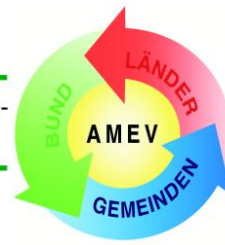




Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

Arbeitskreis Maschinen-
und Elektrotechnik



staatlicher und kom-
munaler Verwaltungen

Kälte 2026

**Hinweise zur Planung, Ausführung
und Betrieb von Kälteanlagen
und Kühlgeräten für öffentliche Gebäude**

Empfehlung Nr. 180

Stand: 31.03.2026

AMEV

Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen

Hinweise zur Planung, Ausführung und Betrieb von Kälteanlagen und Kühlgeräten für öffentliche Gebäude

(Kälte 2026)

Lfd. Nr.: 180
Aufgestellt und herausgegeben vom Arbeitskreis
Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher
und kommunaler Verwaltungen (AMEV)
Berlin 2026

Geschäftsstelle des AMEV im
Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Referat B I 4
Rudi-Dutschke-Straße 4, 10969 Berlin
Telefon: (030) 18 - 335-16856
E-Mail: amev@nlbl.niedersachsen.de

Der Inhalt dieser Broschüre darf für eigene Zwecke vervielfältigt werden. Eine Verwendung in nicht vom AMEV herausgegebenen Medien wie z.B. Fachartikeln oder kostenpflichtigen Veröffentlichungen ist vor der Veröffentlichung mit der AMEV-Geschäftsstelle zu vereinbaren.

Informationen über Neuerscheinungen erhalten Sie unter <http://www.amev-online.de>
oder bei der AMEV-Geschäftsstelle

INHALTSVERZEICHNIS

0	Vorwort	4
1	Grundlagen und Anwendungsgebiete	5
2	Kälteerzeugungsarten	8
2.1	Kompressionskältemaschine	8
2.1.1	Direkte Kühlung	13
2.1.2	Indirekte Kühlung	15
2.2	Sorptionskältemaschinen	15
2.2.1	Absorptionskältemaschine	16
2.2.2	Adsorptionskältemaschine	17
3	Kältemittel und Kältemaschinenöle.....	18
3.1	Bezeichnung der Kältemittel.....	18
3.2	Anforderungen an Kältemittel.....	19
3.3	Auswahl von Kältemitteln	20
3.3.1	Auswirkungen der F-Gase-Verordnung.....	20
3.3.2	Umstellung von Bestandsanlagen auf ein neues Kältemittel	22
3.3.3	Kältemittel für Neuanlagen	22
3.4	Kältemaschinenöle	23
4	Weitere Komponenten	25
4.1	Rückkühler	25
4.2	Kältespeicher	26
5	Planung und Ausführung	30
5.1	Auslegungskriterien (Redundanz, Teillast)	30
5.2	Netze und Hydraulik	35
5.2.1	Direkte Kühlung – Direkt verdampfende Systeme.....	35
5.2.2	Kalt und Kühlwasser	36
5.3	Regelung und Automatisierung.....	40
5.4	Bauliche Integration der Kälteanlagen.....	42
5.5	Inbetriebnahme	46
5.5.1	Dokumentation nach VDI 6026	46
5.6	Beispielhafte Systemlösungen	47
5.6.1	System mit hydraulischer Entkopplung und Freikühlung	47
5.6.2	Kältemaschinen ohne hydraulische Entkopplung, mit Bypass.....	49
5.6.3	Kaltwassersatz, luftgekühlt, mit Freikühler & Trennung	50
5.6.4	Kältemaschine mit Wärmenutzung und Erdreich-Regeneration	51
5.6.5	Fernkälteanlagen	52
6	Betrieb und Monitoring.....	55
6.1	Betreiberpflichten-/verantwortung	55
6.1.2	Betriebssicherheitsverordnung.....	56
6.2	Bedienen von Kälteanlagen	57
6.3	Monitoring	58
6.4	Instandhaltung	58
6.4.1	Unterlagen für den Betrieb von Kälteanlagen	59
6.4.2	Inspektion.....	59
6.4.3	Wartung	60
6.4.4	Instandsetzung	61
7	Anhänge:.....	62
7.1	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	62
7.2	Begriffe und Definitionen	63
7.3	Vorschriften und Regelwerke	64
7.4	Mitarbeiter.....	68

0 Vorwort

Nach dem Inkrafttreten der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung im Jahr 1991 hat der AMEV mit der „Kälte 96“ erstmals eine eigenständige AMEV-Empfehlung für die Planung, Ausführung und Betrieb von Kälteanlagen und Kühlgeräten für öffentliche Gebäude herausgegeben.

Die vorliegende Überarbeitung gibt dem Anwender Hinweise zum Umgang mit den Veränderungen in Bezug auf den Einsatz von Kältemitteln auf Grund der aktuellen F – Gase Verordnung (EU 2024/573).

Die „Kälte 2026“ stellt weiterhin die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Kältetechnik und die zugehörigen Vorschriften und Regelwerke wie beispielsweise VDI und DIN zusammenfassend dar. Anwender erhalten praxisorientierte Erläuterungen zur Kältetechnik und Hinweise für die Umstellung vorhandener oder die Installation neuer Kälteanlagen.

In der vorliegenden Fassung werden sowohl Hinweise für die Planung und Ausführung gegeben als auch vertiefende Betrachtungen für das Betreiben und das Monitoring von Kälteanlage vorgenommen.

Vorrang vor einer Optimierung der Wärmeabfuhr hat weiterhin die Reduzierung der Wärmelasten durch bauliche Maßnahmen in öffentlichen Gebäuden.

Gleichwohl sollte bei der Planung von Gebäuden berücksichtigt werden, dass neue oder komplett sanierte Gebäude für eine lange Nutzungsphase errichtet werden. Unter Berücksichtigung der sich verändernden klimatischen Bedingungen kann es notwendig werden, Anlagen zur Kühlung in der Nutzungsphase nachzurüsten. Diese Überlegungen sollten bereits bei der Planung Berücksichtigung finden. Durch die Nutzung von erneuerbarer Energie (PV – Anlagen) können Kälteanlagen energetisch effizient werden.

Die vorliegende AMEV-Empfehlung “Planung, Bau und Betrieb von Kälteanlagen (Kälte 2026)” ersetzt die Kälte 2017.

Anregungen und Verbesserungsvorschläge zur vorliegenden AMEV-Empfehlung sind willkommen und können der AMEV-Geschäftsstelle zugeleitet werden.

Dipl.-Ing. Robert Schmidt
Vorsitzender des AMEV

Dipl.-Ing. Lutz Grunicke
Obmann

1 Grundlagen und Anwendungsgebiete

An öffentliche Gebäude in Deutschland werden verstärkte Anforderungen an Energieeffizienz aber auch zur Erfüllung aller Nutzeranforderungen gestellt. Für viele Zwecke kann auf den Einsatz aktiver Kälteerzeugungssysteme nicht verzichtet werden. Unter aktiver Kälteerzeugung sollen alle jene Verfahren verstanden werden, bei denen unter Einsatz von Elektroenergie oder thermischer Energie Kälteenergie erzeugt wird. Bei der Kälteerzeugung wird Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein so hohes Temperaturniveau gehoben, so dass die Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann. Integraler Bestandteil der Kälteerzeugung sind daher auch die Komponenten der Rückkühlung.

Folgende thermodynamische Prozesse lassen sich unterteilen:

- Kompressionskälteprozess, bei dem mechanische Energie zugeführt wird:
 - Kaltdampfprozess
 - Kaltluftprozess
 - Dampfstrahlkälteprozess
- Sorptionsprozess, bei dem Wärmeenergie zugeführt wird:
 - Absorptionskälteprozess
 - Adsorptionskälteprozess
- Thermoelektrischer Kälteprozess

Die Nutzung der Verdunstungskühlung in raumluftechnischen Anlagen gehört nicht in den Bilanzkreis dieser Broschüre.

Der ideale Kreisprozess der Kälteerzeugung (theoretisch höchster Wirkungsgrad) lässt sich mittels „linkslaufendem“ Carnot-Prozess im TS-Diagramm abbilden.

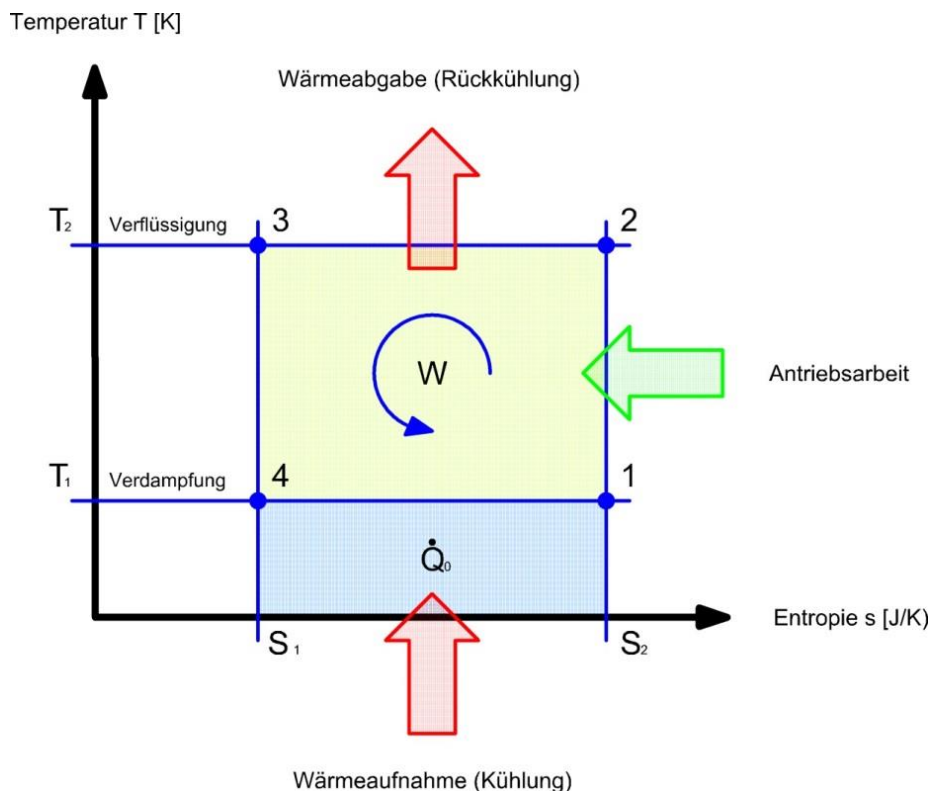


Abbildung 1, „linkslaufender“ Carnot-Prozess

T_1 = Verdampfungstemperatur (Temperatur bei der aus der Umgebung Wärme aufgenommen wird)

T_2 = Kondensationstemperatur (Temperatur bei der Wärme an die Umgebung abgegeben wird).

Die Flächen im TS-Diagramm stellen dabei die von der Umgebung aufgenommene und abgegebene Wärmemengen und die benötigte Antriebsenergie dar.

Für den Wirkungsgrad bzw. Leistungszahl (EER) der Kältemaschine gilt somit:

$$EER = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Zugeführte (elektrische) Leistung}}$$

Aus den Flächenverhältnissen lässt sich leicht ablesen, dass die Leistungszahl:

- **Steigt** bei hoher Verdampfungstemperatur und niedriger Kondensationstemperatur.
- **Fällt** mit niedriger Verdampfungstemperatur und hoher Kondensationstemperatur.

Aufgrund dieser physikalischen Gesetzmäßigkeit sind deshalb zur wirtschaftlichen Planung eines Kälteprozesses eine möglichst hohe Verdampfungstemperatur (Kühltemperatur) und eine möglichst tiefe Kondensationstemperatur anzustreben.

Dabei sind die Investitionskosten gegenüber den Betriebskosten der Anlage abzuwägen.

Die Leistungszahl der Kältemaschine ist ein Produktkennwert, dessen Bestimmung in der DIN EN 14511-2 reguliert ist. Hierin sind die Prüfbedingungen zur Bestimmung der Energieeffizienz (EER, energy efficiency ratio) bei Nennbedingungen angegeben. Dabei wird zwischen Heiz- und Kühlbetrieb unterschieden und die Systeme hinsichtlich der primär- und sekundärseitig anliegenden Medien (Luft, Wasser, Sole) gegliedert. Im Folgenden wird von Wärmeträgern gesprochen.

Aus dem EER bei Nennbedingungen kann mit Hilfe der in der DIN EN 16798-13 dargestellten Methoden die jährliche Energieeffizienz auf Basis eines Stunden- oder Monatsbilanzverfahrens ermittelt werden. Unter Verwendung von Teillastkennwerten (z. B. tabelliert im Anhang der DIN EN 13798-13 oder gemessen nach DIN EN 14825) und der Kühlenergieanforderungen $Q_{C;gen;in}$ pro Zeitintervall werden die benötigte elektrische Energie für den Verdichter $E_{C;gen;el;in}$ bzw. Wärme im Desorber $Q_{H;C;gen;abs;in}$ einer Absorptionsmaschine sowie die Hilfsenergien für Pumpen, Sensoren und Aktoren $W_{C;aux;gen}$ berechnet. Daraus lässt sich die jährliche Energieeffizienz der Anlage $\eta_{C;gen;an}$ gemäß DIN EN 16798-9 durch Summenbildung über alle Zeitintervalle t_{ci} innerhalb eines Jahres wie folgt ermitteln:

$$\eta_{C;gen;an} = \frac{\sum_{t_{ci}} Q_{C;gen;in}}{\sum_{t_{ci}} [f_{w;el}(E_{C;gen;el;in} + W_{C;aux;gen}) + f_{w;th} Q_{H;C;gen;abs;in}]}$$

Hierbei sind $f_{w;el}$ und $f_{w;th}$ Wichtungsfaktoren für die beiden Energieformen.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Anwendung im öffentlichen Bauen werden der Dampfstrahlkälteprozess und der Thermoelektrischer Kälteprozess nicht weiter erläutert.

Neben der Verfahren der aktiven Kälteerzeugung besteht auch die prinzipielle Möglichkeit der Grundwasserkühlung. Die Nutzung von Grundwasser basiert auf der Erschließung von wasserführenden Schichten. Über Saug- und Schluckbrunnen wird das Wasser zuerst gefördert, dann energetisch genutzt und anschließend in das Erdreich zurückgeführt. Nach seiner Förderung steht das Grundwasser mit etwa 12°C zur Verfügung. Durch ein geschlossenes Rohrsystem wird das Wasser zu einem Kühlregister geleitet und dann entweder direkt zur Bauteilaktivierung genutzt oder zuerst über eine Wärmepumpe auf ein tieferes Temperaturniveau gebracht und dann zu Kühlzwecken verwendet.

Für die Nutzung von Grundwasser zu Kühlzwecken ist eine Wasserrechtliche Genehmigung erforderlich (das jeweilige Landesrecht ist zu beachten). Weitere Hinweise siehe AMEV-Empfehlung Heizanlagenbau.

Generell ist eine enge Abstimmung zwischen der Art der Kälteerzeugung und der Nutzung bzw. dem Verbrauch notwendig, um die höchste energetische Effizienz zu erreichen. Insbesondere haben sich die folgenden Anwendungen mit Bedarf an Kühlung herausgestellt:

- Serverräume
- Technologische Kälte
- Gewerbekälte
- Klimakälte

Allgemein sollten bei allen Anwendungen die Minimierung der Kälteleistung Vorrang vor der Optimierung der Kälteerzeugung haben. Dies gilt aber besonders hinsichtlich der Reduzierung der Wärmelasten in den öffentlichen Gebäuden, die Vorrang vor einer Optimierung der Wärmeabfuhr über mechanische Kälteanlagen hat. Hinweise auf geeignete Bauweisen zur Reduzierung des sommerlichen Wärmeeintrages durch beispielsweise kleinere Fensterflächen, Sonnenschutz, freie Lüftungsmöglichkeiten und größere Gebäudespeichermassen gibt u. a. die AMEV-Empfehlung RLT-Anlagenbau.

2 Kälteerzeugungsarten

2.1 Kompressionskältemaschine

Kompressions-Kaltdampf-Kältemaschinen werden in nahezu dem gesamten Anwendungsspektrum der Kälte- und Klimatechnik eingesetzt. Die Ausführung, insbesondere die Verdichterbauart, hängt von der geforderten Leistung und dem Kältemittel ab. Den Kreisprozess einer Kompressionskältemaschine zeigt die folgende Prinzipdarstellung.

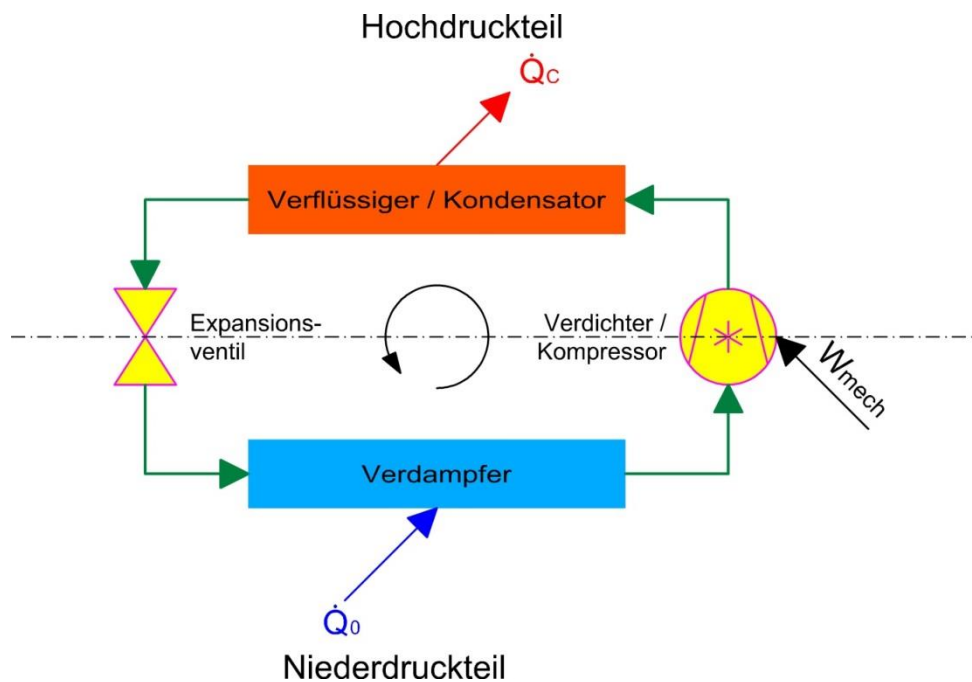


Abbildung 2, Prinzipdarstellung Kompressionskältemaschine

Die einzelnen Komponenten haben dabei folgende Funktionen:

Verdichter

Der Verdichter ist das eigentliche Herzstück der Kältemaschine, er ermöglicht die Funktion der Kälteanlage und ist der Antrieb des Kälteprozesses. Im Verdichter wird der umlaufende Kältemitteldampf bei niedrigem Druck angesaugt und auf einen höheren Druck und somit höhere Temperatur verdichtet.

