichter	- ¹	20	30	30

¹ Die Bauart ist in diesem Leistungsbereich nicht üblich.

Kälteerzeugern mit mehreren Verdichtern richtet sich diese Laufzeit nach dem Verdichter mit der höchsten Kälteleistung bzw. nach jenem, dessen Zuschaltung den grössten Leistungssprung verursacht. Die minimale Laufzeit ist abhängig von der Verdichterbauart und der maximalen Kälteleistung des einzelnen Verdichters und wird im Bild G.2 in Minuten angegeben.

Komplexitätsfaktor der Klimakälteanlage

Mit zunehmender Komplexität der Klimakälteanlage benötigt das Zusammenspiel der verschiedenen Systeme mehr Zeit, wodurch ein grösseres Speichervolumen benötigt wird. Dieser Effekt wird durch den sogenannten Komplexitätsfaktor berücksichtigt.

So wird das massgebende Kältespeichervolumen bestimmt

In einem ersten Schritt werden die beiden berechneten Speichervolumen

- $V_{\text{Speicher A}}$
- $V_{\text{Speicher B}}$

betrachtet. Das grössere der beiden Volumina bestimmt das (minimale) Volumen des Kältespeichers.

Weichen die berechneten Speichervolumina ($V_{\text{Speicher A}}$ und $V_{\text{Speicher B}}$) wesentlich voneinander ab, kann in einem zweiten Schritt mit der Berechnung des Speichervolumens über den minimal notwendigen Volumenstrom $V_{\text{Speicher C}}$ das minimal notwendige Volumen plausibilisiert werden. Zeigt die Plausibilisierung, dass das im ersten Schritt bestimmte Speichervolumen erheblich zu gross ist, kann das minimal notwendige Speichervolumen reduziert werden.

Bild G.3:
Komplexitätsfaktor (f_{Komplex}).
Quelle: SIA 384/4 (2025)

Kälteerzeugung	Komplexitätsfaktor	Bemerkung
einfache Kälteerzeugung	1,0	eine Kälte-Wärme-Maschine
komplexe Kälteerzeugung	1,5	mehrere Kälte-Wärme-Maschinen
paralleler Heiz- und Kühlbetrieb	2,0	

Modell-Wirtschaftlichkeitsberechnung

Wann ist eine umwelt- und energieschonende Kältelösung wirtschaftlich – und wann nicht? Früher konnten Planer die Eingabegrößen für Wirtschaftlichkeitsberechnungen weitgehend frei wählen. Dadurch war es möglich, das Ergebnis – bewusst oder unbewusst – zu beeinflussen. Um eine gewisse Standardisierung und damit Vergleichbarkeit zu ermöglichen, hat die SIA 384/4 (2025) eine Modell-Wirtschaftlichkeitsberechnung eingeführt.

Diese basiert auf der statischen Methode zur Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) gemäss SIA 480. Es handelt sich hierbei um eine Modellrechnung, die verschiedene Kältelösungen vergleichbar macht. Dafür werden standardisierte Werte und Annahmen verwendet, um einheitliche und nachvollziehbare Ergebnisse zu gewährleisten.

Wichtig: Die Modellrechnung dient ausschliesslich des Vergleiches unterschiedlicher Varianten – sie ersetzt keine betriebswirtschaftliche Bewertung einer konkreten Klimakälteanlage.

Gemäss SIA 384/4 (2025) gilt eine umwelt- und energieschonende Lösung – beispielsweise eine Klimakälteanlage mit Wärmerückgewinnung – als wirtschaftlich, wenn ihre Lebenszykluskosten höchstens 5 % über einer herkömmlichen Lösung ohne Wärmenutzung liegen.

Umweltfreundliche Lösungen gelten als wirtschaftlich, wenn ihre Lebenszykluskosten höchstens 5 % höher sind als bei herkömmlichen Anlagen.

Der Inhalt dieses Anhangs ist weitgehend aus der SIA 384/4 (2025) entnommen. Die Abkürzungen und Indizes wurden jedoch angepasst.

H-1: Berechnung der Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskosten LCC werden wie folgt berechnet:

$$LCC_a = Amo_a + Zi_a + El_a + Inst_a - WE_a$$

$$Amo_a = \frac{Inv}{t_{Nutz}}$$

$$Zi_a = \frac{Inv \cdot ZS}{2}$$

LCC_a Lebenszykluskosten auf ein Jahr bezogen, in CHF

Amo_a jährliche Amortisationskosten über die Nutzungsdauer, in CHF

Zi_a jährliche Zinsbelastung über die Nutzungsdauer, in CHF

El_a jährliche Stromkosten des Kälteerzeugers, in CHF

$Inst_a$ jährliche Instandhaltungskosten der Klimakälteanlage (siehe Abschnitt H-5), in CHF

WE_a jährlicher Wärmeertrag, der mit der Kälte-Wärme-Maschine erzeugt wird, in CHF

Inv Investitionskosten der Klimakälteanlage, in CHF

t_{Nutz} Nutzungsdauer, in Jahren

ZS Kalkulationszinssatz, in Prozent

H-2: Amortisationskosten

Die jährlichen Amortisationskosten berechnen sich aus den Investitionskosten Inv und der Nutzungsdauer t_{Nutz} . Haben verschiedene Komponenten unterschiedliche Nutzungsdauern, sind die Investitionskosten abzugrenzen, durch die jeweilige Lebensdauer zu teilen und dann die berechneten Lebenszykluskosten zu addieren.

Beispiel:

Kälteerzeugung mit $t_{Nutz} = 15$ Jahre

Kältespeicher mit $t_{Nutz} = 25$ Jahre

$$Amo_a = \frac{Inv_{Erzeuger}}{15 \text{ Jahre}} + \frac{Inv_{Speicher}}{25 \text{ Jahre}}$$

H-2.1: Investitionskosten IC

Die Investitionen beinhalten die Ausgaben für die Erstellung

- der Kälteerzeugung (Kälteerzeuger, Kältespeicher, Wärmespeicher, Umwälzpumpen),
- des Rückkühlers (Rückkühler mit Hilfsbetrieben, Ventilatoren, Wärmeübertrager, das Rohrleitungsnetz zwischen Wärmeübertrager oder Erzeuger und Rückkühler, die Wasseraufbereitung bei nassen Rückkühlsystemen)
- und den Planungsaufwand.

Die Höhe der Investitionskosten wird durch die Planer ermittelt.

H-2.2: Nutzungsdauer t_{Nutz}

Die Nutzungsdauer entspricht der technischen Lebensdauer der Anlage. Richtwerte zur Nutzungsdauer von Klimakälteanlagen und deren Komponenten sind in SIA 480 und in der Lebensdauertabelle des Schweizerische Mieterinnen- und Mieterverbandes aufgelistet.

H-3: Zinsbelastung

Für die Berechnung der jährlichen Zinsbelastung wird der Kalkulationszinssatz benötigt.

H-3.1: Kalkulationszinssatz ZS

Als Kalkulationszinssatz wird der hypothekarische Referenzzinssatz bei Mietverhältnissen eingesetzt. Der aktuelle hypothekarische Referenzzinssatz bei Mietverhältnis-

sen ist auf der Website des Bundesamts für Wohnungswesen BWO aufgelistet.

(siehe: www.bwo.admin.ch → Mietrecht → Referenzzinssatz)

H-4: Stromkosten Kälte

Die Stromkosten berechnen sich wie folgt:

$$El_a = Q_{el} \cdot EP_{el}$$

El_a jährliche Stromkosten des Kälteerzeugers, in CHF

Q_{el} Stromverbrauch pro Jahr, in kWh

EP_{el} Strompreis, in CHF/kWh

H-4.1: Stromverbrauch Q_{el}

Strombedarf für die Kühlung des Gebäudes und der zusätzliche Verbrauch, der bei einer Wärmenutzung entsteht, wenn die Verflüssigungstemperatur angehoben werden muss (siehe A.4).