Je stärker der Verdichter den Druck des Kältemittels anhebt, umso weiter steigt dessen Temperatur und somit die Leistung der Kälteanlage. Bei der Auswahl des Verdichters ist somit die realisierbare Druckerhöhung essentiell. Des Weiteren sollte der Verdichter günstig in der Anschaffung, leicht zu warten, möglichst vibrationsarm und effizient zu regeln sein.

In der Realität gibt es keinen idealen Verdichter, die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien ist projektspezifisch zu bestimmen. Je nach Anwendung liegt der Fokus bei Laufruhe und Kompaktheit, z.B. bei Kleinklimaanlagen und Wärmepumpen oder bei maximaler Leistung und Energieeffizienz, z.B. bei Industrieanlagen.

Verdichterbauarten

Verdichter werden in hermetische, halbhermetische und offene Verdichter eingeteilt.

Beim hermetischen Verdichter befinden sich Motor und Kompressor in einer verschweißten druckfesten Kapsel. Beide Bauteile befinden sich im Kältemittelstrom, der für Kühlung sorgt.

Halbhermetische Verdichter sind über einen Flansch mit dem Motor verbunden, das Kältemittel durchströmt sowohl Motor als auch Kompressor.

Offene Verdichter sind über eine Welle oder einen Antriebsriemen mit dem Motor verbunden, der Antrieb sitzt dabei außerhalb des Kältemittelstroms.

Während das Gehäuse eines hermetischen Verdichters verschweißt ist, haben halbhermetische Verdichter abnehmbare Montagekappen, die Reparaturen am Verdichter möglich machen. Beide Bauarten haben weder Welle noch Wellenabdichtung nach außen. Beim offenen Verdichter wird die Antriebswelle hingegen durch das Gehäuse geführt (DIN EN 378). Nur hermetische Verdichter gewährleisten sehr geringe Kältemittelverluste.

Für die Bauarten ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

Tabelle 1, Vor- und Nachteile der Bauarten von Verdichtern

Hermetische Verdichter		Halbhermetische Verdichter		Offene Verdichter	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
kostengünstige Serienproduktion	Reparatur nicht möglich	kostengünstige Serienproduktion	größerer Bauraum-bedarf	hohe Leistung	Wellendichtung notwendig
kein Kältemittelverlust	Leistung begrenzt	keine Wellendichtung notwendig	begrenzte Kältemittelverträglichkeit	Standardmotoren einsetzbar	größere Gefahr des Kältemittelverlustes
wenig störanfällig		kompakt und zuverlässig		Reparatur einzeln möglich	lauter im Betrieb
leise		Motorkühlung durch Kältemittel möglich			höhere Anschaffungskosten
wartungsfrei					wartungsintensiver
kompakt					vibrationsstark

Verdichterbauformen

Je nach Art der Verdichtung werden die Verdichter nach Verdrängungsmaschinen und Strömungsmaschinen unterschieden. Verdrängungsmaschinen schließen Gas in einem sich verkleinerten Raum ein, Prinzip Luftpumpe. Strömungsmaschinen führen dem Kältemittelgas mit Laufrädern Bewegungsenergie zu, welche sie anschließend durch Geschwindigkeitsreduktion in Druckenergie umwandeln. Die Auswahl der geeignetsten Verdichterbauform richtet sich nach der benötigten Kälteleistung, dem eingesetzten Kältemittel, dem Lastverhalten und der geforderten Regelgenauigkeit der Kälteanlage.

Die einzelnen Verdichterbauformen haben folgende Charakteristika:

Hubkolbenverdichter

Beim Hubkolbenverdichter erfolgt die Verdichtung und Förderung durch oszillierende Kolben, die in abgeschlossenen Zylindern arbeiten. Diese werden durch Ventile abwechselnd mit der Saug- und Druckleitung des Verdichters verbunden. Kennzeichnende Größe ist das geometrische Fördervolumen. Hubkolbenverdichter werden für ein breites Anwendungsspektrum eingesetzt und eignen sich auch für den Teillastbetrieb.

Hermetische Kolbenverdichter kommen bei kleineren Kälteanlagen bis ca. 20 kW, halbhermetische Kolbenverdichter bei mittleren Kälteanlagen und offene Kolbenverdichter bei großen Kälteleistungen zum Einsatz.

Generell erreichen Hubkolbenverdichter eher kleine Volumenströme und hohe Druckunterschiede.

Schraubenverdichter

Ein Schraubenverdichter arbeitet mit rein rotierenden Bewegungen nach dem Verdrängungsprinzip. Er zeichnet sich durch ein Minimum an bewegten Teilen, Robustheit, Kompaktheit, hohe Zuverlässigkeit, geringe Wartungsintervalle und eine lange Lebensdauer aus. Darüber hinaus hat der Schraubenverdichter gegenüber Kolbenverdichtern nur drehende Bewegungen und daher eine fast stetige Förderung, eine große Laufruhe, keine Ventile und ist unempfindlich gegen Flüssigkeitsanfall. Er kann stufenlos mittels Steuerschieber bis auf ca. 20 % geregelt werden. Der Steuerschieber ist zwischen den Rotoren axial beweglich angeordnet. Durch das axiale Verschieben des Schiebers wird dabei die wirksame Arbeitslänge der Rotoren verändert.

Scrollverdichter

Scrollverdichter sind in der Konstruktion sehr einfach. Sie bestehen aus zwei ineinander verschachtelten Spiralen, von denen eine statisch und die andere sich exzentrisch in der ersten bewegt. Dabei berühren sich die Spiralen mehrfach und bilden innerhalb der Windungen mehrere ständig kleiner werdende Kammern. Das zu verdichtende Medium gelangt in diesen Kammern bis zum Zentrum, wo es dann seitlich austritt. Die Art der Verdichtung bewirkt, dass die vom Verdichter induzierte Geräuschentwicklung sehr gering ist. Der Scrollverdichter lässt sich durch das axiale Abheben der Spiralen zueinander regeln wodurch der Ansaug- und Verdichtungsprozess unterbrochen wird. Durch das intermittierende Abheben der Spiralen ist eine Leistungsregelung zwischen 10 und 100 % möglich. Die Anwendungsgebiete des Scrollverdichters liegen vor allem bei kleineren Klimaanlage und Wärmepumpen.

Turboverdichter

Der Turboverdichter ist eine Strömungsmaschine. Die Verdichtung erfolgt durch Beschleunigung des Gasstromes im Laufrad und anschließende Umsetzung der kinetischen Strömungsenergie in Druckerhöhung. Turbokältesätze werden heute für einen großen Leistungsbereich als kompakte Aggregate gefertigt. Sie werden vorwiegend in der

Klimotechnik (Gebäudeklimatisierung) oder für Prozessanlagen, mit Kaltwasser- und Soleumlauf mit großen Kälteleistungen bei häufigem Teillastbetrieb, eingesetzt.

Neuere Turboverdichter zeichnen sich durch eine reibungsarme Magnetlagerung der Antriebswelle aus. Durch die Magnetlagerung ist es möglich den Verdichter völlig ölfrei zu betreiben. Hierdurch können Zusatzkomponenten, wie die Ölrückführung und Ölkühlung entfallen. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Wärmeübergang bei reinem Kältemittel höher ist, als der Wärmeübergang von Kältemittel / Öl-Gemischen.

Eine Übersicht der verschiedenen Verdichterbauformen und deren Leistungsbereich zeigt nachfolgende Abbildung:

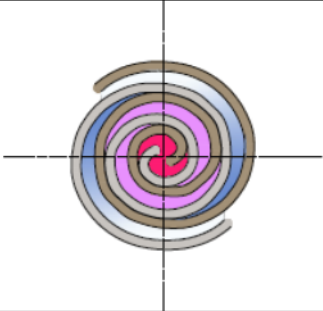
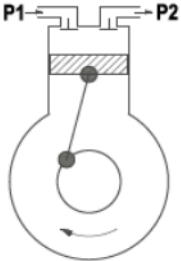
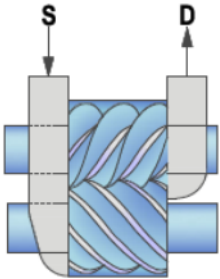
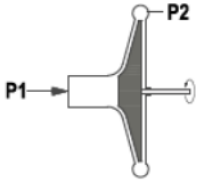
kleine und mittlere Leistungen	Scrollverdichter	
	Kolbenverdichter	
mittlere und große Leistungen	Schraubenverdichter	
Große Leistungen	Turboverdichter	

Abbildung 3, Verdichterbauformen mit Leistungsbereichen

Verflüssiger (Kondensator)

Am Verflüssiger wird die im Verdampfer aufgenommene Wärme, inklusive der Verdichtungsarbeit, an das Kühlmedium abgegeben. Das gasförmige, überhitzte Kältemittel wird auf Verflüssigungstemperatur abgekühlt, verflüssigt und unterkühlt. Die hierbei entstehende Verflüssigungswärme wird anschließend an die Umgebung abgegeben. Der Kältemitteldampf muss dabei gegenüber der Umgebung eine höhere Temperatur haben. Die Verflüssigungstemperatur ist dabei direkt proportional zum Druck, welcher durch den Verdichter erzeugt wird.

Verflüssiger gibt es in den Bauarten luftgekühlt und wassergekühlt.

Luftgekühlter Verflüssiger

Häufigste Bauform bei den Verflüssigern. Einsatz meist im kleineren Leistungsbereich. Der Verflüssiger muss frei ansaugen und ausblasen können (Schallschutz beachten).

Merkmale:

- Einsatz bei Kleinstanlagen bis zu großen Industriekühlanlagen
- unkomplizierter Betrieb / keine Hygieneprobleme (Legionellen) durch das Fehlen von Aerosolen
- relativ leichte, jedoch große Anlagenkomponenten
- hohe Investitions- und Betriebskosten aufgrund des schlechten Wirkungsgrades speziell im Sommer

Wassergekühlter Verflüssiger

Preisgünstigste Bauform der Verflüssiger. Meist eingesetzt in Kombination mit einem Rückkühlwerk.

Merkmale:

- niedrige Kondensationstemperatur
- geringe Anlagekosten
- geringer Wasserverbrauch bei Kombination mit Rückkühlverbund, jedoch Wasseraufbereitung notwendig

Die Möglichkeiten der Rückkühlung werden im Abschnitt 4.1 erläutert.

Verdampfer (Kühler)

Im Verdampfer wird der eigentliche Zweck kältetechnischer Anlagen realisiert. Das zu kühlende Medium (Luft oder ein Fluid) gibt Wärme an das im Verdampfer befindliche Kältemittel ab.

Dazu wird das flüssige Kältemittel in den Verdampfer eingespritzt. Die Wärme die das Kältemittel zum Verdampfen braucht, wird dabei dem zu kühlenden Medium entzogen, die Temperatur bleibt bei diesem Prozess trotz Wärmeaufnahme konstant. Die aufgenommene Energie wird durch Phasenänderung aufgebracht. Für den Ablauf des Verdampfungsprozesses, muss die Verdampfungstemperatur des eingespritzten Kältemittels niedriger als die Temperatur des kühlenden Fluids sein. Die sich ergebende Verdampfungstemperatur ist

dabei direkt proportional zum Druck, welcher über die Saugwirkung des Verdichters und die Verengung des Expansionsventils, gezielt erreicht wird.

Je nach zu kühlendem Medium unterscheidet man zwischen Luftkühler und Flüssigkeitskühler (direkte und indirekte Kühlung).

Des Weiteren unterscheidet man zwischen Trockenverdampfer und überfluteten Verdampfer. Heute werden meist Trockenverdampfer eingesetzt welche eine Überhitzung des Kältemittels ermöglichen.

Entspannungs- und Drosselorgane (Expansionsventil)

Das Expansionsventil befindet sich zwischen dem Verflüssiger und dem Verdampfer.

Das Drosselorgan hat die Aufgabe, die Kältemittelflüssigkeit vom Kondensationsdruck auf den Verdampferdruck zu entspannen. Durch den Druckabfall sinkt die Verdampfungstemperatur des Kältemittels, ein Teil des Kältemittels verdampft dabei bereits durch die Drucksenkung am Expansionsventil, wobei es zu einem Temperaturabfall kommt. Durch den Einsatz eines thermostatischen / elektronischen Expansionsventils kann eine Überhitzung, vollständige Verdampfung, des Kältemittels im Verdampfer erreicht werden.

Man unterscheidet:

- Entspannungsorgane für trockene Verdampfung (Kapillarrohr, thermostatisches Expansionsventil, elektronisches Expansionsventil)
- Entspannungsorgane für überflutete Verdampfung (Hochdruckschwimmerregelung, Niederdruckschwimmerregelung)

2.1.1 Direkte Kühlung

Nach der Art des Kälteentzugs unterteilt man bei Kompressionskältemaschinen in Maschinen mit direkter Kühlung, den Split-Geräten, und Maschinen mit indirekter Kühlung, den Kaltwassersätzen.

Bei der direkten Kühlung liegt der Kältemittelverdampfer direkt im abzukühlenden Stoffstrom, in der Klimatechnik im Luftstrom. Generell sind diese Anlagen energetisch wirtschaftlicher als indirekte Kühlanlagen, da hier keine Energie für den Transport des Kühlmediums benötigt wird und keine zusätzliche Temperaturdifferenz zwischen Kältemittel, Kühlmedium und Luft erforderlich ist.

Splitgeräte

Die Splitbauweise ist durch die räumlich getrennte Anordnung der vorgefertigten Hauptbaugruppen einer luftgekühlten Kompressionskälteanlage charakterisiert. Die Außeneinheit besteht aus dem Verdichter, einem Wärmeüberträger (Verflüssiger) und einem Ventilator. In der Inneneinheit sind der Verdampfer und ein Ventilator angeordnet.

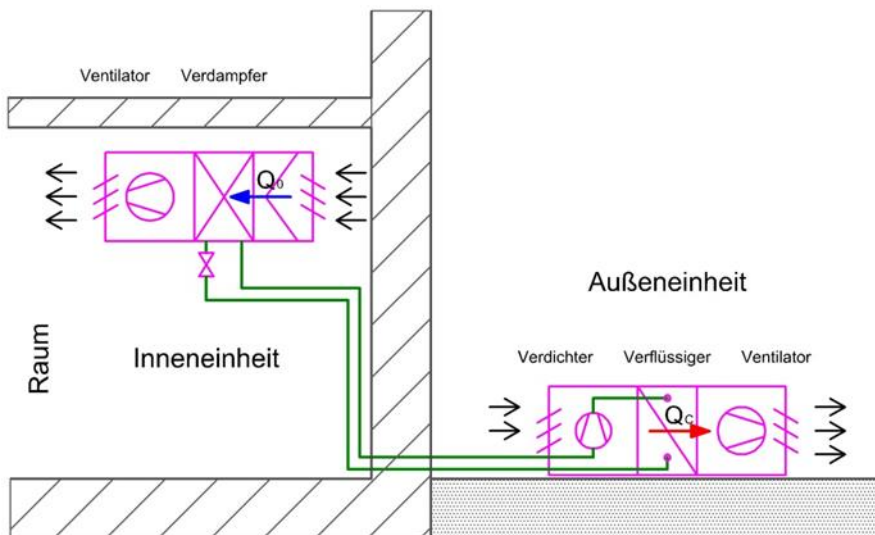


Abbildung 4, Schema einer Splitanlage

Zu unterscheiden sind Monosplitanlagen bei denen an einer Außeneinheit nur eine Inneneinheit angeschlossen ist und Multisplitanlagen an denen an einer Außeneinheit mehrere Inneneinheiten angeschlossen sind.

Multisplitanlagen können nicht nur für Insellösungen, sondern auch für mehrere, dezentrale Klimaanlage, Serverräume und einzelne Besprechungsräume eingesetzt werden.

Merkmale der Mono/Multi-Splitgeräte:

- leistungsgeregelte Verdichtereinheiten
- drehzahlgeregelte Ventilatoren mit hoher Luftleistung und niedriger Schalleistung
- umfangreiche Rohrnetze durch Kältemittel-Volumenstromregelung der einzelnen Verdampfer, dadurch erhöhte Gefahr von Undichtigkeiten und größere Kältemittelmengen erforderlich
- in der Planungsphase sind Einschränkungen aufgrund von Rohrleitungslängen und Höhendifferenzen zu beachten
- zulässiges Füllgewicht der Kälteanlagen durch Vorschriften begrenzt
- elektronische Einzelraumregelung
- klimatechnische Regelung muss direkt im Kältemittelkreislauf erfolgen, geringe Flexibilität, genaue Planung notwendig
- Großer Funktionsumfang: bei entsprechender technischer Ausstattung neben Kühlen auch Heizen und Entfeuchten möglich (Nutzung als Wärmepumpe)
- brandschutztechnische Aspekte aufgrund der verwendeten Kältemittel sind zu beachten
- Funktionseinschränkungen bei extremen Außentemperaturen (Sommer/Winter) sind zu beachten

2.1.2 Indirekte Kühlung

Bei der indirekten Kühlung wird eine als Wärmeträger geeignete Flüssigkeit oder Sole abgekühlt. Der zirkulierende Wärmeträger dient über weitere Wärmeüberträger zur Abführung der Wärmelasten.

Merkmale der indirekten Kühlung:

- die Leistung wird durch die Änderung des Kaltwasserdurchsatzes und/oder der Kaltwassertemperatur geregelt
- im Allgemeinen wird mit einer konstanten Vorlauftemperatur gefahren, die möglichst hoch sein soll
- die Bemessung des Kaltwasserverteilsystems erfolgt analog einem Warmwasserverteilsystem (Heizung, verbreitete Technik)
- im Vergleich zur direkten Kühlung weist die indirekte Kühlung aufgrund eines zusätzlichen Wärmeüberträgers eine geringere Leistungszahl auf
- es ist ein zusätzlicher Energieaufwand für die Kaltwasser- bzw. Solepumpen notwendig
- bei indirekten Kühlanlagen zirkuliert das Kältemittel nur in der Kältemaschine, dadurch sind geringere Kältemittelmengen möglich und die Dichtigkeit der Anlage ist besser zu gewährleisten
- Möglichkeit der „Freien Kühlung“ zur Energieeinsparung bei niedrigen Außenlufttemperaturen und entsprechender Anlagenausrüstung

Indirekte Kühlanlagen mit Wasser als Kältemedium stehen als Wasserkühlsätze (Kaltwassersätze) werkseitig vorgefertigt zur Verfügung.

2.2 Sorptionskältemaschinen

Während bei Kompressionskältemaschinen die Energiezufuhr zur Erreichung der erforderlichen Kondensationstemperatur in Form von mechanischer Energie im Kältemittelverdichter erfolgt, wird diese in der Sorptionskältemaschine durch Zufuhr von Wärmeenergie erreicht.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn dieser für die Kondensation erforderliche Heizwärmestrom aus wirtschaftlich nicht anderweitig nutzbarer thermischer Energie (Abwärme) entnommen werden kann. Die Integration einer Sorptionskältemaschine in den Verbund einer BHKW-gestützten Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ermöglicht oftmals eine energieeffiziente Möglichkeit der Kälteerzeugung. Auch die Nutzung solarthermisch erzeugter Wärme in Verbindung mit der Erzeugung von Sorptionskälte zur Klimatisierung von Gebäuden kann zu wirtschaftlichen und energieeffizienten Lösungen führen (solare Kühlung).

Die energetische Bewertung von Kältemaschinen mit thermischem Antrieb wird mit Hilfe des Wärmeverhältnisses (als Effizienzkennzahl von Kältemaschinen mit thermischem Antrieb) vorgenommen. Der apparative Aufwand und somit die Investition ist im Vergleich zu Kältemaschinen mit mechanischem Antrieb größer. Der mechanische Verschleiß ist jedoch vergleichsweise gering und die Lebensdauer bei geringem Wartungsaufwand entsprechend höher. Von Vorteil sind ebenfalls die geringen Geräuschemissionen und die nur sehr gering vorhandenen Vibrationen.

Sorptionskältemaschinen weisen gegenüber den Kompressionskältemaschinen einen schlechteren Wirkungsgrad auf. Sie können jedoch vorteilhaft eingesetzt werden, wenn nahezu kostenlose Abwärme zur Verfügung steht.

Man unterscheidet bei den Sorptionskältemaschinen zwischen Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen. Bei der Absorptionskältemaschine wird ein flüssiges Sorptionsmittel verwendet, in dem sich das Kältemittel löst. Bei der Adsorptionskältemaschine wird hingegen ein festes Sorptionsmittel verwendet, an dessen Oberfläche sich das Kältemittel anlagert.

Das Kältemittel wird thermisch verdichtet, in dem es im Absorber bzw. Adsorber unter Wärmeabgabe sorbiert und im Desorber wieder vom Lösungsmittel getrennt wird.

2.2.1 Absorptionskältemaschine

Unter Absorption versteht man die Eigenschaft eines Stoffes, gasförmige Stoffe aufzusaugen, bzw. zu absorbieren.

Die Absorptionskältemaschine arbeitet mit einem 2-Stoff-Gemisch (Arbeitsstoffpaar), bestehend aus dem eigentlichen Arbeitsstoff oder Kältemittel und einem geeigneten Absorptionsmittel.

Als Arbeitsstoffpaare werden in Absorbern verwendet:

Ammoniak / Wasser, mit Ammoniak als Kältemittel und Wasser als Absorptionsmittel, Kühltemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$

Wasser / Lithiumbromid, mit Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Absorptionsmittel, Kühltemperatur $> 0^{\circ}\text{C}$

Das Kältemittel nimmt bei der Verdampfung Wärme auf. Der Dampf wird im Absorber vom Absorptionsmittel unter Wärmeabgabe absorbiert und über die Lösungsmittelpumpe zum Austreiber transportiert. Im Austreiber wird das Kältemittel durch Wärmezufuhr ausgekocht. Dabei verdampft das Kältemittel erneut, jedoch auf einem wesentlich höheren Temperaturniveau. Bei der Verflüssigung wird diese Verdampfungswärme zuzüglich der dem Austreiber zugeführten Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben. Das Absorptionsmittel wird vom Austreiber wieder dem Absorber zugeführt.

Die thermodynamischen Eigenschaften beim Arbeitsstoffpaar Ammoniak / Wasser ermöglichen eine Kühlung unter 0°C .

Beim Arbeitsstoffpaar Wasser / Lithiumbromid sind Verdampfungstemperaturen unter 0°C nur bedingt möglich. Der gesamte Prozess läuft im Vakuum, die maximale Austreibertemperatur beträgt etwa 160°C .

Für den Anwendungsbereich in der Klimakälte hat sich das Arbeitsstoffpaar Wasser / Lithiumbromid durchgesetzt.

Das Absorptionskälteverfahren kommt häufig in Systemen der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung zum Einsatz. Des Weiteren stellt die Umweltunbedenklichkeit seiner Arbeitsstoffpaare einen großen Vorteil dar.

Als Nachteil des Absorptionskälteverfahrens sind der höhere Rückkühlbedarf (Rückkühlung ca. $2,5 \times$ Kälteleistung) und die höheren Investitionskosten gegenüber der Kompressionskälteerzeugung zu sehen.

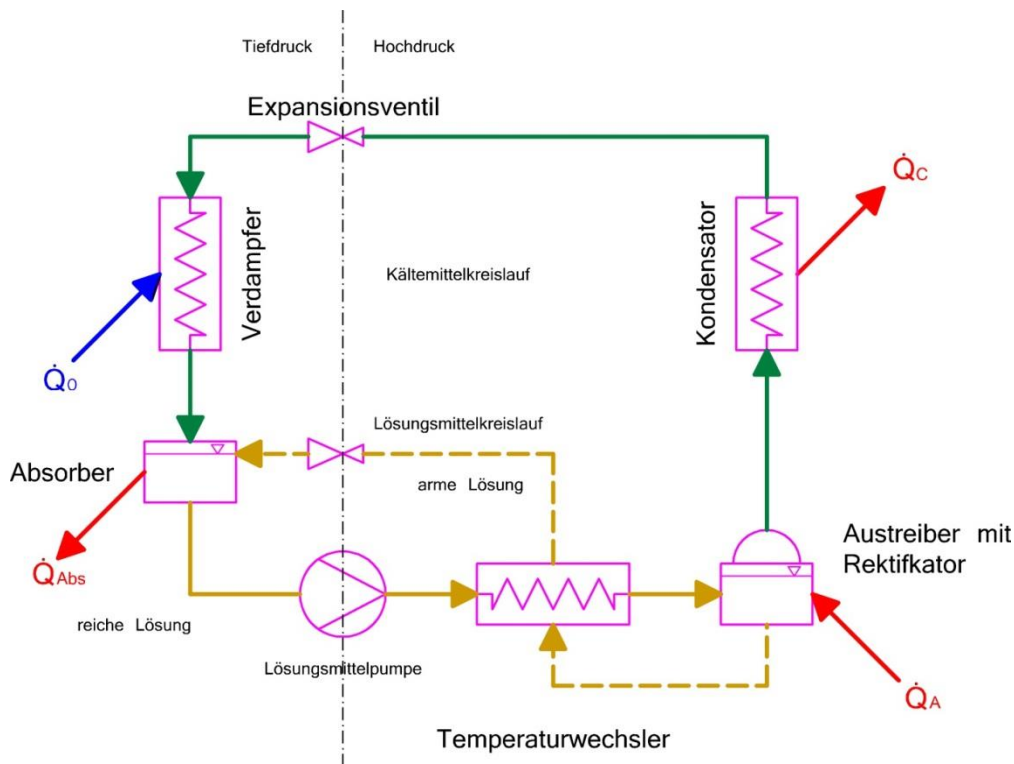


Abbildung 5, Prinzipschaltbild einer Ammoniak/Wasser Absorptionskältemaschine

2.2.2 Adsorptionskältemaschine

Bei der Adsorptionskältemaschine wird das in der Absorptionskältemaschine verwendete Lösemittel (Arbeitsstoffpaar) durch einen festen hygroskopischen Stoff (z.B. Silikagel) ersetzt. Der vom Verdampfer kommende Kältemitteldampf wird im Adsorber (Sammler) an der Oberfläche durch physikalische und chemische Bindung adsorbiert. Da sich der Feststoff nicht umpumpen lässt, arbeitet die Adsorptionskältemaschine diskontinuierlich, d.h. es existiert eine zweite Kammer. Im Desorber-Betrieb wird das Kältemittel durch Wärmezufuhr wieder ausgetrieben und dem Verflüssiger/Kondensator zugeführt. Der Prozess verläuft im periodischen Wechsel zwischen Adsorptions- und Austreibungs Vorgang. Durch das Verdampfen des Kältemittels unter Vakuum wird dem Wärmeträger Verdampfungswärme entzogen. Als Kältemittel wird häufig Wasser verwendet, das zusammen mit dem Silikagel ein völlig umweltfreundliches Arbeitsstoffpaar bildet. Nachteile der Adsorbertechnik sind die höheren Anlagenkosten und die schwankende Kaltwassertemperatur beim Zykluswechsel.

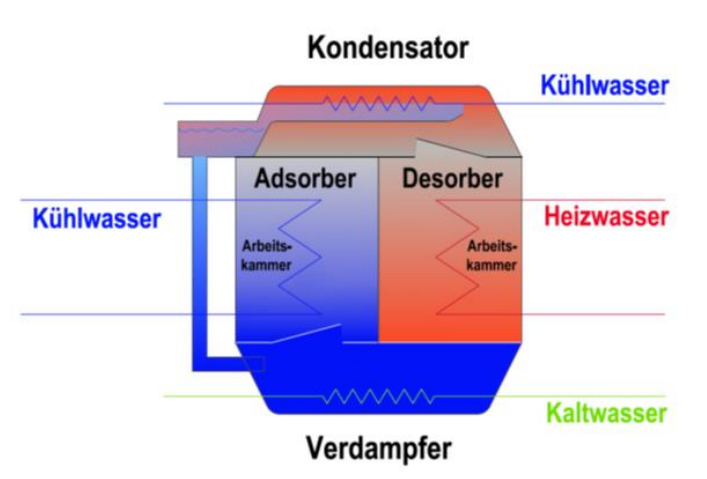


Abbildung 6, Prinzipdarstellung einer Adsorptionskältemaschine

3 Kältemittel und Kältemaschinenöle

3.1 Bezeichnung der Kältemittel

Der Begriff „Kältemittel“ wird üblicherweise nur für das Arbeitsmedium des Kompressionskälteprozesses verwendet. Bei den Absorptionskältemaschinen spricht man dagegen von einem Arbeitsstoffpaar.

Zur Vermeidung von komplizierten chemischen Stoffbezeichnungen wurde für die Kältemittel ein System der Kurzbezeichnung eingeführt. Dieses besteht aus einem vorangestellten „R“ (Refrigerant), maximal 4 Ziffern und nachgestellten Zusatzzeichen. Die Ziffern bedeuten:

1. Ziffer: Nur bei Derivaten von Alkenen: Anzahl der Doppelbindungen
(andernfalls entfällt diese Ziffer)
2. Ziffer: Anzahl der Kohlenstoffatome minus 1
(Wenn sich aufgrund nur eines C-Atoms eine 0 ergibt, entfällt diese)
3. Ziffer: Anzahl der Wasserstoffatome plus 1
4. Ziffer: Anzahl der Fluoratome

Anorganische Kältemittel haben als erste Ziffer eine 7 (R 7xx).

Neben den Kältemitteln, die nur aus einem chemischen Stoff bestehen, werden Kältemittelgemische verwendet. Diese bestehen in der Praxis aus 2 bis 5 Komponenten. Die zeotropen Kältemittelgemische (Gruppe R 4xx) verdampfen und kondensieren bei einer gleitenden Temperatur.

Die azeotropen Kältemittelgemische (Gruppe R 5xx) verhalten sich praktisch wie ein Einstoffkältemittel.

Die Kurzbezeichnungen werden offiziell vom ASHRAE vergeben. Weitere Hinweise zur Bedeutung der Zusatzzeichen sind in der ISO 817, AHRI 700 bzw. im Anhang E zur DIN EN 378-1 gegeben.

Die Kältemittel werden aufgrund ihrer Einzelatome auch in folgenden Stoffgruppen zusammengefasst:

- teilhalogenierte Hydrogen-Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (HFCKW)
- teilhalogenierte Hydrogen-Fluor-Kohlenwasserstoffe (HFKW)
- vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW)
- vollhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe (FKW)
- Kohlenwasserstoffe (KW)
- anorganische Stoffe

Eine wichtige Unterteilung der Kältemittel erfolgt nach Sicherheitsaspekten. Diese Einteilung ist international einheitlich und berücksichtigt die Brennbarkeit sowie die Toxizität der Kältemittel. Die ISO 817 ordnet die Kältemittel entsprechend ihrer Entflammbarkeit und Toxizität in acht Sicherheitsklassen ein. Die Bezeichnung der Klassen besteht aus dem Buchstaben A oder B (Klassifikation nach Toxizität) und einer Ziffer 1 bis 3 (Klassifikation nach Brennbarkeit). Die Klasse 2 enthält die Unterklasse 2L, die die Einstufung der Klasse 2 widerspiegelt und als zusätzliches Kriterium jedoch eine geringere Flammenausbreitungsgeschwindigkeit erfordert.

Kältemittel mit ihren Einordnungen in Sicherheitsklassen u.a. sind auch in der DIN EN 378-1, Anhang E aufgelistet.

Tabelle 2, Tabelle der Kältemittel-Sicherheitsklassen

Sicherheitsklassen:		→ steigende Toxizität	
		geringe Toxizität	höhere Toxizität
↓ steigende Entflammbarkeit	keine Flammenausbreitung	A1	B1
	geringere Entflammbarkeit	A2L	B2L
	entflammbar	A2	B2
	höhere Entflammbarkeit	A3	B3

3.2 Anforderungen an Kältemittel

An ein Kältemittel werden sehr vielfältige, unterschiedliche Anforderungen gestellt, die alle gleichzeitig erfüllt sein sollen. Die Wichtung der Anforderungen ist dabei abhängig von der kältetechnischen Anwendung. Die Wahl des Kältemittels ist deshalb immer ein Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Eigenschaften. Somit existiert auch kein ideales Kältemittel für alle Anwendungen.

Die folgende Liste enthält einige Anforderungen an ein Kältemittel.

Thermodynamische Eigenschaften

- hohe Energieeffizienz (Leistungszahl)
- große spezifische Verdampfungsenthalpie
- große volumetrische Kälteleistung
- geringes Druckverhältnis für den Verdichter
- hohe Wärmeleit- und Wärmeübergangskoeffizienten
- hoher kritischer Druck
- hohe kritische Temperatur
- niedrige Viskosität
- geringer Temperaturgleit bei Verdampfung und Kondensation

Umwelt- Eigenschaften

- kein Ozonzerörungspotential (ODP = 0)
- geringer Beitrag zum globalen Treibhauseffekt (GWP niedrig)
- möglichst natürlicher Stoff
- biologisch abbaubar

Chemische Eigenschaften

- nicht brennbar
- nicht korrosiv
- mit dem Kältemaschinenöl verträglich
- keine Toxizität
- charakteristische Warnwirkung für giftige Stoffe
- paniksicher
- ohne kanzerogene Wirkung oder andere Gesundheitsschädigungen

Sonstige Eigenschaften

- preiswert (in hoher Reinheit kostengünstig herstellbar, gute Verfügbarkeit)
- insgesamt möglichst niedrige Kosten (Investition, Betrieb, Außerbetriebnahme)
- Wartungsaufwand niedrig

3.3 Auswahl von Kältemitteln

3.3.1 Auswirkungen der F-Gase-Verordnung

Aufgrund der internationalen Verpflichtungen zum Klimaschutz (KYOTO-Protokoll) wurde die Verordnung (EU) Nr. 2024/573 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 07. Februar 2024 über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 erlassen.

Damit werden die Quoten zur Reduzierung fluoriierter Gase weiter verschärft bis zu einem „Phase-Out“ im Jahr 2050 (Abbildung 7).

Neue Beschränkungen und/oder Auflagen für gewerbliche und industrielle Kälteanlagen, Klimaanlage und Wärmepumpen werden eingeführt. Bestimmte Produkte und Geräte, die fluorierte Gase enthalten, sind von einem Komplett-Verbot des Inverkehrbringens betroffen bzw. werden genaue Termine für den vollständigen Ausstieg aus der Verwendung fluoriierter Gase für bestimmte Anwendungen in neuen Geräten festgelegt (Tabelle 3).

Darüber hinaus werden neue Bestimmungen für Wartung und Instandhaltung eingeführt (Tabelle 4).