H-4.2: Abschätzung des Stromverbrauchs anhand der Kühllastberechnung

Die Planer bestimmen mittels der Leistungsbedarfsberechnung den Kühlbedarf (z. B. Berechnung gemäss SIA 380/2). Viele Kühllastberechnungs-Tools ermitteln auch direkt den Strombedarf.

H-4.2.1: Abschätzung des Stromverbrauchs mit dem Kälte-Tool

Ist nur der Kühlleistungsbedarf der Klimakälteanlage bekannt, kann der Stromverbrauch mit dem Kälte-Tool von Energie-Schweiz abgeschätzt werden. Das Kälte-Tool ermöglicht eine vereinfachte Berechnung des Stromverbrauchs einer Klimakälteanlage mit dem SEER-Wert. Dabei werden auch die Stromverbräuche der Hilfsbetriebe (Pumpen, Ventilatoren usw.) berücksichtigt.

H-4.2.2: Abschätzung des zusätzlichen Stromverbrauchs für die Wärmenutzung mit Temperaturerhebung

Wird mit der Kälte-Wärme-Maschine die Wärme aus dem Verflüssiger mit Temperaturerhebung genutzt, muss der zusätzliche Strombedarf mit eingerechnet werden.

H-4.3: Strompreis EP_{ei}

Der Strompreis wird gemäss der Übersicht Strompreise Schweiz festgelegt.

- Der Gebäudestandort bestimmt die massgebende Ortschaft.
- Die Tarife des aktuellen Jahres sind massgebend.
- Bei der Gebäudenutzung und Grösse sind die entsprechenden Tarif-Kategorien zu wählen.
- Beim Stromprodukt ist das Standard-Produkt zu wählen.

H-5: Instandhaltungskosten

Die effektiven jährlichen Instandhaltungskosten (für Wartung, Service und Instandhaltung) werden durch die Planer berechnet. Das Bild H.1 gibt Richtgrössen der zu erwartenden Instandhaltungskosten für Klimakälteanlagen mit trockenen (Bild H.2) und nassen (Bild H.3) Rückkühlern und verschiedenen Kältemitteln. Geringere Instandhaltungskosten, als den Werten aus dem (Bild H.1) zu entnehmen, müssen durch den Planer begründet werden.

Investitionskosten	Rückkühler	Kältemittel	Richtgrösse der Instandhaltungskosten
bis 200 000 CHF	trockener Rückkühler	A1 und A2L	$Inst_a = 1000 + Inv \cdot 0,03$
		A3 und B2L	$Inst_a = 2000 + Inv \cdot 0,035$
	nasser Rückkühler	A1 und A2L	$Inst_a = 2000 + Inv \cdot 0,04$
		A3 und B2L	$Inst_a = 3000 + Inv \cdot 0,045$
200 000 CHF und mehr	trockener Rückkühler	A1 und A2L	$Inst_a = 7000 + (Inv - 200\,000) \cdot 0,02$
		A3 und B2L	$Inst_a = 8000 + (Inv - 200\,000) \cdot 0,025$
	nasser Rückkühler	A1 und A2L	$Inst_a = 8000 + (Inv - 200\,000) \cdot 0,03$
		A3 und B2L	$Inst_a = 9000 + (Inv - 200\,000) \cdot 0,035$
$Inst_a$	Instandhaltungskosten von Klimakälteanlagen, in CHF pro Jahr		
Inv	Investitionskosten (inkl. Wasseraufbereitung bei nassen Rückkühlern), in CHF		
A1	Kältemittel geringer Toxizität, nicht entflammbar (z. B. HFKW)		
A2L	Kältemittel geringer Toxizität, schwer entflammbar (z. B. HFO-Kältemittel)		
A3	Kältemittel geringer Toxizität, hoch entflammbar (z. B. Propan, Propen)		
B2L	Kältemittel erhöhter Toxizität, schwer entflammbar (z. B. Ammoniak)		

Bild H.1:
Jährliche Instandhaltungskosten ($Inst_a$)
von unterschiedlichen
Klimakälteanlagen.
Quelle: SIA 384/4
(2025)

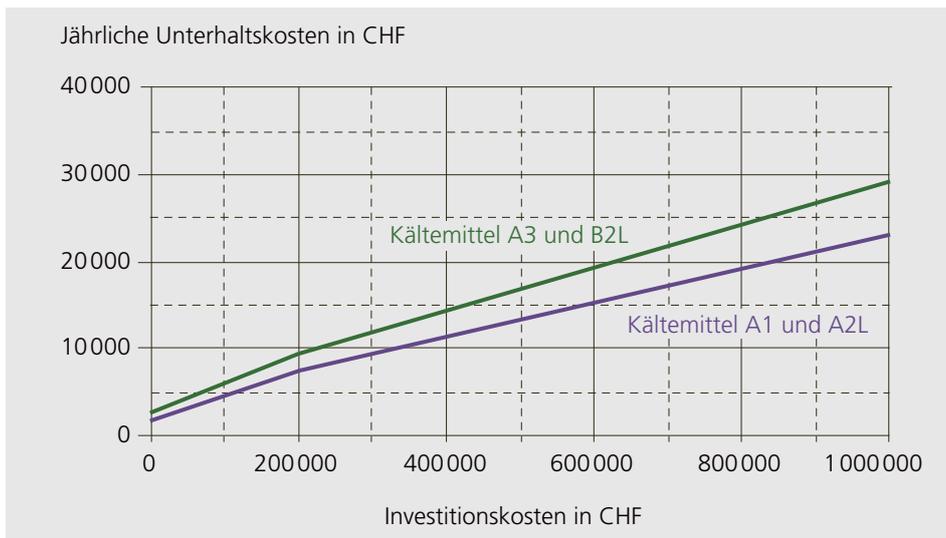


Bild H.2:
Richtgrösse der jährlichen Instandhaltungskosten für Klimakälteanlagen mit trockenen Rückkühlern.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

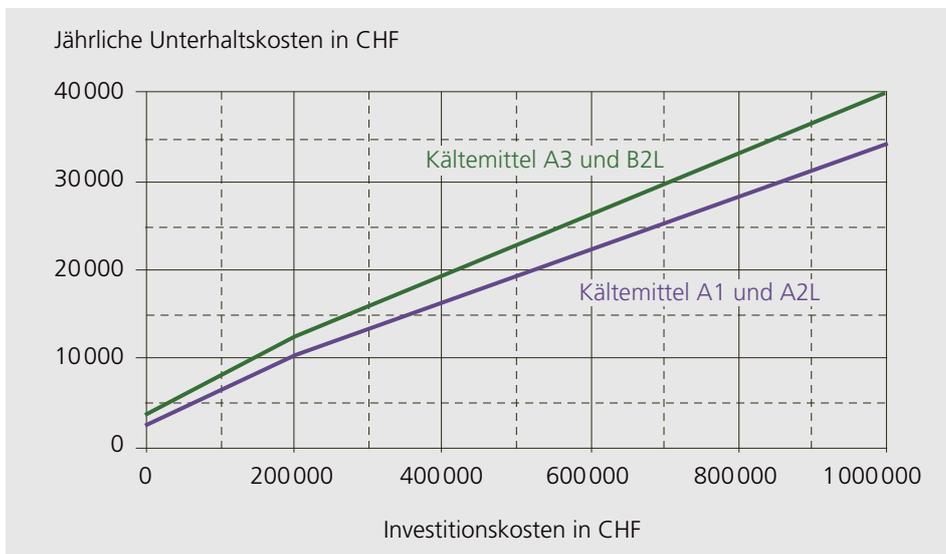


Bild H.3:
Richtgrösse der jährlichen Instandhaltungskosten für Klimakälteanlagen mit nassen Rückkühlern.
Quelle: SIA 384/4 (2025)