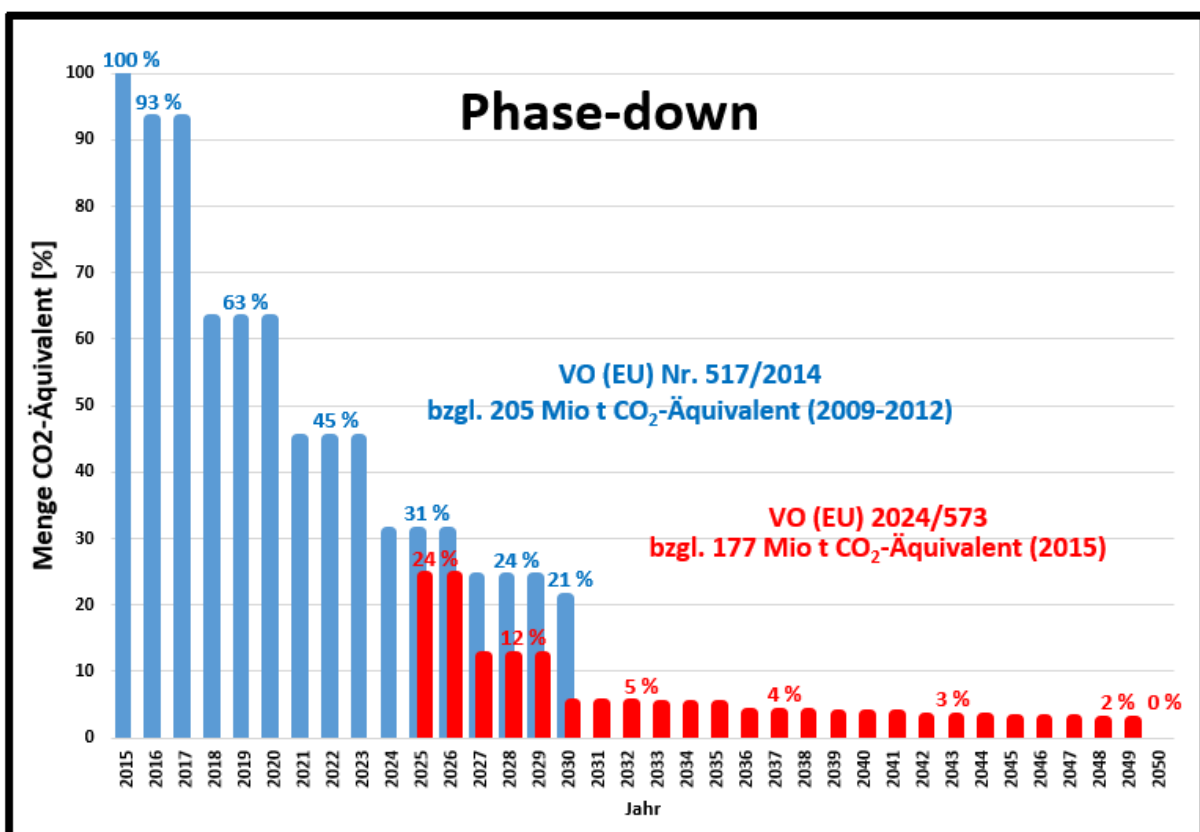


Abbildung 7, Quoten-Regelung gemäß Verordnung (EU) Nr. 2024/573 (rot dargestellt)
Im Vergleich zur Vorgänger-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (blau dargestellt)

Tabelle 3: Beschränkungen / Auflagen für gewerbliche und industrielle Kälteanlagen, Klimaanlage und Wärmepumpen gemäß Verordnung (EU) Nr. 2024/573

Verbot des Inverkehrbringens	
ab	
2026	<ul style="list-style-type: none"> • Kühltische und Tiefkühlgeräte für Haushaltsanwendungen (weiße Ware) mit sämtlichen F-Gasen¹
2027	<ul style="list-style-type: none"> • Kaltwassersätze mit einer Leistung von bis zu einschließlich 12 kW mit F-Gasen GWP $\geq 150^1$ • Kaltwassersätze ab einer Leistung von > 12 kW mit F-Gasen GWP $\geq 750^1$ • Luft-Wasser-Split-Systeme (Klima und Wärmepumpen) mit einer Leistung von bis zu einschließlich 12 kW mit F-Gasen GWP $\geq 150^1$ • Monoblock Klimaanlage oder Wärmepumpen mit einer Leistung von max. 50 kW (bei steckerfertiger Ausführung bis zu einschließlich 12 kW) mit F-Gasen GWP $\geq 150^{1,2}$
2029	<ul style="list-style-type: none"> • Split Klima- und Wärmepumpensysteme mit einer Leistung größer 12 kW mit F-Gasen GWP $\geq 750^1$ • Luft-Luft-Split-Systeme (Klima und Wärmepumpen) mit einer Leistung von bis zu einschließlich 12 kW mit F-Gasen GWP $\geq 150^1$
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Ortsfeste Kälteanlagen (Ausnahme: Chiller) mit F-Gase GWP $\geq 150^1$ • Ortsfeste Klima- und Wärmepumpensysteme mit F-Gasen GWP $\geq 150^{1,2}$
2032	<ul style="list-style-type: none"> • Steckerfertige Monoblock Klimaanlage oder steckerfertige Wärmepumpen mit einer Leistung von bis zu einschließlich 12 kW mit sämtlichen F-Gasen² • Kaltwassersätze mit einer Leistung von bis zu einschließlich 12 kW mit sämtlichen F-Gasen¹
2033	<ul style="list-style-type: none"> • Split Klima- und Wärmepumpensysteme mit einer Leistung größer 12 kW mit F-Gasen GWP $\geq 150^1$
2035	<ul style="list-style-type: none"> • Split Klima- und Wärmepumpensysteme mit einer Leistung von bis zu einschließlich 12 kW mit sämtlichen F-Gasen¹

Zu beachten:

- Das Inverkehrbringen von Teilen zur Reparatur und Wartung ist zulässig.
- Bei einer Reparatur darf sich die Menge des enthaltenen F-Gases nicht erhöhen. Außerdem darf kein F-Gas mit einem höheren GWP genutzt werden, als das ursprünglich enthaltene F-Gas.

Tabelle 4, Bestimmungen für Wartung und Instandhaltung gemäß Verordnung (EU) Nr. 2024/573

Service-Verbot	
ab	
2025	<ul style="list-style-type: none"> • Kälteanlagen³ mit F-Gasen GWP ≥ 2500 (Frischware)
2026	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaanlage⁴ und Wärmepumpen mit F-Gasen GWP ≥ 2500 (Frischware)
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Kälteanlagen: Recyceltes und wiederaufbereitetes Kältemittel mit F-Gasen GWP ≥ 2500
2032	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaanlage und Wärmepumpen: Recyceltes und wiederaufbereitetes Kältemittel mit F-Gasen GWP ≥ 2500

Kältemittel sind bei Wartungsarbeiten und Außerbetriebnahmen sauber und sortenrein zu sammeln und einer Wiederverwertung zuzuführen.

Wiederaufbereitetes Kältemittel wird bei der erlaubten Quote nicht eingerechnet.

¹ Ausnahmen sind nur zulässig, wenn bestimmte Sicherheitsanforderungen erreicht werden müssen.

² Wenn Sicherheitsanforderungen einen Einsatz von fluorierten Treibhausgasen mit einem GWP von 150 oder weniger nicht zulassen, dann gilt das Limit GWP = 750.

³ Kälteanlagen sind Anlagen zur Kühlung von Produkten, Stoffen, Prozessen mit Fokus auf Warenerhalt, Prozess-Stabilität o.ä. (nicht primär Raumkomfort)

⁴ Klimaanlage sind Anlagen zur Behandlung von Raumluft (Komfortklima)

3.3.2 Umstellung von Bestandsanlagen auf ein neues Kältemittel

Wenn eine bestehende Kälteanlage bis zum Lebensende weitgehend unverändert betrieben werden soll, können sogenannte Drop-In-Kältemittel(-Gemische) verwendet werden, die speziell entwickelt wurden.

Dabei sind die Bestimmungen für Wartung und Instandhaltung und die eingeschränkte künftige Verfügbarkeit von F-Gase-Kältemitteln gemäß Verordnung (EU) Nr. 2024/573 zu beachten (Tabelle 4).

Entnommene Kältemittel müssen ordnungsgemäß über Fachfirmen entsorgt werden, ein Ablassen des Kältemittels ist nicht zulässig.

Das entsprechende Drop-In-Kältemittel muss nahezu gleiche Eigenschaften wie das alte Kältemittel besitzen. Das betrifft insbesondere die Drücke, die spezifische volumetrische Kälteleistung, Druckgastemperatur, die Sicherheitsgruppe des Kältemittels.

In der Regel werden nur wenige Bauteile ausgetauscht (Expansionsventile, Dichtungen, Kältemaschinenöl).

Diese Drop-In-Kältemittel sind eine zeitlich befristete Übergangslösung und im Sinne der F-Gase-Verordnung nicht zukunftssicher.

Zu beachten ist ebenso, dass die maximal zur Verfügung stehende Kälteleistung sowie die Leistungszahl (Energieeffizienz) der bestehenden Kälteanlage sich durch den Wechsel auf das Ersatzkältemittel (Drop-In) ändern können.

Aufgrund der oben dargestellten Quoten-Regelung (Abbildung 7) wird sich der bereits vorhandene Trend der Preissteigerungen für F-Gas-Kältemittel weiter verschärfen.

3.3.3 Kältemittel für Neuanlagen

Unter Berücksichtigung der Festlegungen in der ab 11. März 2024 geltenden F-Gase-Verordnung (EU) Nr. 2024/573 (Tabellen 3 und 4) ist bei neu zu errichtenden Anlagen die Verwendung von Kältemitteln mit GWP-Werten größer 150 grundsätzlich nicht zu empfehlen.

Neben der F-Gase-Verordnung wird mit großer Wahrscheinlichkeit auch das geplante PFAS-Beschränkungsverbot im Rahmen der EU-Chemikalienverordnung REACH den künftigen Einsatz von fluorhaltigen Kältemitteln erschweren bzw. gänzlich unmöglich machen.

Die meisten F-Gase, die als Kältemittel in Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen verwendet werden, gehören zur Stoffgruppe der Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) oder werden nachweislich oder vermutlich zu PFAS abgebaut. PFAS sind Chemikalien, die nicht natürlich abgebaut werden und möglicherweise negative Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt haben (sogenannte Ewigkeitschemikalien).

Im Jahr 2023 wurde der Europäischen Chemikalienagentur nach der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates ein Vorschlag zur Beschränkung der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von PFAS, einschließlich fluorierter Treibhausgase, vorgelegt. Sollte ein PFAS-Verbot auch Kältemittel betreffen, wären voraussichtlich folgende Auswirkungen zu erwarten:

- Verbot von Neuanlagen mit F-Gasen (Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen) mit einer Übergangsfrist von 18 Monaten nach Inkrafttreten

(Ausnahmen sind Anwendungen unter -50°C, Autoklimaanlagen, Transportkühlung – mit längeren Übergangsfristen)

- Für Wartung und Service von Anlagen, die vor Inkrafttreten des PFAS-Verbots installiert wurden, ist der Einsatz von F-Gasen noch 12 Jahre erlaubt.

Fazit: Es ist absehbar, dass die Verwendung von F-Gasen in Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen künftig nicht mehr zulässig sein wird.

Alternativen sind natürliche Kältemittel (Tabelle 5).

Es sind die sicherheitstechnischen Einstufungen dieser Kältemittel und die sich nach DIN EN 378 ergebenden Anforderungen für die Aufstellbedingungen der Anlagen zu beachten.

Tabelle 5, Natürliche Kältemittel, nicht von F-Gase-Verordnung oder PFAS-Verbot betroffen

Kältemittelbezeichnung	Chemische Bezeichnung	Sicherheitsklasse	Fluidgruppe PED	Normal-Siedepunkt [°C]
R50	Methan	A3	1	-161
R170	Ethan	A3	1	-89
R1150	Ethylen	A3	1	-104
R290	Propan	A3	1	-42
R1270	Propylen	A3	1	-48
R600	Butan	A3	1	0
R600a	Isobutan	A3	1	-12
R601	Pentan	A3	1	36
R601a	Isobutan	A3	1	27
E170	Dimethylether	A3	1	-25
R717	Ammoniak	B2L	1	-33
R744	Kohlendioxid	A1	2	Subl.: -78

3.4 Kältemaschinenöle

Die Hauptaufgabe des Kältemaschinenöles ist die Gewährleistung der notwendigen Schmierung der beweglichen Teile des Kältemittelverdichters. Des Weiteren dient es dem Abführen von Wärme und dem Abdichten des Kompressionsraumes und der Ventile.

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, muss es auch auf das eingesetzte Kältemittel abgestimmt sein. Meist werden Kältemaschinenöle mit einer guten Mischbarkeit mit dem Kältemittel eingesetzt.

Eine wichtige Kennzahl des Kältemaschinenöles ist die Viskosität (Zähigkeit). Da die effektive Viskosität von der Temperatur und der im Öl gelösten Kältemittelmenge abhängt, stellt die Einstellung der Betriebsviskosität einen Kompromiss zwischen der für die Verdichterschmierung notwendigen Mindestviskosität und der für eine ausreichende Ölzirkulation notwendigen Mindestfließfähigkeit bei tiefen Temperaturen dar.

Nicht zuletzt soll das Kältemaschinenöl eine hohe Alterungsbeständigkeit aufweisen, um lange Ölwechselintervalle zu ermöglichen.

Kältemaschinenöle können auf synthetischen Ölen oder auf Mineralöl basieren. Eine Einteilung der Kältemaschinenöle erfolgt nach DIN 51503 in Gruppen (unter Berücksichtigung der verschiedenen Kältemittel):

- KAA. Nicht mischbar mit Ammoniak, z. B. Mineralöle, Alkylbenzole, Polyalphaolefine
- KAB. Teilweise oder vollständig mischbar mit Ammoniak, z. B. Polyglykole
- KB. Mischbar mit CO₂, z. B. Esteröle, Polyglykole; nicht mischbar mit CO₂, z. B. Polyalphaolefine
- KC. Teilhalogenierte HFCKW/HCFO, z.B. Mineralöle, Alkylbenzole, Ester- und Esteröl-Komplexe
- KD. Voll- und teilfluorierte FKW/HFKW/HFO, z. B. Esteröle und Polyglykole
- KE. Kohlenwasserstoffe, z.B. Mineralöle, Alkylbenzole, Polyalphaolefine, Polyglykole, Esteröle

Prinzipiell sind nur die durch den Verdichterhersteller (für das Kältemittel) vorgeschriebenen bzw. freigegebenen Schmierstoffe zu verwenden.

Dies gilt auch für einen Ölwechsel, da andernfalls Betriebsstörungen oder Schäden bis hin zur Zerstörung des Verdichters auftreten können. Da viele Kältemaschinenöle hygroskopisch sind, ist darauf zu achten, dass angefangene Ölgebinde nicht lange offenstehen bzw. nicht mehrmals verwendet werden.

Bei einem Austausch des Kältemittels ist in den meisten Fällen auch ein Wechsel des Kältemaschinenöls erforderlich. Das entnommene Öl muss ordnungsgemäß entsorgt werden. Dabei ist zu beachten, dass beachtliche Anteile des Kältemittels im Öl gelöst sein können und beim Freisetzen Gefahren für Mensch und Umwelt entstehen können (Druckanstieg, Brennbarkeit, Giftigkeit, Treibhausgasemission).

4 Weitere Komponenten

4.1 Rückkühler

Die Abbildung 8 zeigt die Einordnung der Rückkühler in den Kälteprozess. Die Aufgabe der Rückkühler ist es, die im Verflüssiger abgegebene thermische Leistung über eine einphasige Flüssigkeit (Wärmeträger) über einen Wärmeübertrager an die Umgebungsluft abzugeben. Die Luft wird dabei in der Regel durch Ventilatoren über den Wärmeübertrager gefördert. Da Rückkühler mit Außenluft in Verbindung stehen, sind Frostschutzmaßnahmen im Wärmeträger notwendig.

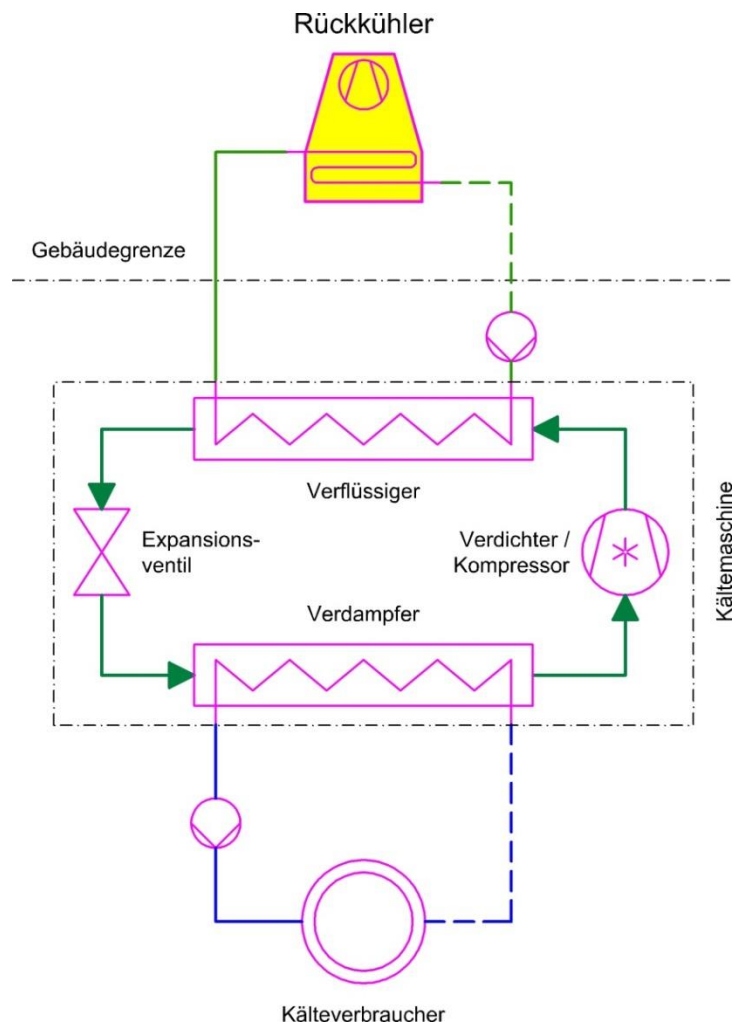


Abbildung 8, Einordnung der Rückkühler

Folgende Arten der Rückkühler sind aus Sicht der Kältetechnik anzutreffen:

- Trockenkühler
- Hybride Trockenkühler
- Geschlossene Verdunstungskühler
- Offene Verdunstungskühler

Trockenkühler

Bei den Trockenkühlern wird die Wärme sensibel an die Umgebung abgegeben. Dabei muss die Temperatur des Wärmeträgers oberhalb der Umgebungstemperatur liegen.

Hybride Trockenkühler

Bei den hybriden Trockenkühlern handelt es sich um einen trockenen Kühler, der zum Zwecke der Leistungssteigerung luftseitig mit Wasser benetzt werden kann.

Bei niedrigen Umgebungstemperaturen wird die Wärme rein sensibel aufgrund der Temperaturdifferenzen übertragen.

Bei höheren Umgebungstemperaturen erfolgt durch die Benetzung der Lamellen mit Wasser eine Verdunstung, so dass ein Teil der Leistung als latente Wärme übertragen wird.

Durch die Benetzung der Lamellen wird die übertragbare Leistung deutlich gesteigert, so dass hybride Trockenkühler weniger Aufstellfläche als reine Trockenkühler benötigen.

Geschlossene Verdunstungskühler

Die geschlossenen Verdunstungskühler nutzen dauerhaft den Effekt der Verdunstung. Der Wärmeträger wird in geschlossenen Rohrleitungen geführt. Auf der Außenseite findet die Verdunstung statt. Dazu wird in der Regel Wasser versprüht.

Offene Verdunstungskühler

Bei den offenen Verdunstungskühlern wird ein Teil des Wärmeträgers zur Verdunstung verwendet. Der zu kühlende Wärmeträger wird verrieselt. Im direkten Kontakt mit der Umgebungsluft wird die Verdunstung realisiert.

Bei allen Rückkühlern, die die Verdunstung nutzen, sind unter dem Aspekt der Legionellen die Anforderungen der VDI 2047 bzw. der in Abstimmung befindlichen 42. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider - 42. BImSchV) zu beachten.

4.2 Kältespeicher

Durch den Einsatz von Kältespeichern können die installierte Kälteleistung und der elektrische Leistungsbedarf reduziert sowie der Betrieb von Kälteerzeugern im niedrigen und häufig ineffizienten Teillastbereich vermieden werden.

Im Zusammenhang mit dem steigenden Anteil erneuerbaren, fluktuierend erzeugten Stroms können Kältespeicher zur Integration hoher Anteile erneuerbaren Stroms beitragen. Zukünftig wird der Zeitpunkt des Strombezugs eine größere Bedeutung erlangen und der absolute Verbrauch an Bedeutung verlieren, so dass der Bedarf an Kältespeichern wächst. Mit einem Kältespeicher wird die letztlich benötigte Nutzenergieform Kälte gespeichert, so dass keine weiteren Umwandlungsverluste mehr auftreten.

Durch die Ausnutzung entsprechender Tarifmodelle sowie durch die Minderung der elektrischen Leistungsspitze im Rahmen eines Lastmanagements können Kältespeicher kurze Amortisationszeiten erreichen.

Merkmale von Kältespeichern:

- Reduktion der installierten Kälteleistung möglich
- Bereitstellung hoher Spitzenlasten ohne Vorhaltung einer gleich großen Erzeugungskapazität
- Weniger Schaltzyklen, Vermeidung von Teillastbetrieb und damit bessere Wirkungsgrade der Kälteerzeugung
- Möglichkeit der Abschaltung von Kälteerzeugern (Lastabwurf) im Rahmen eines Lastmanagements
- Möglichkeit der Verschiebung der Kälteerzeugung in Zeiten mit günstigen Rückkühlbedingungen und dadurch Effizienzsteigerung
- Erhöhung der Versorgungssicherheit und Möglichkeit einer Kälte-Notversorgung
- Zusätzlicher Platzbedarf, der durch geschickte Anordnung, höhere Energiedichte (Eis- statt Kaltwasserspeicher) oder Mehrfachnutzungen (Nutzung von Sprinklerbehältern, unterirdische Speicher) minimiert werden kann
- Eventuelle Erhöhung des elektrischen Energieverbrauchs in Abhängigkeit vom Speichertyp (z.B. infolge einer niedrigeren Verdampfungstemperatur bei der Kälteerzeugung) und der Betriebsweise (z.B. Rückkühlbedingungen Tag/Nacht, Teillastbetrieb)

Kältespeicher können auch in Systemen der Wärme-Kälte-Kopplung vorteilhaft eingesetzt werden, um zeitliche Disparitäten des Wärme- und Kältebedarfs auszugleichen und den Anteil der effizienten Wärme-Kälte-Kopplung zu erhöhen. Als Wärme-Kälte-Kopplung wird die parallele Nutzung der von einer Wärmepumpe/Kältemaschine erzeugten Wärme und Kälte bezeichnet. (Flüssig-)Eisspeicher sind aufgrund der Temperaturkonstanz und der hohen Energiedichte in dieser Anwendung vorteilhaft einsetzbar.

Die Auswahl des Kältespeichers sowie die Auslegung (Ein- und Ausspeicherleistung, Speicherkapazität) wird bestimmt durch die verfolgte Zielstellung, wie beispielsweise:

- Lastmanagement
- Erhöhung des Eigenverbrauchs selbsterzeugten Stroms (z.B. PV)
- Nutzung ökonomisch vorteilhafter Strom-Tarifmodelle
- Erhöhung der Versorgungssicherheit

Folgende Arten von Kältespeichern sind in der Kältetechnik bekannt:

- Sensible Kältespeicher (Kaltwasserspeicher)
- Latente Kältespeicher (Eisspeicher)
 - Festeisspeicher
 - Flüssigeisspeicher

Sensible Kältespeicher (Kaltwasserspeicher)

Sensible Kältespeicher nutzen die Temperaturänderung des Speichermediums, i.d.R. Wasser. Durch die geringe nutzbare Temperaturdifferenz besitzen Kaltwasserspeicher eine niedrige Energiedichte, wodurch große Speichervolumina notwendig sind. Bei der in Klimatisierungsanwendungen häufigen Temperaturpaarung 6/12 °C beträgt die Energiedichte 25 kJ/kg bzw. 7 kWh/m³.

Latente Kältespeicher (Eisspeicher)

Latente Kältespeicher nutzen die Energie der Phasenumwandlung fest/flüssig eines Stoffes. Am häufigsten wird Wasser/Eis eingesetzt, wobei die latente Energiedichte $333,5 \text{ kJ/kg}$ bzw. 93 kW/m^3 beträgt. Vorteilhaft ist die konstante Temperatur des Phasenwechsels. Je nach erforderlicher Kälteerzeugervorlauftemperatur ist zusätzlich der sensible Anteil, analog zum Kaltwasserspeicher, nutzbar.

Eine Einordnung von Eisspeichern kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Unterscheidung in Fest- und Flüssigeisspeicher.

Festeisspeicher

- besitzen einen integrierten Wärmeübertrager, der zumindest für die Einspeicherung (Eisbildung), meist auch für die Ausspeicherung (Aufschmelzen) genutzt wird
- führen zu einer vergleichsweise niedrigen Verdampfungstemperatur des Kältemittels im Kälteerzeuger und damit zu einer Minderung der Effizienz
- Die Leistung des Wärmeübertragers, die Eisdicke sowie die Temperaturdifferenz zwischen Eis und Kälteerzeuger bestimmen die Leistung bei der Ein- und Ausspeicherung
- Die Ausspeicherung erfolgt teilweise über, ggf. gleichzeitige, „externe Schmelze“, d.h. Durchströmung des Behälters mit Wasser auf der „Eisseite“

Typische Bauformen sind:

- Rohrbündel- oder Platten-Wärmeübertrager in einem Behälter
- Eisentstehung auf Rohr-/Plattenaußenseite; Einspeicherung mittels Kälteerzeuger im Rohr;
- Kälteerzeuger mit Frostschutzmittel und damit Systemtrennung zum Kaltwassersystem erforderlich
- Verdampfendes Kältemittel in Rohrbündel- oder Platten-Wärmeübertrager in einem Behälter
- Einspeicherung mittels Verdampfung von Kältemittel auf Rohr-/Platten-Innenseite
Ausspeicherung durch externe Schmelze
- Makroverkapseltes Eis
- Wassergefüllte Kapseln, meist Kugeln, werden als Schüttung in einen Behälter eingebracht
- Durchströmung der Kapselschüttung mit dem Kälteerzeuger für Ein- und Ausspeicherung; Eisbildung in der verschlossenen Kugel; Kälteerzeuger mit Frostschutzmittel und damit Systemtrennung zum Kaltwassersystem erforderlich

Flüssigeispeicher

- Flüssigeis ist eine pumpfähige Mischung aus Wasser und Eispartikeln und kann als Kältespeicher- und/oder Kälte transportmedium eingesetzt werden
- Vorteilhaft sind u.a. die hohen Entladeleistungen
- Die Nutzung des Flüssigeises als Kälte träger zur Kälteverteilung ist möglich aber nicht zwingend.
- Vorteile von Flüssigeis als Kälte träger sind die höhere Energiedichte, kleinere Rohrdurchmesser, geringerer Pumpenaufwand
- Im Vergleich zu direktverdampfenden Split-Systemen ist durch Einsatz von Flüssigeis als Kälte träger eine Minimierung der Kältemittelfüllmenge möglich (erleichtert Einsatz natürlicher/brennbarer Kältemittel)
- Keine Einbauten und Wärmeübertrager im Speicherbehälter, hohe Speicherkapazitäten möglich

Hinsichtlich der Eiserzeugung werden unterschieden:

- Kratzeiserzeugung
Einsatz im kleinen und mittleren Leistungsbereich; vergleichsweise niedrige Verdampfungstemperatur; anwendungsgerechte Absenkung der Schmelztemperatur durch Additive möglich, z.B. zur Versorgung von Küchen oder Prozesskühlanwendungen
- Vakuumeis
Eisentstehung durch Verdampfung des Kältemittels Wasser bei Tripelpunktbedingungen (611 Pa, 0 °C);
Effizienteste Form der Eiserzeugung, da kein Wärmeübertrager zwischen Kältemittel und Eis, somit höchstmögliche Verdampfungstemperatur
Ankopplung an das Kaltwassersystem, kein Frostschutzmittelkreislauf erforderlich; natürliches Kältemittel Wasser (R718)
Anwendung im mittleren und großen Leistungsbereich

5 Planung und Ausführung

5.1 Auslegungskriterien (Redundanz, Teillast)

Nachfolgend sind die wesentlichen Ablaufschritte bei der Planung von kältetechnischen Anlagen dargestellt:

Die Planung und Ausführung kältetechnischer Anlagen muss auf der Grundlage eines fundierten Anforderungsprofils erfolgen.

Wichtige Ausgangsgrößen sind z.B. der geforderte Bereich der Temperatur und Feuchte, vorgegebene innere thermische Lasten (z.B. elektrische Anschlussleistungen mit Gleichzeitigkeiten), innere Feuchtelasten (z.B. Personen und Stoffströme mit Gleichzeitigkeiten), geforderte Regelgenauigkeiten und ggf. Überschreitungshäufigkeiten von Temperatur und Feuchte. Diese Parameter sind in der Regel mit dem Auftraggeber schriftlich zu vereinbaren.

Um Investitions- und spätere Betriebskosten zu optimieren, sollte nur so viel gekühlt werden wie unbedingt nötig. Für die vereinbarten Sollwerte (Temperatur, Feuchte) sind kurzzeitige (Tag-/Nachtbetrieb) und jahreszeitliche (Sommer-/Winterbetrieb) Spielräume auszunutzen und eine gleitende Fahrweise anzustreben.

Die für Lastberechnungen zu verwendenden meteorologischen Daten sind mit dem Auftraggeber ebenfalls zu vereinbaren. Die Ermittlung des Kältebedarfs erfolgt **zwingend** mittels Kühllastberechnung nach VDI 2078 die neben der sensiblen Kühllast auch eine Jahresberechnung des sensiblen Kühlenergiebedarfes bzw. der Überschreitungshäufigkeit des geforderten Temperatursollwertes ermöglicht. Als weiteres Ergebnis der Kühllastberechnung steht eine Jahressimulation zur Verfügung.

Eine ggf. abzuführende Entfeuchtungslast muss unter Berücksichtigung der relevanten Einflussgrößen (Personen, Stofflast, Außenluftwechsel) separat erfolgen.

Bei einem Neubau muss durch bauliche Maßnahmen der sommerliche Wärmeschutz nach DIN 4108-2 nachgewiesen werden.

Eine Kühlung von Räumen und Bereichen ist nur dann erforderlich, wenn nach Ausschöpfen aller baulichen und organisatorischen Maßnahmen die Empfehlungen für die thermischen Behaglichkeitsgrenzen nicht eingehalten werden können.

Jedoch sollte für ausgewählte Büroräume, bei denen z. B. auf Grund der räumlichen Lage, der Ausstattung oder der Personendichte mit erhöhten sommerlichen Innentemperaturen zu rechnen ist, bereits in der Leistungsphase 2 eine thermisch-dynamische Simulationsberechnung durchgeführt werden. Wird über diese Berechnungen erkannt, dass massive Überschreitungen der sommerlichen Grenztemperaturen und der zulässigen Überschreitungshäufigkeiten zu erwarten sind, muss über entsprechende Maßnahmen gegengesteuert werden (z. B. Reduzierung Glasflächenanteil, Sonnenschutzverglasung, bessere Qualität des außenliegenden Sonnenschutzes). Ist dies nicht in ausreichendem Maß möglich oder führt dies nicht zu einem befriedigenden Ergebnis, sind Maßnahmen für eine sommerliche Raumtemperierung zu ergreifen, z. B. über eine Flächenkühlung oder

eine Bauteilaktivierung. Die Kühlung über nicht maschinell erzeugte Kälte ist stets vorzuziehen (z. B. passive Kühlung über Geothermie/Brunnen oder eine Zulufttemperierung über eine Wärmerückgewinnung mit adiabater Abluftkühlung bei ohnehin erforderlicher RLT).

Bei der Ermittlung von inneren Lasten ist von realistischen Werten auszugehen. In den meisten Fällen kann auf die Berücksichtigung der Beleuchtungswärme verzichtet werden. Bei der Bemessung von Wärmelasten durch PC, Bildschirm, Drucker, Beamer etc. ist davon auszugehen, dass diese Geräte nicht während der gesamten Nutzungszeit mit der maximalen Stromaufnahme betrieben werden. Bei der Personenwärme genügt die Berücksichtigung der sensiblen (trockenen) Wärmelast. Interne Lasten müssen durch einen angemessenen Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden.

Die Verordnungen EU 2016/2281 und EU 2015/1095 definieren verbindliche Effizienzkennwerte für Komfortkühler und Prozesskühler im Sinne der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG. Tabelle 6 zeigt die Mindestwerte des primärenergetischen Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrades $\eta_{s,c}$ für Komfortkühler und Tabelle 7 die Mindestwerte der Jahresarbeitszahlen SEPR für Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur.

Tabelle 6, Mindestwert des primärenergetischen Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrades ($\eta_{s,c}$) für Komfort-Wasserkühler mit Elektromotor nach EU 2016/2281

Wärmeübertragungsmedium — kondensationsseitig	Nennkälteleistung	$\eta_{s,c}$ [%] Mindestwert ab 01.01.2018	$\eta_{s,c}$ [%] Mindestwert ab 01.01.2021
Luft	$P_A < 400 \text{ kW}$	149	161
	$P_A \geq 400 \text{ kW}$	161	179
Wasser	$P_A < 400 \text{ kW}$	196	200
	$400 \text{ kW} \leq P_A < 1500 \text{ kW}$	227	252
	$P_A \geq 1500 \text{ kW}$	245	272

Tabelle 7, Mindestwert der Jahresarbeitszahl (SEPR) für Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur nach EU 2016/2281

Wärmeübertragungsmedium — kondensationsseitig	Nennkälteleistung	SEPR- Mindestwert ab 01.01.2018	SEPR- Mindestwert ab 01.01.2021
Luft	$P_A < 400 \text{ kW}$	4,5	5,0
	$P_A \geq 400 \text{ kW}$	5,0	5,5
Wasser	$P_A < 400 \text{ kW}$	6,5	7,0
	$400 \text{ kW} \leq P_A < 1500 \text{ kW}$	7,5	8,0
	$P_A \geq 1500 \text{ kW}$	8,0	8,5

Für gewerbliche Kühllagerschränke, Schnellkühler/-froster, Verflüssigungssätze und Prozesskühler mit mittleren und niedrigen Betriebstemperaturen gelten bereits ab 01.07.2016 verbindliche Mindesteffizienzwerte gemäß EU 2015/1095, die ab 01.07.2018 noch einmal verschärft werden. Tabelle 8 zeigt die Mindestwerte der Jahresarbeitszahlen JAZ für Prozesskühler mit mittlerer und niedriger Betriebstemperatur.

Tabelle 8, Mindestwert der Jahresarbeitszahl (JAZ) für Prozesskühler nach EU 2015/1095

Wärmeübertragungsmittel auf der Verflüssigungsseite	Betriebs-temperatur	Nennkälte-leistung PA	JAZ-Mindestwert ab 01.07.2016	JAZ-Mindestwert ab 01.07.2016
Luft	Mittel	$P_A \leq 300 \text{ kW}$	2,24	2,58
		$P_A > 300 \text{ kW}$	2,80	3,22
	Niedrig	$P_A \leq 200 \text{ kW}$	1,48	1,70
		$P_A > 200 \text{ kW}$	1,60	1,84
Wasser	Mittel	$P_A \leq 300 \text{ kW}$	2,86	3,29
		$P_A > 300 \text{ kW}$	3,80	4,37
	Niedrig	$P_A \leq 200 \text{ kW}$	1,82	2,09
		$P_A > 200 \text{ kW}$	2,10	2,42
Für Prozesskühler mit einem Kältemittel-Fluid, dessen Treibhauspotenzial GWP weniger als 150 beträgt, dürfen die Werte für JAZ um höchstens 10 % niedriger als die angegebenen Werte sein.				

Darüber hinaus sind unter Beachtung der F-Gase-Verordnung (EU 2024/573) zukunftssichere Kältemittel einzusetzen (→ Kapitel 3).

Bei der Festlegung der Einzelkomponenten der Anlage ist eine effiziente Übergabestrategie zu berücksichtigen.

Die Trennung von Lüftung und Kühlung mit Luft-Wassersystemen führt zu hohen spezifischen Kühllasten. Gleichzeitig muss nur der hygienisch erforderliche Außenluftanteil abgekühlt werden. Die Trennung von Kühlung und Entfeuchtung ist unter dem Aspekt der Energieeffizienz zu bewerten.

Die Aufstellorte und Aufstellbedingungen für die Anlagentechnik sind so wählen, dass ungünstige mikroklimatische Bedingungen die Funktionsweise nicht negativ beeinflussen.