H-6: Ertrag der Wärme

Die nutzbare Wärme der Kälte-Wärme-Maschine wird anhand einer Gleichzeitigkeitsbetrachtung von Wärmebedarf und verfügbarer Wärme bestimmt (z.B. Stundenwerte).

$$WE_a = Q_w \cdot EP_w$$

WE_a jährlicher Wärmeertrag, der mit der Kälte-Wärme-Maschine erzeugt wurde, in CHF

Q_w genutzte Wärme, die mit der Kälte-Wärme-Maschine im Jahr erzeugt wurde, in kWh

EP_w Energiepreis für die Wärme, in CHF/kWh

H-6.1: Energiepreis Wärme EP_w

Die Planer der Heizungsanlage berechnen den Wärmepreis. Die Berechnung erfolgt mit der statischen Methode gemäss SIA 480 und umfasst dieselben Elemente wie die Modell-Wirtschaftlichkeitsberechnung für eine Klimakälteanlage (Investitionskosten, Zinsbelastung, Energiekosten und Instandhaltungskosten, jedoch ohne den Ertrag Wärme).

- Für die Energiepreise ist der Durchschnittswert der letzten drei Jahre des im Landesindex der Konsumentenpreise des Bundesamts für Statistik ausgewiesenen Preises einzusetzen.
- Der aktuelle Strompreis kann der Übersicht Strompreise Schweiz entnommen werden (siehe D2).
- Die aktuellen Energiepreise für Öl, Gas und Holzpellets können folgendem Dokument entnommen werden: «LIK, Durchschnittspreise für Energie und Treibstoffe, Monatswerte (ab 1993) und Jahresdurchschnitte (ab 1966)». <https://www.bfs.admin.ch> und Suche nach dem Dokumentennamen

Anhang I

Nahtstellen zur Gebäude-automation

Für die Einbindung der Kältemaschine in eine Gebäudeautomation müssen die Nahtstellen zwischen den beiden Systemen (Datenpunkt), deren Signal-Richtung (Eingang oder Ausgang) und deren Signal-typ (analog, digital, potenzialfreier Kontakt) definiert werden. Bild I.1 illustriert für eine Kältemaschine die wichtigsten Nahtstellen 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)

Nahtstellen-Bezeichnung	Signal	Bemerkung
Eingänge		
Notwendige Eingangssignale		
• Freigabe	DI	
• Rückmeldung Betriebsbereitschaft,	DI	
• Sollwertschiebung Kaltwassertemperatur.	AI	
Bei kleinen Kälteerzeugern müssen zwei Sollwert-Vorgaben möglich sein z. B.		
• Sollwert Kaltwassertemperatur hoch (z. B. Kühlbetrieb mit 16 °C),	DI	
• Sollwert Kaltwassertemperatur tief (z. B. Entfeuchtungsbetrieb mit 10 °C).	DI	
Bei Steuerungen mit einer Leistungsbegrenzung sind folgende Eingangssignale sinnvoll:		sofern die Steuerung dies zulässt
• Zu- bzw. Wegschaltung von einer oder von mehreren Anlagen	DI	
• stufenlose Variierung der Leistung einer einzelnen Anlage oder eines Kälteerzeugers	AI	
• Strömungswächter, der meldet, wenn der Verdampfer bzw. der Verflüssiger durchströmt wird	DI	wenn vorhanden
Zusätzlich sinnvolle Eingangssignale		
• Umschaltung auf Wärmenutzung	DI	
• Rückmeldung Hauptpumpe Kälte	DI	
• Rückmeldung Rückkühler-Pumpe	DI	
• Hauptschalterüberwachung	DI	
• Notausschalter	DI	
• Leistungsbegrenzung	AI	
• Sollwertumschaltung Kältekreislauf Vorlauftemperatur	DI	z. B. Sommer-Winter-Betrieb
Ausgänge		
Notwendige Ausgangssignale		
• Betriebsbereitschaft des Kälteerzeugers bzw. des Verdichters	DO	
• Sammelalarm	DO	
• Alarme, aufgeteilt nach Priorität 1 und 2	DO	
• Hochdruckalarm	DO	
• Niederdruckalarm	DO	
Zusätzlich sinnvolle Ausgangssignale		
• Maximalleistung	DO	
• Verdampfungsdruck	AO	
• Verflüssigungsdruck	AO	

Bild I.1:
Beispiel von Schnittstellen und deren Signale. Die Schnittstellen zu anderen Anlagekomponenten sind analog zu behandeln.

Gesamtsystem mit Kälte- und Wärmenutzung

Betriebszustände im Sommer, Herbst, Winter und Frühjahr

Im Kapitel Hydraulik wurde im Bild 8.31 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 Bild J.1 bis Bild J.4 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