Hauptziel der Auslegung muss es sein, möglichst hohe Verdampfungstemperaturen und möglichst niedrige Kondensationstemperaturen im Auslegungspunkt und unter den variablen Betriebsbedingungen zu erreichen. Grundsätzlich führt eine Erhöhung der Kaltwassertemperaturen und eine Absenkung der Kühlwassertemperaturen zu einer Steigerung der Leistungszahl EER (Energy Efficiency Ratio) und damit zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs. Abbildung 8 zeigt den theoretisch möglichen Verbesserungseffekt für einen Kaltwassersatz mit Kaltwasser 6/12°C und Kühlwasser 31/37°C.

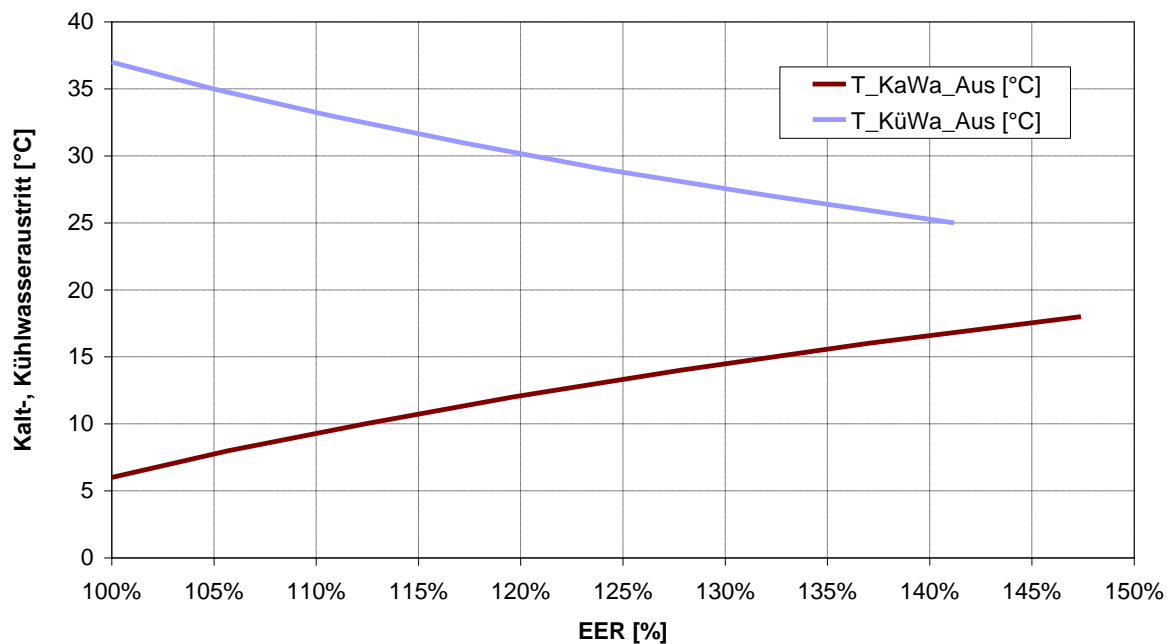


Abbildung 9, Einfluss der Systemtemperaturen auf die Leistungszahl einer Kältemaschine im Bereich der Komfortanwendung (Carnot-Umrechnung)

Die Berechnung von Jahresleistungszahlen SEER und damit energetische Systemvergleiche für verschiedene Arten von Kälteerzeugungssystemen mit unterschiedlichen Systemtemperaturen und Betriebsweisen ermöglicht DIN EN 16798 in den Teilen 9 bis 15.

Für Ausschreibung und Vergabe gilt die VOB in ihrer aktuellen Fassung. Kälteanlagen sind unter DIN 18379 Raumluftechnische Anlagen berücksichtigt. Neben den klassischen Auslegungsparametern und den Ecodesign-Mindesteffizienzwerten müssen verbindlich einzuhaltende energetische Kennwerte in der Leistungsbeschreibung vereinbart werden.

Weiterhin müssen zusätzlich zu den technischen Regeln auch Gesetze und Verordnungen beachtet werden, die den Schutz der Umwelt sicherstellen sollen. In diesen Zusammenhang sind exemplarisch das Wasserhaushaltsgesetz und die Gefahrstoffverordnung zu nennen.

Nachfolgend sind die möglichen Ablaufschritte bei der Planung von kältetechnischen Anlagen dargestellt:

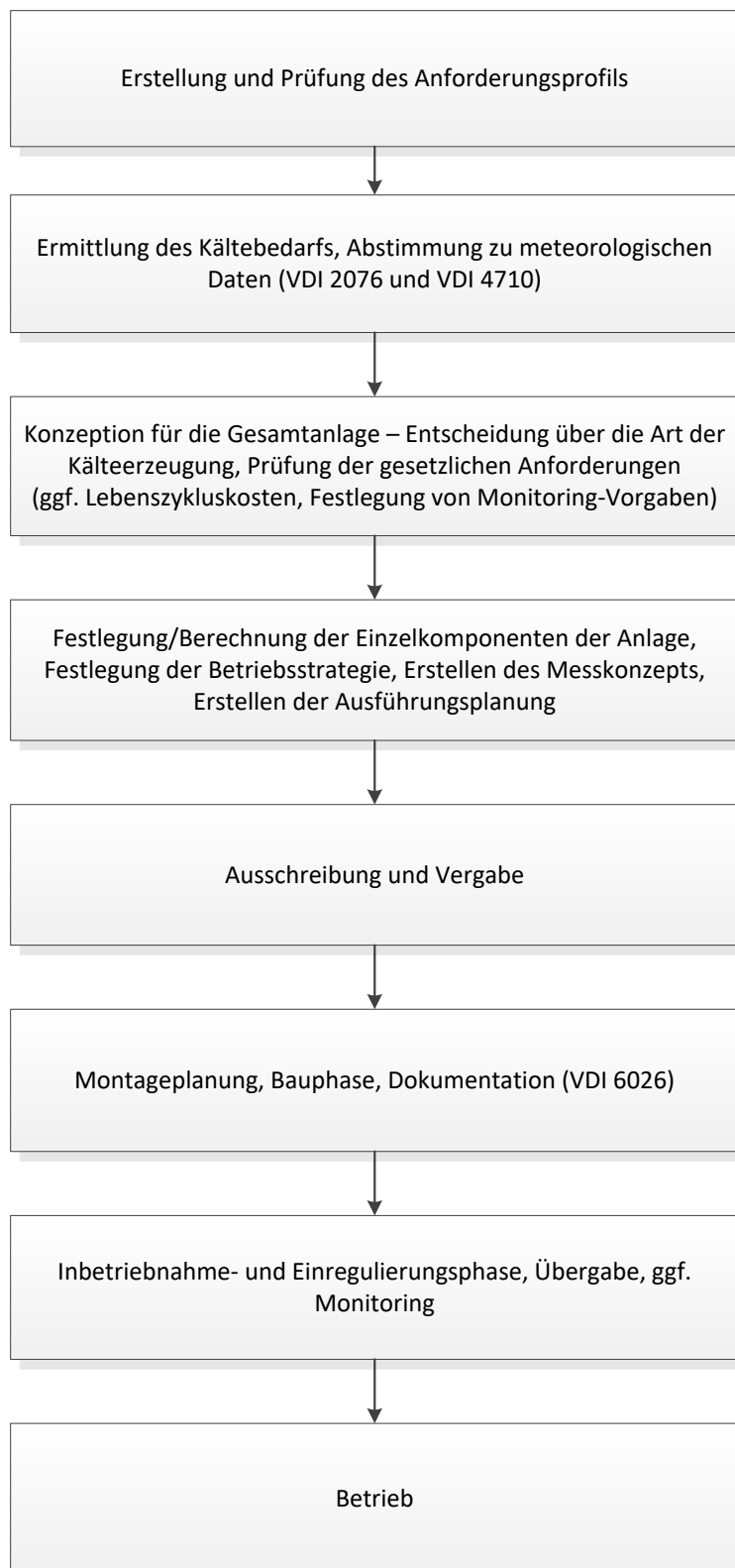


Abbildung 10, mögliche Ablaufschritte bei der Planung einer kältetechnischen Anlage

5.2 Netze und Hydraulik

5.2.1 Direkte Kühlung – Direkt verdampfende Systeme

Die Netze der direkt verdampfenden Systeme sind auf Basis der Herstellerangaben auszulegen.

Für den Betrieb von Kälteanlagen stellen die Rohrleitungen eine wichtige Baugruppe dar. Fehler in der Auslegung sowie in der Installation führen zu Funktionsstörungen und zu Schäden an der Kälteanlage.

Ein typisches Rohrmaterial für Kältemittelleitungen ist Kupfer nach DIN EN 12735. Es dürfen nur Kupferrohre verwendet werden, die dieser Norm entsprechen. Die Anforderungen der Druckgeräterichtlinie (DGRL) und der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) sind zu beachten.

Es wird empfohlen die Rohrleitung durch nicht lösbare Verbindungen (Hartlöten) zu verbinden. Lösbare Verbindungen sind auf ein Minimum zu beschränken. Bei der Verarbeitung ist darauf zu achten, dass nur saubere und staubfreie Rohre verwendet werden.

Bei der Dimensionierung von Rohrleitungen ist darauf zu achten, dass der Druckverlust innerhalb des Systems gering ist. Bei Rohrleitungen mit dampfförmigen Kältemitteln muss sichergestellt werden, dass der Öltransport erfolgen kann (Sauggasgeschwindigkeit 4 – 8 m/s). Weiterhin sind die maximal zulässigen Rohrlängen und Höhenunterschiede entsprechend des gewählten Systems einzuhalten.

Nach Abschluss der Installation ist das Gesamtsystem einer Dichtheitsprüfung zu unterziehen. Der Nachweis ist vom Anlagenerrichter zu übergeben.

Alle Rohrleitungen incl. Einbauten sind entsprechend Gebäudeenergiegesetz (GEG) zu dämmen. In diesen Zusammenhang ist ein besonderes Augenmerk auf die Befestigungen (Rohrbefestigungen mit ausreichender Dämmeinlage) und Rohrdurchführungen zu legen. Des Weiteren ist bei der Rohrinstallation auf einen ausreichenden Verlegeabstand zu achten (DIN EN 378-2). Mangelhafte Dämmung führt zu Energieverlusten bzw. zur Bildung von Tauwasser auf der Oberfläche.

Flüssigkeits- und Gasleitungen dürfen nicht gemeinsam gedämmt werden. Bei der Auswahl des Dämmmaterials sind sowohl die max. auftretenden Systemtemperaturen (Dämmung mit schwerentflammbarem Material) als auch die Umgebungtemperaturen zu beachten. Üblicherweise kommt ein geschlossenzelliges (diffusionsdichtes), flexibles, synthetisches Kautschukmaterial in schwerentflammbarer Ausführung zum Einsatz.

Die DIN 2405, „Rohrleitungen in Kälteanlagen und Kühleinrichtungen – Kennzeichnung“, legt unter anderem fest, wie Rohrleitungen mit Kältemittel, Kühlmittel und Kälteträger, die außerhalb eines geschlossenen Bausatzes verlegt sind, zu kennzeichnen sind.

Arbeiten an kältemittelführenden Systemen dürfen nur von qualifizierten Fachfirmen durchgeführt werden. Die Qualifikationen sind vorzulegen.

5.2.2 Kalt und Kühlwasser

Im Unterschied zu Warmwassersystemen werden Kalt- und Kühlwassernetze mit geringen Temperaturdifferenzen und infolgedessen mit höheren Volumenströmen ausgelegt. Abweichungen von der Soll-Temperatur haben daher deutlich höhere Auswirkungen auf die Leistung der Kälteverbraucher. Zudem arbeiten Kältemaschinen nur in bestimmten Temperaturbereichen, was die möglichen Medientemperaturen stark einschränkt. Bereits geringe Temperaturabweichungen können zu Anlagenstörungen führen, insofern haben Kalt- und Kühlwassernetze hohe Anforderungen an die Temperaturgenauigkeit. Die Hydraulik muss daher so einfach wie möglich sein und sehr präzise geplant werden, um eine hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten. Hierbei ist insbesondere auf eine kluge Einbindung von Kaltwassererzeuger und Kälteverbraucher zu achten.

Neben der hohen Funktionalität muss hauptsächlich auf einen effizienten und wirtschaftlichen Betrieb des Gesamtsystems geachtet werden. Große Einsparpotentiale bieten optimierte Betriebstemperaturen, bedarfsgerechte Volumenströme, der Einsatz von freier Kühlung sowie die Nutzung der anfallenden Wärme (Wärmerückgewinnung). Solche Anlagenkonzepte lassen eine hohe Effizienz bei geringen Betriebskosten erwarten.

Die Kaltwassertemperaturen sollen möglichst hoch gewählt werden, damit die Arbeit des Verdichters und dessen Stromaufnahme gering ist. Vorlauftemperaturen von 6°C sollten nur bei Kälteanwendungen mit kontrollierter Entfeuchtung (z.B. Museen) angesetzt werden. Bei RLT-Anlagen in Verbindung mit einer Flächenkühlung ist zur Vermeidung von Kondensation oft eine Teilentfeuchtung notwendig, daher sollen hier Kaltwassertemperaturen ab 10 °C gewählt werden. Für Kälteanwendungen ohne Entfeuchtung sollten die Temperaturen über 14 °C bzw. bei Komfortkühlungen (z.B. Kühldecken) sogar über 18 °C gewählt werden.

Unterschiedliche Anwendungen werden zu Verbraucher-Gruppen zusammengefasst, deren Temperatur jeweils geregelt werden kann. Sind große Temperaturunterschiede vorhanden, z.B. RLT-Anlagen mit 6 °C und Kühldecken mit 18 °C, sollte der wirtschaftliche Einsatz einer zweiten Kälteanlage geprüft werden.

Die hydraulischen Systeme sollen möglichst mit variablen Volumenströmen geplant und betrieben werden. Das hat im Teillastbetrieb den Vorteil von geringen Pumpendrehzahlen (Einsparung von Pumpenenergie) und hohe Rücklauftemperaturen werden erzielt. Infolgedessen erhöht sich der Verdampfungsdruck und der Verdichtungsprozess benötigt weniger Energie. Variable Systeme sind daher wesentlich effizienter als konstante Systeme.

Um die Hydraulik entsprechend aufzubauen, müssen die einzelnen Kälteverbraucher, z.B. Kühldeckenelemente oder Umluftkühler über eine mengenvariable Drosselschaltung hydraulisch eingebunden werden. Die Leistungsregelung erfolgt dann über den stetigen Ventilhub der Regelventile, die im Teillastbetrieb ihren Durchfluss verringern. Im System ändern sich dabei ständig die Druckverhältnisse und es besteht die Gefahr, dass einzelne Verbraucher Über- oder Unterversorgung werden. Um das zu vermeiden, müssen die Kreise hydraulisch abgeglichen werden. Als effiziente Lösung hat sich die Verwendung von druckunabhängigen Regelventilen etabliert, die Differenzdruckregler und Regelventil in

einem Ventil kombinieren. In Verbindung mit einer stetigen Regelung können sie unabhängig von Druckschwankungen eine stabile Raumtemperatur ohne Schwingen der Stellantriebe sicherstellen.

Die Verteiler sind das Bindeglied zwischen der Kälteerzeugung und den Verbrauchern. Hier werden die einzelnen Gruppen zur individuellen Einstellung mit einer Temperaturregelung ausgestattet. Als besonders energieeffizient und zukunftsorientiert ist die hydraulische Einbindung mit einem druckbehafteten Verteiler und Verbraucherschaltungen mit variablen Volumenströmen. Dabei werden die einzelnen Verbrauchergruppen über Einspritzschaltungen mit Durchgangsventilen oder über Drosselschaltungen eingebunden. Der Volumenstrom der drehzahlgeregelten Hauptpumpe entspricht dann exakt der Summe aller angeschlossenen Verbraucherkreise. Auch hier kann mit dem Einsatz druckunabhängiger Regelventile eine gegenseitige Beeinflussung der Verbrauchergruppen vermieden werden. Für jede Gruppe wird somit nur ein bedarfsgerechter Volumenstrom gefördert und es stellt sich eine hohe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf ein, welches einen effizienten Kältemaschinen-Betrieb gewährleistet.

Komplexe Kälteanlagen und Anlagen mit mehreren Kälteerzeugern werden oft als Zwei-Kreis System mit hydraulischer Entkopplung (z.B. ein Speicherbehälter als hydraulische Weiche) aufgebaut. Hier haben Erzeuger- und Verbraucherkreislauf jeweils separate Kaltwasserpumpen, die unabhängig voneinander arbeiten und sich gegenseitig nicht beeinflussen. Erzeuger- und Verbraucherkreis können dann mit unterschiedlichen Volumenströmen betrieben werden, welches beispielsweise bei der Verwendung von Kältemaschinen mit konstantem Volumenstrom notwendig ist.

Speicher reduzieren die Schalthäufigkeit der Kältemaschinen, können die Energie über den Tag verschieben und tragen zur Gutmütigkeit des Gesamtsystems bei. Bei der Einbindung von hydraulischen Entkoppler muss auf die Vermeidung von Behälterdurchmischungen geachtet werden, damit eine Temperaturschichtung entsteht und die hohen Temperaturdifferenzen erhalten bleiben. Aus diesem Grund werden Speicher oft mit Einbauten (z.B. Lochblechen) zur Strömungsberuhigung ausgestattet.

Systeme mit variablem Durchfluss im Erzeuger- und Verbraucherkreis können auch ohne eine hydraulische Entkopplung mit einem Bypassventil sehr effizient betrieben werden. Diese Anlagen sind einfach aufgebaut und Kälteerzeuger und Verbraucher werden über eine gemeinsame Pumpe mit Kaltwasser versorgt. Das Bypassventil stellt den Mindestvolumenstrom der Kältemaschinen sicher und wird zwischen Vor- und Rücklauf eingebaut. Bei hoher Last bleibt das Bypassventil geschlossen und es fließt der gleiche Volumenstrom durch Maschinen und Verbraucher. Wird die Gebäudelast so gering, dass der mind. Volumenstrom unterschritten wird, öffnet es und über den Bypass fließt so viel Kaltwasser, bis der Vorgabewert der Maschinen wieder erreicht wird. Die Verbraucher erhalten dann einen geringeren, jedoch der Last angepassten Volumenstrom. Eine regelungstechnische Ansteuerung des Ventils kann über einen Durchflussmesser oder über den Differenzdruck des Verdampfers erfolgen. Dieser Systemaufbau gewährleistet besonders hohe Anlagenwirkungsgrade.

Die hydraulische Einbindung der Kältemaschinen orientiert sich an den herstellereigenen Betriebsgrenzwerten, die für jede Maschine angegeben werden und unter allen Betriebsbedingungen eingehalten werden müssen. Hierzu gehören die Temperaturbereiche, die Temperaturdifferenzen und die Volumenströme durch Verflüssiger und Verdampfer.

Bei älteren Maschinen müssen die Volumenströme auch im Teillastbetrieb konstant bleiben, indessen können neue Maschinenregelungen die Volumenströme von ca. 20% bis 100% variieren und Ihre Leistung der momentan benötigten Last anpassen. Sie sind daher wesentlich effizienter als ältere Maschinen.

Die Anpassung erfolgt über die Ansteuerung der Pumpendrehzahl oder eines Regelventils über die Maschinenregelung.

Können Temperaturen außerhalb den Grenzwerten auftreten, z.B. in bestimmten Jahreszeiten oder Betriebszuständen, ist eine Temperaturbegrenzung erforderlich. In der kalten Jahreszeit kann beispielsweise die minimale Eintrittstemperatur in den Verflüssiger unterschritten werden, daher erfolgt dessen hydraulische Einbindung oft über eine Beimisch-Schaltung mit Dreiwegeventil.

Für den Verdampferkreis sind vorwiegend die maximalen Eintrittstemperaturen zu beachten. Hohe Anlagen-Rücklauftemperaturen verbessern zwar die Effizienz der Anlage, bei Grenzwertüberschreitungen führen sie jedoch zu Störungen. Im Anlagenanlauf mit hohen Wassertemperaturen kann auch die Anbindung des Verdampfers mit einer sogenannten Anfahrschaltung oder mit Bypass-Pumpen sinnvoll sein.

Alle Rohrleitungssysteme und Aggregate, die im Freien aufgestellt werden, z.B. Rückkühler, luftgekühlte Kaltwassersätze und Anbindeleitungen, müssen gegen Einfrieren geschützt werden. Vorwiegend sind daher Kühlturm und Rohrleitungen mit einem Gemisch aus Wasser und Glykol gefüllt. Es ist zu beachten, dass Glykol wassergefährdend ist und die entsprechenden Regeln des Wasserhaushaltsgesetzes einzuhalten sind. Es besteht z.B. die Pflicht, geeignete Schutzsysteme zu installieren (Auffang- und Rückhaltesysteme), um das Einleiten von Frostschutzmittel ins Abwasser oder Grundwasser zu verhindern. Auch verändern sich die Stoffeigenschaften des Kühlmediums wie die z.B. die spez. Wärmekapazität und die Viskosität, deshalb sind bei allen hydraulischen Berechnungen die geänderten Werte zu berücksichtigen. Sinnvoll ist auch eine Begrenzung des Glykolkreislaufes auf den unbedingt notwendigen Umfang. Insofern sollte er im frostsicheren Bereich vom übrigen Leitungsnetz mit einem Wärmeübertrager getrennt werden. Temperaturdifferenzen zwischen der Primär- und Sekundärseite von ca. 2 K sind zu beachten.

Mit einer freien Kühlung erfolgt die Kaltwassererzeugung durch Ausnutzung der kalten Außenluft ohne Verdichterbetrieb. Einsatzgebiete sind Anlagen mit ganzjährigen Kühllasten und relativ hohen Kaltwassertemperaturen, wie sie z.B. in EDV-Betriebsräumen, Telekommunikationsanlagen oder in der Prozesskühlung anzutreffen sind. In der Klimatechnik können damit Kühldecken oder Bauteilaktivierung sehr wirtschaftlich betrieben werden.

Sinkt die Außentemperatur unter die Kaltwassertemperatur, kann auf den freien Kühlbetrieb umgeschaltet werden. Je nach Anlagenkonfiguration ist auch ein Parallelbetrieb möglich. Die erzielbaren Energieeinsparungen sind abhängig von den Auslegungstemperaturen des

Kaltwasserkreislaufs, den Anlagenbetriebszeiten sowie vom jahreszeitlichen Lastprofil. Mit hohen Kaltwassertemperaturen und langen Betriebszeiten lassen sich die höchsten Einsparungen erzielen. Die Wärme wird entweder über den Rückkühler der Kältemaschine oder über einen zusätzlichen Rückkühler an die Außenluft abgegeben. Die hydraulische Einbindung kann parallel oder seriell in den Kaltwasserkreis erfolgen. Eine besonders hohe Effektivität hat die Variante mit zusätzlichen Rückkühler und serieller Einbindung. Hierbei ist auch ein Parallelbetrieb möglich, bei dem Kaltwasser vorgekühlt der Kältemaschine zugeführt wird.

Die Abwärme des Verflüssigers kann auch direkt zur Gebäudeheizung oder zur Warmwassererwärmung genutzt werden, wenn ein entsprechender Wärmebedarf vorliegt. Heizsysteme mit niedriger Temperatur z.B. Flächenheizungen sind dabei effizienter als Systeme mit höherer Temperatur, da hierfür die Verflüssigungstemperatur angehoben werden muss und infolge dessen der Strombedarf bei sinkender Leistungszahl steigt. Alternativ kann eine zusätzliche Wärmepumpe dem Verflüssiger nachgeschaltet werden. Eine weitere Möglichkeit der Wärmerückgewinnung bietet die Ausstattung mit einem zusätzlichen Verflüssiger. Der kann parallel oder in Serie zum Hauptverflüssiger angeordnet werden. Über Regelventile im Kältekreis wird entsprechend dem Bedarf der Heißgasdurchfluss stetig verändert. Die nicht nutzbare Wärme wird über den Hauptverflüssiger und den Rückkühler an die Umgebungsluft abgegeben.

Die Anbindung an das Heizsystem kann indirekt z.B. Wärmeübertrager oder direkt erfolgen. Eine zeitliche Verschiebung der Wärmenutzung ist mit einem entsprechend dimensionierten Speicher möglich.

Besonders effizient sind Anlagen mit Kältemaschinenbetrieb im Sommer, Wärmepumpenbetrieb im Winter und zusätzlicher Ankopplung an Erdwärmesonden. Hierbei wird im Sommer das Gebäude gekühlt und die überschüssige Wärme über Erdsonden dem Erdreich zugeführt. Im Winter arbeitet die Anlage im Wärmepumpenbetrieb mit einem höheren Temperaturniveau (verbesserte Leistungszahl). Dabei wird die Wärme wieder dem Erdreich entzogen, um sie zur Gebäudeheizung nutzen zu können.

Bei der Wahl von Rohrleitungsmaterialien ist auf den Betriebsdruck, die Wirtschaftlichkeit und die Korrosionsbeständigkeit zu achten. Meist werden Leitungen aus Stahl, Edelstahl oder Kunststoff verwendet. Bei offenen Systemen müssen wegen des erhöhten Sauerstoffanteils nicht rostende Rohre installiert werden. Infolge der niedrigen Kaltwassertemperaturen besteht die Gefahr von Kondensatbildung an den Rohroberflächen. Die entsprechenden Leitungen und Einbauteile müssen daher diffusionsdicht mit geeigneten Materialien, z.B. aus Vinylkautschuk oder Schaumglas, gegen Kondenswasser und Energieverluste gedämmt werden. Auf den Korrosionsschutz der Rohroberfläche (z.B. Anstrich) sowie einer thermischen Entkopplung der Befestigungen muss geachtet werden.

5.3 Regelung und Automatisierung

Leistungsregelung für Teillastbetrieb

Kälteanlagen werden für eine maximale Last bzw. für eine maximale Außentemperatur ausgelegt. Die Anlagen arbeiten jedoch im großen Teil der Zeit im Teillastbetrieb. Aus diesem Grund muss das Regelungskonzept so gewählt werden, dass ein störungsfreier und energieeffizienter Betrieb sowohl im Vollast- als auch im Teillastbetrieb gewährleistet ist. Dies kann durch eine Leistungsregelung der Anlage sichergestellt werden.

Dafür sind Regelbare Komponenten wie

- Verdichter bzw. Kaltwassersatz
- Ventilatoren bzw. Rückkühlwerke und
- Pumpen

notwendig (je nach Anwendungsfall). Neben der Drehzahl- bzw. Leistungsregelung der Komponenten ist auch eine Kaskadenschaltung (bei mehreren Kaltwassersätzen oder Verdichtern) für die Leistungsregelung geeignet.

Regelung der Nebenaggregate

Die Regelung von Nebenaggregaten wie z.B. Begleitheizungen (Abtau-, Ölsumpf-, Rahmenheizung) müssen auf das Gesamtkonzept abgestimmt werden. Einfache Zeitsteuerungen sind nicht zu empfehlen, da diese sich nicht an neue Anforderungen anpassen und oftmals einen unnötig hohen Energieverbrauch verursachen.

Betriebsstrategie

Um einen reibungsfreien Betrieb gewährleisten zu können, muss der Planer und/oder der Betreiber eine detaillierte Betriebsstrategie in der Planungsphase erarbeiten, auf deren Basis anschließend die Automatisierung der Anlage erfolgen kann. In einer Betriebsstrategie sollten unter anderem die folgenden Punkte festgelegt werden:

- Ein-, Aus- und Umschaltpunkte für Kältemaschinen, freie Kühlung, Abwärmenutzung, Wärmepumpenbetrieb
- Sollwerte für Kalt- und Kühlwasser | evtl. Bedingungen für gleitende Sollwerte
- Strategie zur Speicher Be- und Entladung
- Strategie zur Regelung im Teillastbetrieb für Kältemaschinen, Pumpen, Rückkühlwerke und Verbraucher | evtl. auch freie Kühlung
- Betriebsstrategien zur Maximierung der Energieeffizienz (Speicherbeladung bei Nacht und niedrigen Außentemperaturen)
- Bei Bedarf eine Betriebsstrategie zur Maximierung des Eigenstromverbrauchs (relevant bei lokaler Stromproduktion z. B. durch Photovoltaikanlagen)
- Sperrzeiten

Automationskonzept

Die Automatisierung von Anlagen kann grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen. Eine, vor allem in kleinen Kälteanlagen zur Lebensmittelkühlung und Klimatisierung verbreitete Variante ist die Verwendung von vorgefertigten Reglern, die eine einzelne Regelaufgabe (z.B. die Drehzahlregelung des Verdichters) oder die Regelung eines Teilsystems wie z.B. einer Kühlstelle übernehmen.

Die zweite Variante zur Automatisierung wird häufig in größeren Anlagen angewendet. Diese werden mit Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) automatisiert. Diese Variante bietet hinsichtlich eines späteren Anlagenmonitoring den Vorteil, dass die Automatisierung bzw. Datenerfassung nahezu beliebig erweiterbar ist.

Die Vor- und Nachteile beider Konzepte sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 9, Vor- und Nachteile von Einzelreglern und Automationsstationen

Vorgefertigte Einzelregler		Automationsstationen (SPS)	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
vorkonfiguriert	wenig flexibel	flexible Automations-Struktur	Regler müssen individuell programmiert werden
einfache Anwendung	Feldbus Schnittstellen nicht immer vorhanden	jederzeit erweiterbar	Evtl. höhere Investitionskosten
kostengünstig	abgeschlossenes System (Aus diesem Grund nicht zulässig (EPBD 2024 und GEG 2023))	offene, standardisierte Busprotokolle	
	Herstellerbindung bei Erweiterung	offene Programmierung	
	Herstellerbindung bei Datenlogger	flexible Einbindung in Gebäudeleittechnik	
	nur bedingt geeignet für Anlagenmonitoring (Ausschlusskriterium)	sehr gut geeignet für Anlagenmonitoring	

Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Konzepte sind Anwendungsspezifisch abzuwiegen.

Integration von Kälteanlagen in die Gebäudeautomation

Kälteanlagen sind wesentlicher und integraler Bestandteil der anlagentechnischen Ausrüstungen komplexerer Gebäude und müssen demnach in das gesamte Betriebskonzept nahtlos eingebunden werden.

D.h. diese müssen sowohl im anlagentechnischen Verbund als auch hinsichtlich Betriebsüberwachung und Betriebsoptimierung einen energetisch und wirtschaftlich optimalen Gebäudebetrieb ermöglichen.

Die Verwendung vorgegebener Standards der Kältemaschinenlieferanten ist kritisch zu hinterfragen,

Auf eine herstellernerneutrale Integration dieser Einrichtungen in die GA ist zu achten. Das betrifft den erforderlichen Umfang des Datenaustausches und die dafür notwendigen Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen.

Die Integration kältetechnischer Anlagen in die Gebäudeautomation zur intelligenten Steuerung und Überwachung bietet anlagenübergreifende Vorteile wie

- bedarfsgerechte Regelung der Kälteerzeugung
- optimierte Steuerung der Kälteverteilung
- Energieeffiziente Integration von Freikühlsystemen
- Optimierte Nutzung von Abwärme durch Rückgewinnungssysteme als Voraussetzung für die bedarfsgerechte Regelung und Erfüllung des GEG

Automationstechnische Insellösungen für die Kältetechnischen Anlagen sind zu vermeiden. Schnittstellen sind mit dem Planer der Gebäudeautomation als Integrator, sowie den Bauherren im Sinne eines koordinierten Gesamtansatzes abzustimmen.

Dokumentation der Automatisierung für den Betrieb

Voraussetzung für einen nutzungs-, fachgerechten und rechtssicheren Betrieb ist eine vollständige und aktualisierte Dokumentation der gesamten technischen Gebäudeausrüstung und des kompletten GA-Systems. Die zu übergebenden Unterlagen orientieren sich an der VOB/C (DIN 18386). Weitere Vorgaben zur Übergabe von Unterlagen können der VDI 6026 und VDI 3814 entnommen werden (u.a. VDI 3814 Blatt 4.1 bis 4.3).

Zu den erforderlichen Unterlagen gehören u. a. Funktions- und Anlagenbeschreibung, Beschreibung der GA-Komponenten, projektspezifische Programminformationen, Betriebsunterlagen und Nachweise.

Weitere Hinweise sind der AMEV-Empfehlung Gebäudeautomation zu entnehmen.

5.4 Bauliche Integration der Kälteanlagen

Die baulichen Anforderungen an die Aufstellung einer Kälteanlage richten sich sowohl nach der Kategorie der Zugangsbereiche und der Klassifikation der Aufstellungsorte von Kälteanlagen in dem die Kälteanlage untergebracht ist, als auch nach Eigenschaft und Menge des eingesetzten Kältemittels (siehe Kapitel 3).

Die Kategorien der Zugangsbereiche werden dabei wie folgt unterteilt:

- a) Allgemeiner Zugangsbereich „a“
- b) Überwachter Zugangsbereich „b“
- c) Zugangsbereich zu denen nur befugte Personen Zutritt haben „c“

Die Klassifikation der Aufstellungsorte von Kälteanlagen werden in vier Klassen kategorisiert:

- a) Klasse VI – belüftetes Gehäuse
- b) Klasse III – Maschinenraum oder im Freien
- c) Klasse II – Verdichter im Maschinenraum oder im Freien
- d) Klasse I – Mechanische Geräte im Personen-Aufenthaltsbereich

Aus diesen Faktoren und die Art des eingesetzten Kältemittels (ATEL/ODL, praktischer Grenzwert und LFL) ergeben sich nach DIN EN 378-1 Anhang C die Anforderungen an die maximale Füllmenge die ein Raum aufnehmen kann.

Generell können kältetechnische Komponenten außerhalb des Gebäudes im Freien oder in einem gekennzeichneten Maschinenraum oder in Aufenthaltsräumen (mit und ohne Personen) aufgestellt werden.

Maschinenräume müssen im Gebäude so angeordnet werden, dass der Austausch von Aggregaten und Anlagenteilen nach Ablauf ihrer konstruktiven Lebensdauer mit einem vertretbaren Aufwand möglich ist.

Zur Vermeidung von Körperschallübertragung sind für die Verdichter und Kühlsätze schwingungs- und geräuschdämmende Unterlagen ebenso wie flexible Wasseranschlüsse und elastische Rohraufhängungen erforderlich.

Verkleidungen der Wände und der Decke des Maschinenraumes mit schallabsorbierendem Material können bei hohen Schalleistungspegeln erforderlich werden. Berechnungen des resultierenden Schalldruckpegels sind durchzuführen. Die Vorgaben der TA-Lärm sind einzuhalten.

Für die Aufstellung von Kältetechnischen Komponenten im Freien gelten folgende Forderungen:

Bei einer Aufstellung im Freien bzw. auf dem Dach darf bei einer Leckage kein Kältemittel in Belüftungsöffnungen, Türöffnungen oder ähnliche Öffnungen eindringen. Die Gefährdung von angrenzenden Gebäuden oder andere Gefahren für Personen sind zu vermeiden. Des Weiteren können die Anforderungen gemäß dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) gelten.

Die wichtigsten Forderungen zur Einhaltung des WHG sind:

- Abschaltung der Anlage im Leckagefall durch eine typgeprüfte Sicherheitseinrichtung.
- Füllstandsüberwachung
- Öl-Glykoliauffangwanne
- Gassensoren
- Doppelrohrsysteme

Bei einer Aufstellung von Kältetechnischen Komponenten in einem Maschinenraum gelten folgende Forderungen:

Ein Maschinenraum gilt als vollständig umschlossener Raum oder Bereich mit mechanischer Belüftung, der gegenüber öffentlichen Bereichen abgetrennt und der Öffentlichkeit nicht zugänglich sowie dafür vorgesehen ist, die Bauteile der Kälteanlage zu enthalten. Der Maschinenraum muss die Anforderungen der DIN EN 378 – 3 erfüllen und als solcher gekennzeichnet sein. Es muss eine Risikoanalyse des Sicherheitskonzeptes für die Kälteanlage durchgeführt werden (entsprechend den Angaben des Herstellers unter Beachtung der Füllmenge und Sicherheitsklassifikation des verwendeten Kältemittels), um zu ermitteln, ob die Aufstellung der Kälteanlage in einem separaten Maschinenraum erforderlich ist.