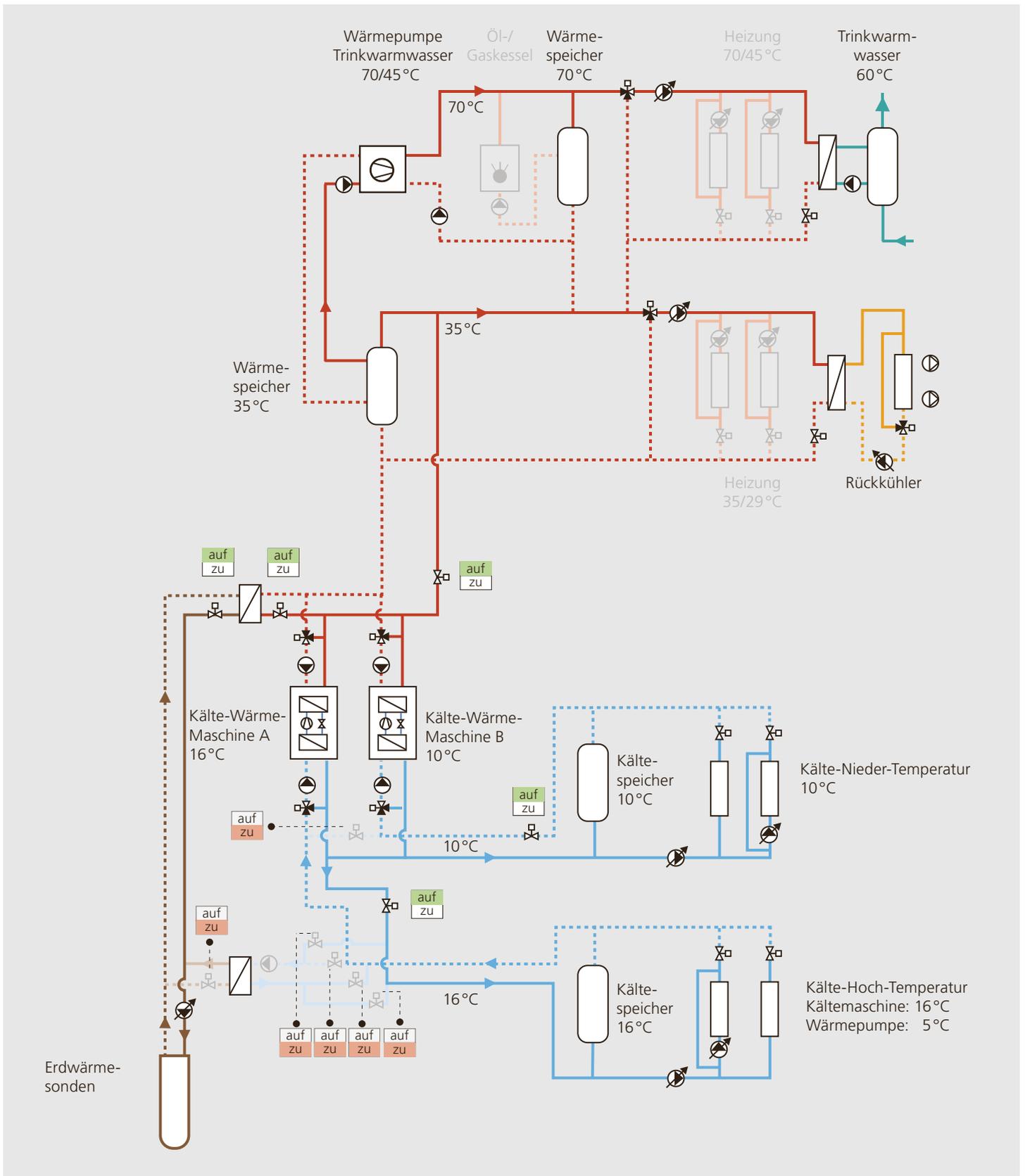


Bild J.1:
Sommer-Betrieb.

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

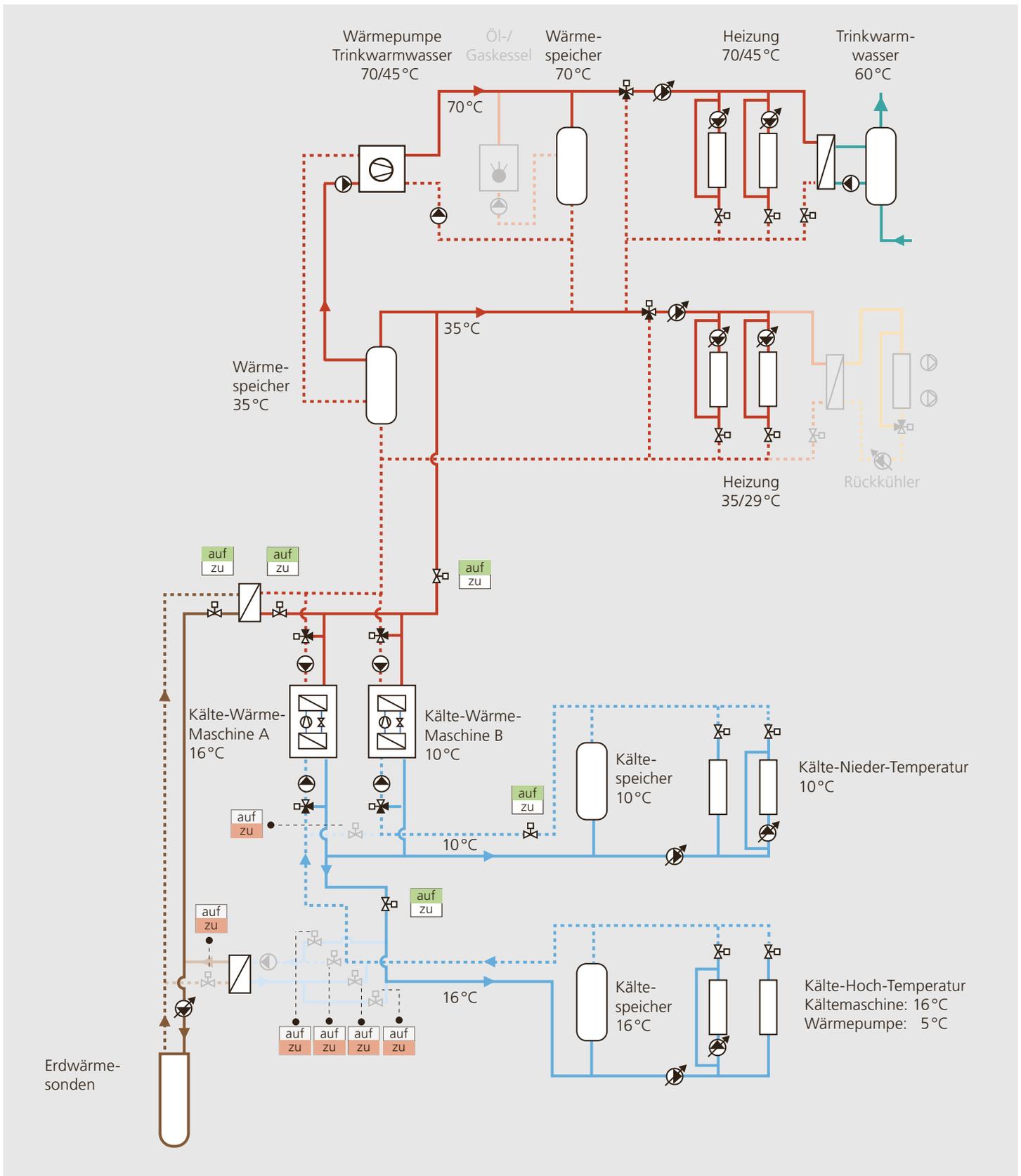


Bild J.2:
Herbst-Betrieb.

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

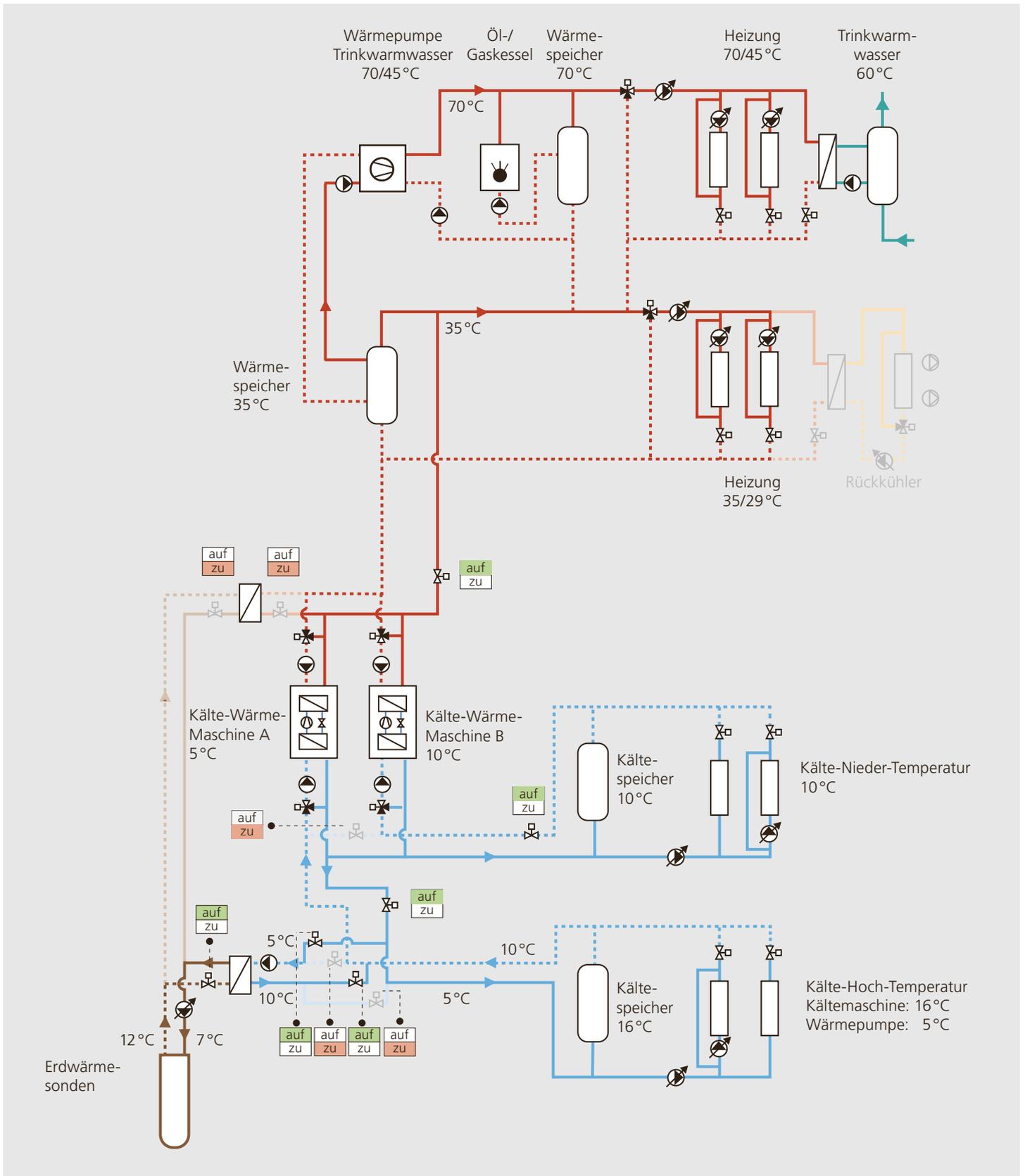


Bild J.3:
Winter-Betrieb.

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

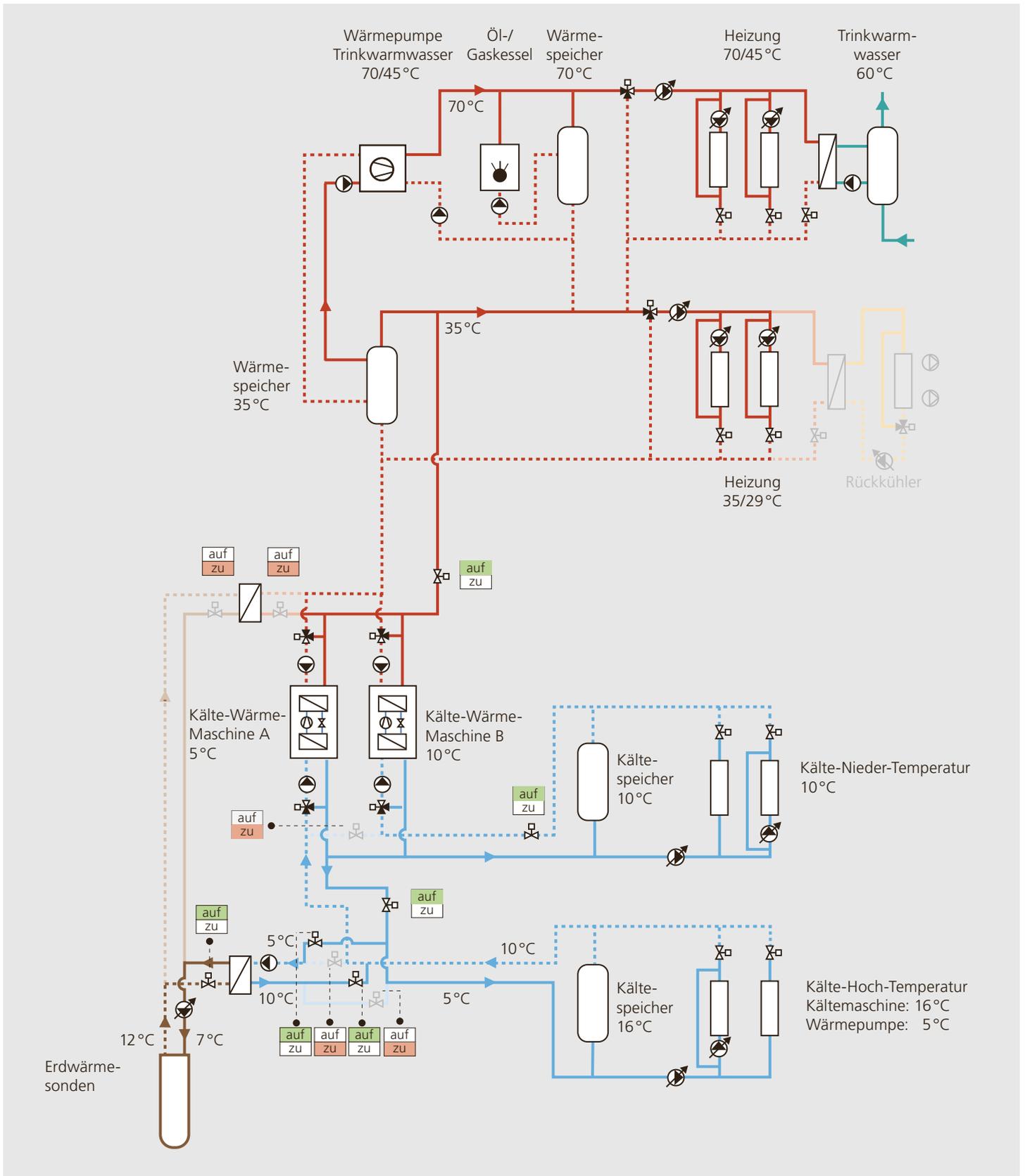


Bild J.4:
Frühlings-Betrieb.

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

$$P = \frac{\dot{V} \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} \text{ [W]}$$

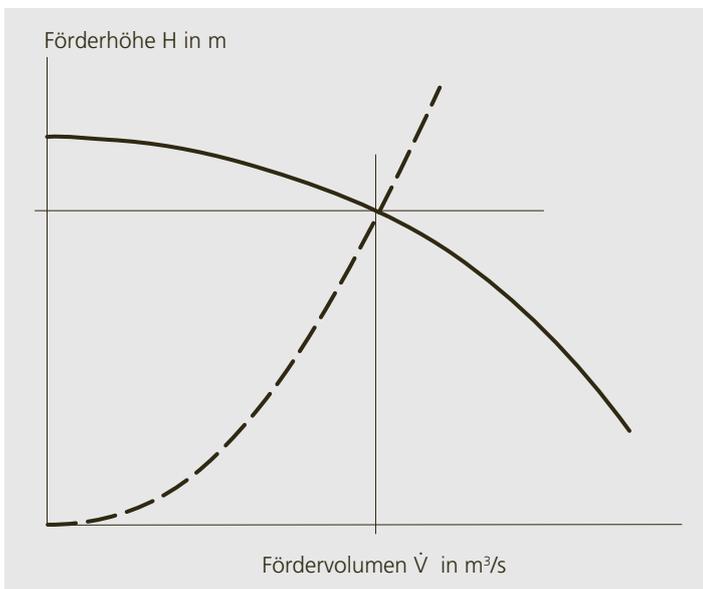
\dot{V}	m ³ /s
H	m
ρ	kg/m ³ (Wasser 1000)
g	9,81 m/s ²

Für Wasser gilt:

$$P = \frac{9810 \cdot \dot{V} \cdot H}{\eta} \text{ [W]}$$

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

Bild K.1:
Pumpencharakteristik
mit Anlagenkennlinie.



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

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \dot{V}_2 = \dot{V}_1 \cdot \left[\frac{n_2}{n_1} \right]$$

- Die Förderhöhe ist proportional zum Quadrat der Drehzahl

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left[\frac{n_1}{n_2} \right]^2 \quad \Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^2$$

- Die Leistungsaufnahme ist proportional zur dritten Potenz der Drehzahl

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{n_1}{n_2} \right]^3 \quad P_2 = P_1 \cdot \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^3$$

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 H 8,6 m
- 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

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right]^3 \quad P_2 = P_1 \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^3$$

$$P_2 = 1254 \cdot \left[\frac{70}{100} \right]^3 = 430 \text{ W} = 0,43 \text{ kW}$$

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

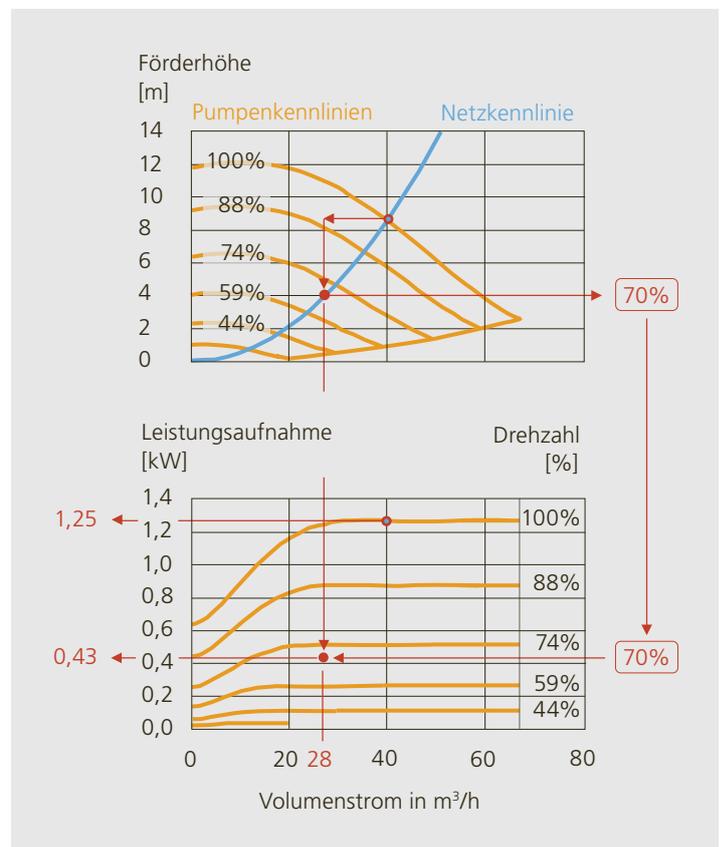
$$\text{Einsparung} = (1,25 \text{ kW} - 0,43 \text{ kW}) \cdot 60000 \text{ h} = 49200 \text{ kWh}$$

Kosteneinsparung während der gesamten Betriebsdauer für eine Pumpe:

$$\text{Einsparung} = 49200 \text{ kWh} \cdot 0,2 \text{ Fr./kWh} = 9840 \text{ Fr.}$$

Die effektive Einsparung liegt infolge der Frequenzumformer- und Wirkungsgradverluste der Pumpe und des Elektromotors 15 bis 20 % tiefer.

Bild K.2:
Pumpencharakteristik mit Betriebspunkt bei 70 % Volumenstrom.



Turbo-Verdichter (Strömungsverdichter)

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

metische 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.

Charakteristik des Turbo-Verdichters mit fester Drehzahl

Der Turbo-Verdichter wird für eine bestimmte Druckdifferenz ausgelegt. Bild L.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).

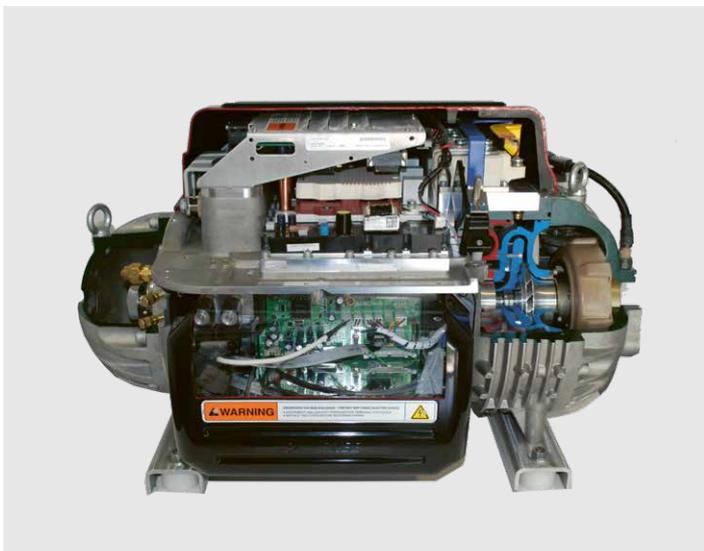
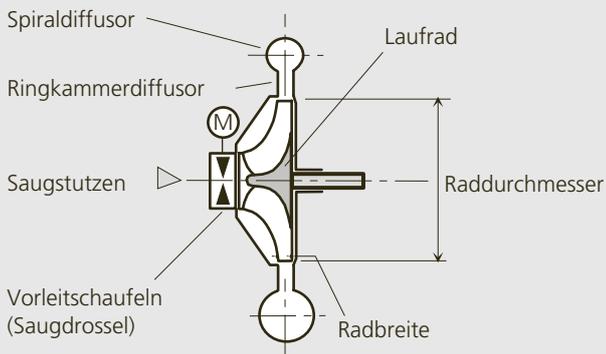
Die so genannten «Muschelkurven» zeigen den Verlauf des Wirkungsgrades. Bei Anlagen mit konstanter Drehzahl, bei Vollast, steigt die Kälteleistung des Verdichters mit abnehmender Anlage-Druckdifferenz ($T_c - T_0$). Im Auslegungspunkt erreicht der Turbo-Verdichter in der Regel den höchsten Wirkungsgrad.

Mit der Reduktion der Leistung durch die Saugdrosselregelung (Vordrallstellung) nimmt die maximal erreichbare Druckdif-

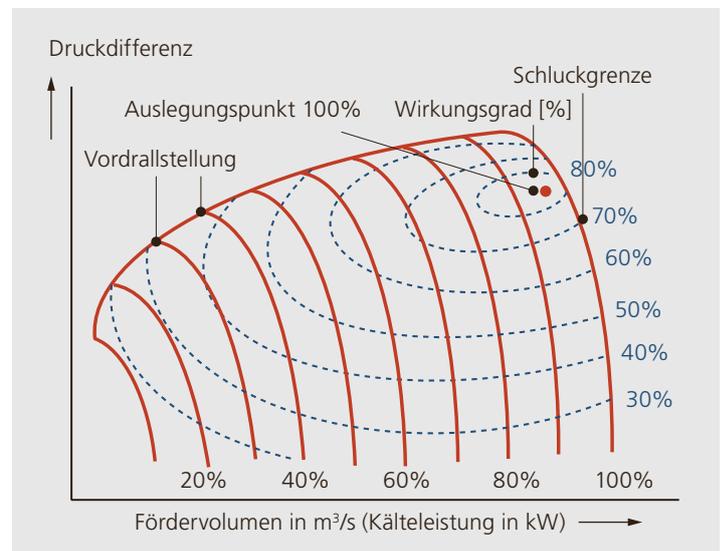
Bild L.3:
Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit konstanter Drehzahl.

Bild L.1 (oben):
Prinzip eines Turbo-Verdichters.

Bild L.2 (unten):
Halbhermetischer Turbo-Verdichter.
Quelle: Danfoss



Jahren im Klimabereich stellt der halbher-



ferenz ab. Bei starker Drosselung und zunehmend geschlossenen Vordrallschaufeln geht der Wirkungsgrad des Verdichters stark zurück.

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 L.4:
Betriebscharakteristik
eines Turbo-
Verdichters mit
Darstellung der
Pumpgrenze.

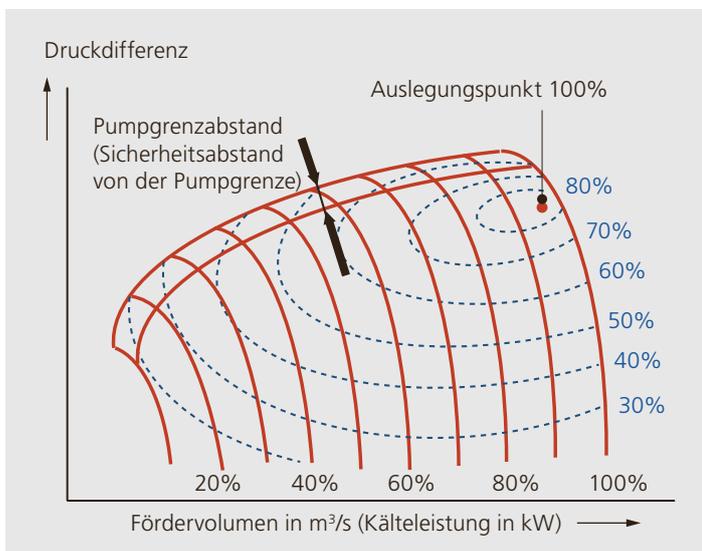
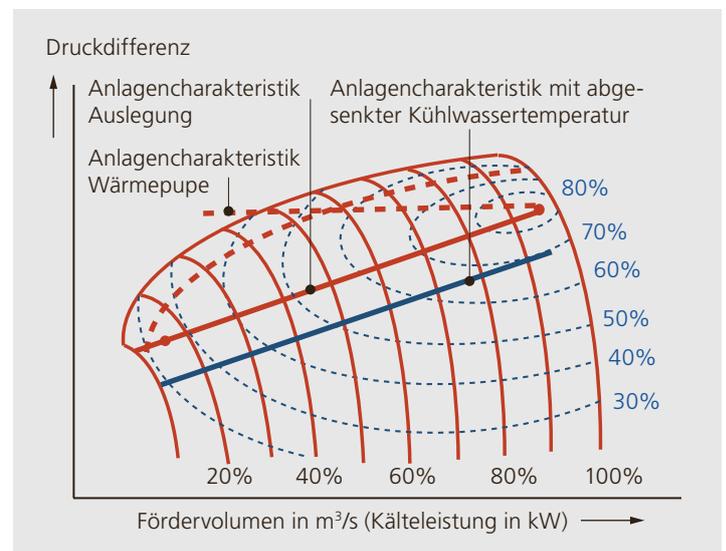


Bild L.5:
Anlagen- und Betriebs-
charakteristik eines
Turbo-Verdichters mit
eingetragenen Anla-
gecharakteristiken.



Charakteristik des Turbo-Verdichters mit variabler Drehzahl

Das Bild L.6 zeigt die Charakteristik für einen Verdichter mit Drehzahlregelung. 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 L.6:
Anlagen- und Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit Drehzahlregelung.

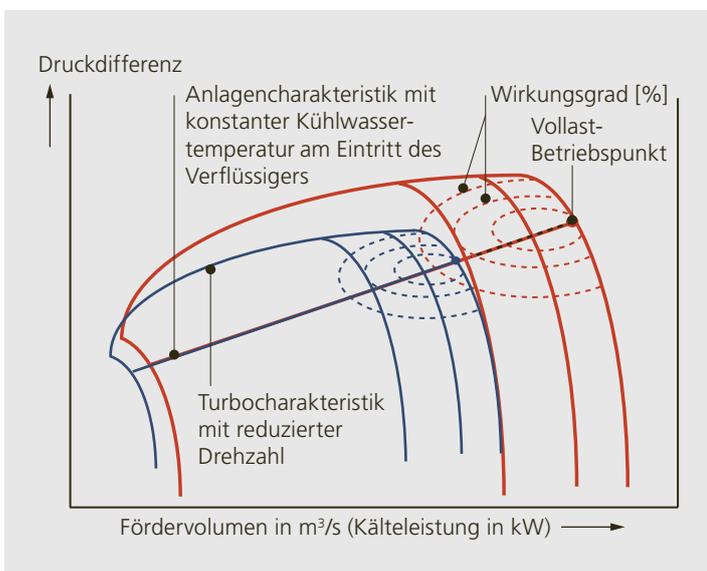
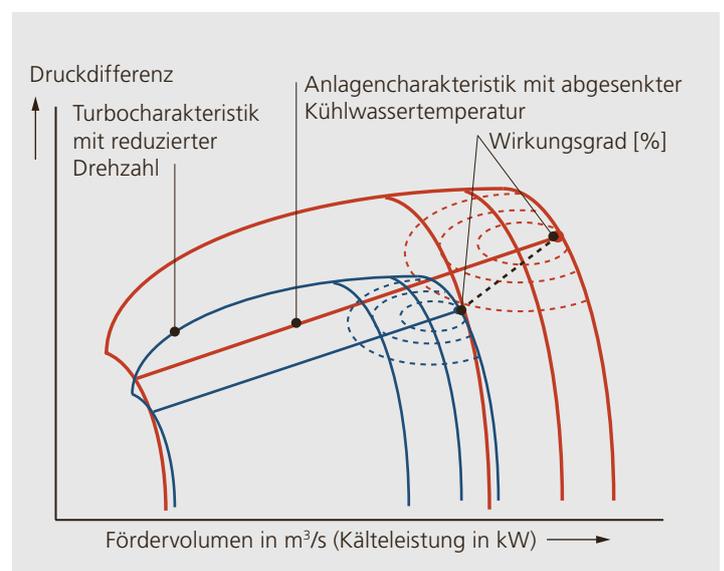


Bild L.7:
Anlagen- und Betriebscharakteristik eines Turbo-Verdichters mit Drehzahlregelung mit abgesenkten Rückkühlmedium-Temperaturen.



Anhang M

Stichwortverzeichnis

Symbole

(n+1)-Methode 46

A

Abnahme 69
 Absorptionskältemaschine 104
 Aktives Free-Cooling mit Kaltwasser 169
 Anhebung der Verflüssigungstemperatur 127
 Aqua-Cooling 120

B

Bauen ohne Kühlung 72
 Begehbare Gehäuse 48
 Behaglichkeit 110
 Beimisch-Schaltung 156
 Betriebsoptimierung 71
 Bodenheizung 113

C

Carnot-Prozess 30
 Checkliste: Konzeption 62
 CO₂ 132
 COP_{Kälte} 10
 COP_{Kälte+Wärme} 219
 COP_{Wärme} 10

D

Dachaufgestellte Kompakt-Kälteerzeuger 130
 Dichtigkeitsprüfung 71
 Direktverdampfung 183
 Direktverflüssigung 183
 Drehzahlregulierte Pumpe 152
 Drosselschaltung 156
 Druckentlastungseinrichtungen 99
 DX-/DV-Systeme 225

E

Einspritzschaltung 156
 Eisspeicher 181
 Elektronisches Expansionsventil 98
 Elektrothermischer Verstärkungsfaktor (ETV) 208
 Energieeffizienz 205
 Energie-Messkonzept 57
 Energiespeicher 163
 Energy Efficiency Ratio (EER) 207
 Entfeuchtung 211

Enthalpie 28
 Enthitzung 31
 Erdreich-Regeneration 136
 Expansionsventil 75, 199

F

Flächenkühlsysteme 112
 Free-Cooling 137

G

Garantieabnahme 57
 Geo-Cooling 120
 Getrennte Kreisläufe 101
 Global Warming Potential (GWP) 38
 Glykol 180

H

Heissgas-Enthitzung 131
 Hochdruck 32
 Hybride Trockenrückkühler 142
 Hydraulischer Abgleich 150
 Hydraulische Schaltungen 147
 Hydraulische Systemtrennung 159

I

Inbetriebsetzung 70
 Isentrope 29

K

Kältebedarf 60
 Kältemittel 34, 236
 Kältemittel-Füllmenge 50
 Kaltwasserspeicher 163
 Kaltwassertemperaturen 60, 108
 Klimakonvektoren 111
 Kombinierte Kälte- und Wärmenutzung 219
 Komfortkühlung 111
 Kontrollierte Entfeuchtung 109
 Kühldecken 112
 Kühlquellen 107
 Kurzzeitige Wärmespeicher 135

L

Latente Wärme 26
 Laufzeit des Ventiltriebs 153
 Legionellen 142
 Leistungsregulierung 187

Leistungszahl ϵ 30
log p,h-Diagramm 28
Luftzirkulationen 138
Lüftungsgerät 115
Luftverdampfer 93

M

Messfühler 200
Minimaltemperaturbegrenzung 193

N

Niederdruck 32
Nutztemperatur 107

O

Ohne Entfeuchtung 110
Ozonabbau Potenzial 38

P

Photovoltaik 22
Propan 52, 130, 154
Pufferspeicher 163
Pumpen 149

R

Redundanz 47
Regulierung 183
Rohrleitungen 175
Rohrleitungsnetz 149

S

Sauggasüberhitzung 31
Schallemissionen 65
Schnittstellen 184
Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) 208
Sensible Wärme 26
Sequenz-Regulierung 189
SIA-Phasen 65
Sicherheitseinrichtungen 197
Sicherheitsmassnahmen 50
Sollwert-Schiebung 189
Speicher 149
Spezifisches Volumen 29
Steuerung 183
Stolpersteine 66

T

Taupunktschiebung 190
Technische Speicher 163
Teilentfeuchtung 110
Teillastverhalten 211

Temperaturregelung 187
TEWI 39
Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) 112
Thermostatisches Expansionsventil 98
Trinkwarmwasser 128
Trockenexpansion 92
Trockenrückkühler 139

U

Überfluteter Wärmeübertrager 92
Umluftkühler 112
Unterkühlung 31, 237

V

Ventile 149
Verdampfer 75
Verdichter 75
Verdichterbauarten 82
Verdunstungsrückkühler 139
Verflüssiger 75
Verfügbarkeit 46
Verschmutzungsfaktor 91
Volumetrische Kälteleistung 38

W

Wärmenutzung 219
Wärmepumpenboiler 128
Wärme saisonal speichern 136
Wärmeträger 34
Wärmeübertrager 75
Wartung 71
Wasser-Glykol-Gemisch 175
Wirkungsgrad η 30

Z

Zweistufige Verdichtung 86

Willkommen
in der Welt
der Kühlung.



Sicherer, genauer und effizienter Betrieb von wichtigen Anlagen

Belimo Energy Valve™

Dieses intelligente Ventil stellt sicher, dass der Kühlkreislauf nicht mit einer zu geringen Temperaturspreizung (Delta T) betrieben wird. Das Belimo Energy Valve™ ermöglicht eine druckunabhängige Durchflussregelung sowie eine transparente Überwachung des Heiz- oder Kühlsystems.

Die intelligente Steuerung von Heiz-, Kühl- und Lüftungslasten trägt wesentlich zur Energieeffizienz von Gebäuden bei. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei der Heiz- und Kühlwasserkreislauf, also die Hydraulik eines Gebäudes.

Belimo xBALL

Das erste Ventil von Belimo für Kühlanwendungen, das sich ideal für den Einsatz in Kältemaschinen, Rechenzentren und Wärmepumpen eignet, ist eine Innovation, die sich durch beste Benutzerfreundlichkeit auszeichnet und höchsten Qualitätsansprüchen gerecht wird.

xBALL wurde speziell dafür entwickelt, die Überhitzung des Verdampfers kontinuierlich zu regeln und die nachweisliche Dichtheit im geschlossenen Zustand zu garantieren.

Energy Valve



xBALL



BELIMO

BELIMO Automation AG

+41 43 843 62 12, verkauf@belimo.ch, www.belimo.ch



CO₂ Kältemaschinen und Wärmepumpen

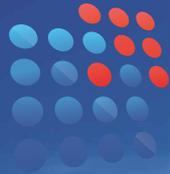
Entwicklung und Herstellung in Europa – seit über
20 Jahren.

Sichere Innenaufstellung und Top Service. Mit natürlichem Kältemittel CO₂ (R-744). Warmwassererzeugung bis zu 90 °C. Reversibel und mit einem externen luftgekühlten Gaskühler erhältlich: Leistungsbereich zwischen 30-250 kW.



Link zum Newsbeitrag

CTA
Klima • Kälte • Wärme



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 FLUGHOFSTRASSE 39A - 8152 GLATTBRUGG - WWW.ENIP.CH - +41 44 843 33 33



- > Massgeschneiderte Kälte- und Wärmelösungen
- > Beratung auf Augenhöhe mit Technikverstand
- > Nachhaltige, zukunftsichere und effiziente Systeme

3K Klima Kälte Kopp

Planung mit Weitsicht beginnt mit dem richtigen Partner



LEPLAN
Kälteplanung

30 Jahre Kältetechnik mit Wirkung

Wir entwickeln seit über 30 Jahren durchdachte, ressourcenschonende und zukunftsfähige Kältelösungen für Industrie, Gewerbe, Eisbahnen und Klimatechnik.

Unser Erfolgsrezept? Eine Kombination aus Leidenschaft, technischem Know-how, Innovationsgeist und einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit auf Augenhöhe.

Leplan AG | Rudolfstrasse 37 | 8400 Winterthur
www.leplan.ch | +41 58 911 66 99



SIEMENS

Smart Buildings:
Technology to transform buildings

| SSP KÄLTEPLANER |

KÄLTELÖSUNGEN, DIE SINN MACHEN.

In der Lebensmittelindustrie, im Detailhandel und bei der Planung für Logistikbetriebe denken wir die gesamte Kühlkette mit.

**WIR KÜMMERN UNS UM IHRE ANLIEGEN.
HEUTE UND MORGEN.**

SSP KÄLTEPLANER AG | Oensingen | Luzern | mail@kaelteplaner.ch | kaelteplaner.ch
SSP KÄLTEPLANER GmbH | D-Wolfertschwenden | mail.GER@kaelteplaner.ch | kaelteplaner.ch



TCA

THERMOCLIMA

- ✓ Modernste Klimatechnik für Wohnräume, Gewerbe und Industrie in Europa produziert
- ✓ Energieeffiziente und flüsterleise Wärmepumpen
- ✓ Massgeschneiderte Kaltwassersysteme und Grosswärmepumpen mit natürlichem Kältemittel

LEIDENSCHAFT FÜR GUTES KLIMA
www.tca.ch

Lösungen für Heiz-und Kühlsysteme. Innovativ, hochwertig und nachhaltig.

XTEGRASOL + MIETKÄLTE

XtegraSol – Ihr Partner für effiziente Gebäudetechniklösungen. Wir beraten und unterstützen Sie bei der Planung und Umsetzung von Heiz- und Kühlsystemen und für ein optimales Raumklima. Gemeinsam entwickeln wir effiziente, nachhaltige und wirtschaftlich attraktive Anlagenkonzepte.

Wir bieten Ihnen Lösungen in folgenden Bereichen:

- Energieerzeugungssysteme (Kaltwassermaschinen, Wärmepumpen)
- Mietkälte und mobile Kältelösungen
- TABS (Thermisch aktivierte Bauteilsysteme)
- Fussbodenheizungen
- Kühldecken und Kältedecken
- Renovations- und Sanierungssysteme



XtegraSol GmbH, Gäbrisstrasse 46, CH- 9056 Gais, Tel. +41 71 333 42 54, Mail info@xtegrasol.ch