Maschinenräume für kältetechnische Komponenten dürfen auch für andere Einrichtungen genutzt werden, wenn es sich nicht um einen separaten Maschinenraum handelt.

Maschinenräume sollten nicht als Personen-Aufenthaltsbereiche genutzt werden. Der Gebäudeeigentümer oder –betreiber muss sicherstellen, dass der Zugang nur durch entsprechend sachkundiges/unterwiesenes Personal erfolgen kann.

Generell sind die baulichen Anforderungen an Maschinenräume entsprechend der Landesbauordnung (bzw. der DIN EN 378) zu beachten. Wichtige Anforderungen an Maschinenräume sind z. B.:

- Kältemittel darf nicht in benachbarte Räume, Treppenaufgänge, Höfe, Gänge oder Entwässerungssysteme des Gebäudes gelangen, entweichende Gase müssen nach außen abgeführt werden.
- Wände, Boden und Decken müssen feuerbeständig und dicht sein.
- Es sind Vorkehrungen zu treffen, die bei einem Notfall das sofortige Verlassen des Maschinenraumes ermöglichen.
- Mindestens ein Notausgang erforderlich (unter Beachtung der Landesbauordnung)
- Die Türen müssen feuerfest, dicht, selbstschließend und von innen zu öffnen sein (Anti-Panik-System).
- Befinden sich Verbrennungsanlagen oder Luftverdichter im Maschinenraum, so muss deren Luftzufuhr so ausgeführt sein, dass kein Kältemittel angesaugt werden kann.
- Die Abschaltung der Kälteanlage muss außerhalb des Maschinenraumes in der Nähe seiner Tür über einen Not-Fernschalter möglich sein. Ein Schalter mit vergleichbarer Funktion ist auch im Maschinenraum an geeigneter Stelle vorzusehen. Die Schalter müssen den Anforderungen an Notschalter nach EN ISO 13850 und EN 60204-1 entsprechen.
- Maschinenräume müssen mit einer mechanischen Belüftung ausgestattet sein. Die Lüftung muss von außerhalb des Raumes schaltbar sein und für übliche Betriebsbedingungen und auch Notfallsituationen ausgelegt sein.
- Zur Abfuhr der Verdichterwärme ist in der Regel eine Maschinenraumbelüftung notwendig. Hier gilt: In der Regel ist der erforderliche Luftvolumenstrom zum Abführen der Abwärme des Flüssigkeitskühlsatzes wesentlich größer, als der nach DIN 378-3 aufgrund der Kältemittelfüllmenge notwendige Luftwechsel.
- Rohrleitungen und Kanäle die durch den Maschineraum führen müssen dicht sein, dies gilt ebenfalls für ihre Durchführungen. Die Abdichtung muss mindestens gleichwertige Eigenschaften im Hinblick auf die Feuerbeständigkeit aufweisen wie die Wände, Decken und Böden
- Maschinenräume müssen so bemessen sein, das für Aufstellung und Instandhaltung genügend Platz vorhanden ist.
- Abblaseleitungen dürfen an ungefährdeter Stelle abblasen oder in einen geeigneten Absorptionsstoff geleitet werden. Kältemittel der Klasse A1 dürfen in den Maschinenraum abblasen, wenn ihr Grenzwert nicht überschritten wird. Dieses Abblasen des Kältemittels solle auf eine Weise erfolgen, durch die Personen und Eigentum nicht gefährdet werden

Für Kältemaschinen mit Kältemittel der Gruppen A2L, A2, A3, B2L, B2 und B3 gelten für den Maschinenraum weitere Anforderungen.

Aufstellung von Kältetechnischen Komponenten in Aufenthaltsräumen

Die nachfolgende Tabelle zeigt die maximale Füllmenge (m_{zul}) an Kältemittel der Sicherheitsklasse A1 in Abhängigkeit vom Zugangsbereich (a, b, c) und den Aufstellungsort der Kälteanlage (Kat. II) für eine direkte Anlage (Auszug aus der DIN EN 378-1 / Anhang C / Tabelle C.1). Gegebenenfalls ist eine weiterführende Risikoanalyse unter Beachtung länderspezifischer Vorschriften für Gebäude durchzuführen.

Tabelle 10, maximale Füllmenge an Kältemittel in Abhängigkeit vom Aufstellort

Zugangsbereich Aufstellort „Klasse II“	Allgemeiner Zugangsbereich „a“	Überwachter Zugangsbereich „b“	Zugangsbereich, zu dem nur befugte Personen Zutritt haben „c“
Sofern sich alle Verdichter und Druckbehälter im Maschinenraum oder im Freien befinden, gelten die Anforderungen an einen Aufstellungsort der Klasse II [...]	Toxizitätsgrenze ¹ * Raumvolumen oder siehe C.3 ² $m_{zul} = p_L * V_R$ oder, $m_{zul} = ATEL/ODL * V_R$	keine Begrenzung der Füllmenge ³	keine Begrenzung der Füllmenge ⁶

m_{zul} = Maximale Füllmenge [kg]; p_L = praktischer Grenzwert [kg/m³]; ATEL/ODL = Expositionsgrenzwert für die akute Toxizität + Grenzwert für Sauerstoffmangel [kg/m³]; V_R = Rauminhalt (kleinster Raum) [m³]

Allgemein ist bei Ammoniak-Kälteanlagen zu beachten:

- Bei luftgekühlter Verflüssigung ist die Aufstellung im Freien vorzuziehen
- Generell ist die Aufstellung des Hochdruckteils nur im 1. U.G. und darüber zulässig
- Wenn kein besonderer Maschinenraum vorhanden ist, darf die Füllmenge von 50 kg in der Anlage nicht überschritten werden
- Verbrennungsanlagen und Druckluftkompressoren sind im selben Raum mit R717-Anlagen nicht erlaubt
- Betreten der Anlage nur für befugte Personen
- Es ist eine Be- und Entlüftung des Maschinenraumes vorzusehen, wobei die Abluft unter der Decke abzusaugen ist (Ammoniak ist leichter als Luft, ein Großteil der Kältemittel ist schwerer als Luft)
- Für den Leckagefall ist ein Abblasen der Maschinenraumluft gefahrungsfrei ins Freie vorzunehmen
- Kann das Abblasen der Maschinenraumluft nicht gefahrungsfrei geschehen, so ist diese durch ein Absorbersystem zu leiten und gereinigt dem Maschinenraum wieder zuzuführen
- Eine Einrichtung zur Augenspülung muss vorgehalten werden, ab 1.000 kg Füllmenge muss eine Notdusche vorhanden sein

¹ Toxizitätsgrenze entspricht entweder den ATEL/ODL oder dem praktischen Grenzwert des Kältemittels, je nachdem welcher der Werte größer ist.

² Alternative für das Risikomanagement von Kälteanlagen im Personen-Aufenthaltsbereich (DIN EN 378-1 Anhang C Kapitel C.3)

³ Für die Aufstellung im Freien gilt DIN EN 378-3 Kapitel 4.2, und für Maschinenräume DIN EN 378-3 Kapitel 4.3

5.5 Inbetriebnahme

Vor Inbetriebnahme einer neu errichteten oder einer wesentlich veränderten Kälteanlage müssen gemäß EU-Recht folgende Dokumente beim Betreiber vorliegen:

- Konformitätserklärung des Anlagenerstellers/ Herstellers entspricht der CE-Kennzeichnung
- Betriebsanleitung des Herstellers
- Fachunternehmererklärung (inkl. aller erforderlichen Nachweise wie z. B. Dichtigkeitsprüfung)

Durch das Anbringen der CE-Kennzeichnung bestätigt der Hersteller, dass das Produkt produktspezifischen europäischen Richtlinien entspricht. Bei Kälteanlagen z. B. der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Die CE-Kennzeichnung bestätigt die Einhaltung der gesetzlichen Mindestanforderungen. Ebenso erstellt der Hersteller eine Konformitätserklärung.

Soweit erforderlich ist für dieses Konformitätsbewertungsverfahren eine notifizierte Stelle einzubeziehen. Sie erfolgt anhand harmonisierter europäischer Normen, bei Kälteanlagen z.B. auf Grundlage der DIN EN 378-2.

Der Betreiber erstellt auf der Grundlage seiner Gefährdungsbeurteilung sowie der Betriebsanleitung des Herstellers die Betriebsanweisung. Er sorgt dafür, dass Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen als technische Arbeitsmittel vor Ihrer ersten Inbetriebsetzung durch eine zur Prüfung befähigte Person einer technischen Prüfung und Ordnungsprüfung (TRBS 1201 und TRBS 1201-2) unterzogen werden.

In der Betriebsanweisung müssen Informationen zum verwendeten Kältemittel, den Druck- und Temperaturstufen, Notfallanweisungen, Warnhinweise, zur Schutzausrüstung sowie zu Erste-Hilfe-Leistungen enthalten sein.

Bei überwachungsbedürftigen Anlagen gemäß BetrSichV Anhang 2 Abschnitt 4, ist die Prüfung der Anlage entweder von einer zugelassenen Überwachungsstelle oder zur Prüfung befähigten Person vorzunehmen (BetrSichV Anhang 2 Abschnitt 4 Kapitel 6 „Prüfzuständigkeiten“ Tabellen 3-9).

5.5.1 Dokumentation nach VDI 6026

Hinweise zum Betrieb finden sich in der VDI 3810 und in der DIN EN 378 Teil 4, hier sind auch die notwendigen Dokumentationen (u.a. Betriebsbücher) für die Betriebsphase gelistet.

Der Umfang der Dokumentation zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme wird in der VDI 6026 „Dokumentation der Technische Gebäudeausrüstung“ auch für den Bereich der Kälteanlagen – Kostengruppe 434 der DIN 276 definiert.

Sie beschreibt die Erstellung der notwendigen Planunterlagen von der Vorentwurfsphase einer Baumaßnahme bis zu Ihrem Abschluss, insbesondere auch den Umfang der Revisionsunterlagen (im Abschnitt 4.7). Im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen des Facility-Managements wurde 2015 das Blatt 1.1 als Weißdruck veröffentlicht.

Neben dem Anlagenschema ist auch das GA-Automationschema und die GA-Funktionsliste nach VDI 3814 Blatt 1 einzufordern. Ggf. sind die Steuerungsaufgaben zusätzlich nach VDI 3814 Blatt 6 zu beschreiben.

Für Liegenschaften der Bundeswehr wurde der sogenannte Checklistenmaster entwickelt, der auf Grundlage einer Datenbank anwendungsbezogenen konkrete Anforderungen an den Umfang der Dokumentation stellt. Die entsprechenden Leistungsmerkmale müssen rechtzeitig im Rahmen der Ausführungsplanung zwischen dem Betreiber und der Bauverwaltung vereinbart werden (www.fib.de).

5.6 Beispielhafte Systemlösungen

5.6.1 System mit hydraulischer Entkopplung und Freikühlung

Kaltwassererzeuger, wassergekühlt, mit hydraulischer Entkopplung als Speicher, variable Volumenströme, Rückkühlwerk und Freikühlfunktion.

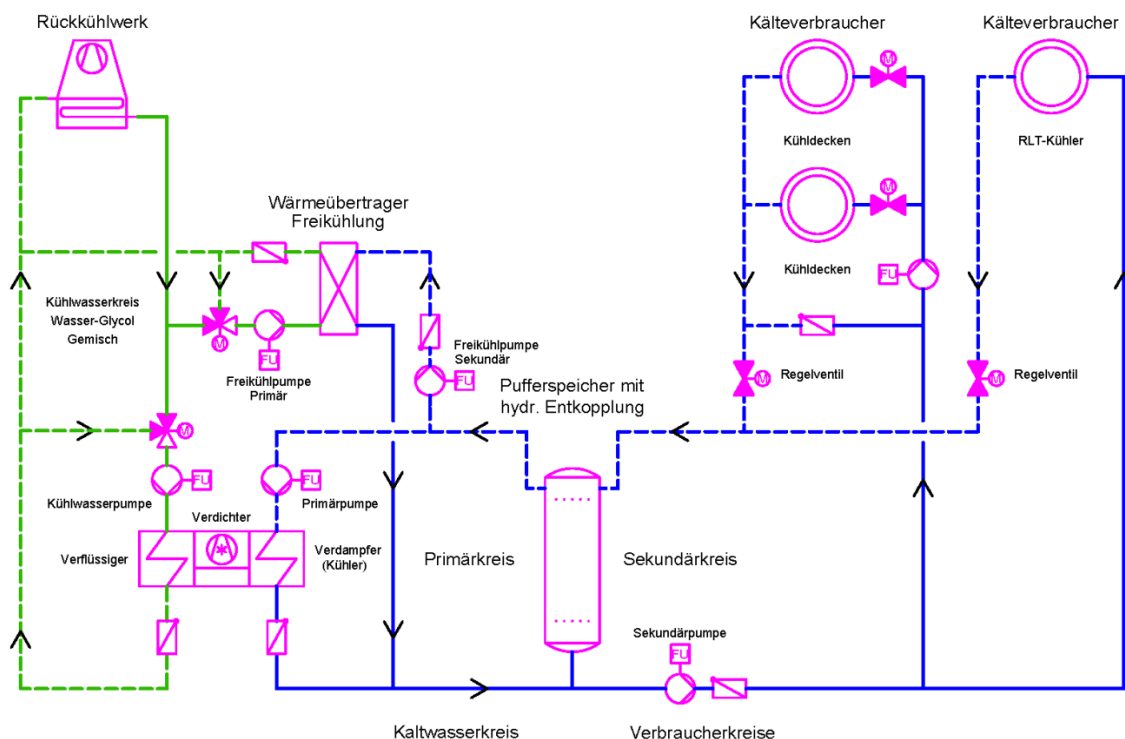


Abbildung 11, Schema für eine System mit hydraulischer Entkopplung und Freikühlung.

Merkmale:

- Der Sollwert der Kaltwasser-Vorlauftemperatur wird abhängig von der niedrigsten Temperaturanforderung der Verbraucherkreise ermittelt.
- Der Speicher trennt Erzeugerkreis vom Verbraucherkreis und stellt den Mindestsysteminhalt der Anlage sicher, um die Mindestlaufzeiten der Verdichter zu gewährleisten.
- Der primäre Volumenstrom wird aus der Lage der Trennschicht im Pufferspeicher (Speichermanagement) ermittelt. Mehrere Temperaturfühler im Speicher stellen den

Ladezustand fest und entsprechend der Sollwertabweichung (z.B. Speichermittelwert als Sollwert) wird die Drehzahl der Primärpumpe verändert. Bei sinkender Lage wird die Drehzahl erhöht und bei steigender Lage verringert. Zur Einhaltung der Herstellervorgaben muss der variable Kaltwasservolumenstrom überwacht und begrenzt werden. Die Schnittstellen zwischen der Maschinenregelung und der Gebäuderegulierung sind daher genau abzustimmen, um die Betriebssicherheit nicht zu gefährden.

- Die Leistungsanpassung der Kältemaschine an den tatsächlichen Bedarf erfolgt von der Maschinenregelung durch Verändern der Verdichter-Drehzahl in Abhängigkeit der Kaltwasser-Vorlauftemperatur (variabler Kältemittelstrom). Zur Stabilisierung der Temperaturregelung greift die Maschinenregelung bei abweichender Kaltwassertemperatur auch in die Steuerung der Primärpumpe ein. Sie übersteuert dann die Drehzahlregelung der Pumpe, um bei zu niedriger Austrittstemperatur den Kaltwasser-Volumenstrom zu verringern.
- Der sekundäre Volumenstrom passt sich infolge der mengenvariablen Einbindung der Verbraucherkreise dem aktuellen Bedarf an. Die Drehzahl der Sekundärpumpe wird entweder über den Differenzdruck des Verteilers (Schlechtpunktregelung) oder über das Stellsignal des am weitesten geöffneten Stellventils angesteuert.
- Da Teile des Kühlwasserkreises im Außenbereich liegen, ist der gesamte Kreis zum Schutz vor Frost mit einer Wasser-Glykol- Mischung gefüllt.
- Die Kühlwassertemperaturen benötigen aus anlagentechnischen Gründen ein höheres Temperaturniveau als die Kaltwassertemperaturen. Zur Effizienzsteigerung sollten sie möglichst niedrig sein, sie sind Außentemperaturabhängig und werden von der Rückkühlung bestimmt. Ihr Sollwert sollte veränderbar sein und sich der Außentemperatur anpassen. Als Regelgröße dient die Austrittstemperatur des Rückkühlers, dessen Leistung über die Drehzahl der Lüftermotore geregelt wird. Gleichwohl wird die Eintrittstemperatur des Verflüssigers über eine Beimisch-Schaltung begrenzt, um auch bei kalten Außentemperaturen eine Mindesttemperatur sicherzustellen.
- Der variable Kühlwasservolumenstrom regelt über die Pumpendrehzahl den Kondensationsdruck, dessen Sollwert über dem Verdampfendruck liegen muss und ebenfalls Außentemperaturabhängig ermittelt wird. Zur Begrenzung des Volumenstroms muss die Maschinenregelung in die Pumpenregelung eingreifen können.
- Sind die Außentemperaturen niedriger als die Kaltwassertemperaturen, kann auf Freikühlbetrieb umgeschaltet werden. Ein Parallelbetrieb ist bei dieser Einbindung nicht möglich. Zur Trennung von Glykol- und Kaltwasserkreislauf erfolgt die freie Kühlung über einen Wärmeübertrager. Die sich einstellende Temperaturspreizung zwischen der Primär- und Sekundärseite mindert das Potential der freien Kühlung. Eine Beimisch-Schaltung begrenzt die Temperatur und verhindert die Eisbildung auf der Sekundärseite. Im Freikühlbetrieb sind die Volumenströme ebenfalls variabel, dabei wird die Primärpumpe in die Kaltwassertemperaturregelung und die Sekundärpumpe in die Speicherladeregulierung eingebunden.

5.6.2 Kältemaschinen ohne hydraulische Entkopplung, mit Bypass

Kaltwassererzeuger wassergekühlt, variable Volumenströme, Kühlkreislauf mit Bypassventil.

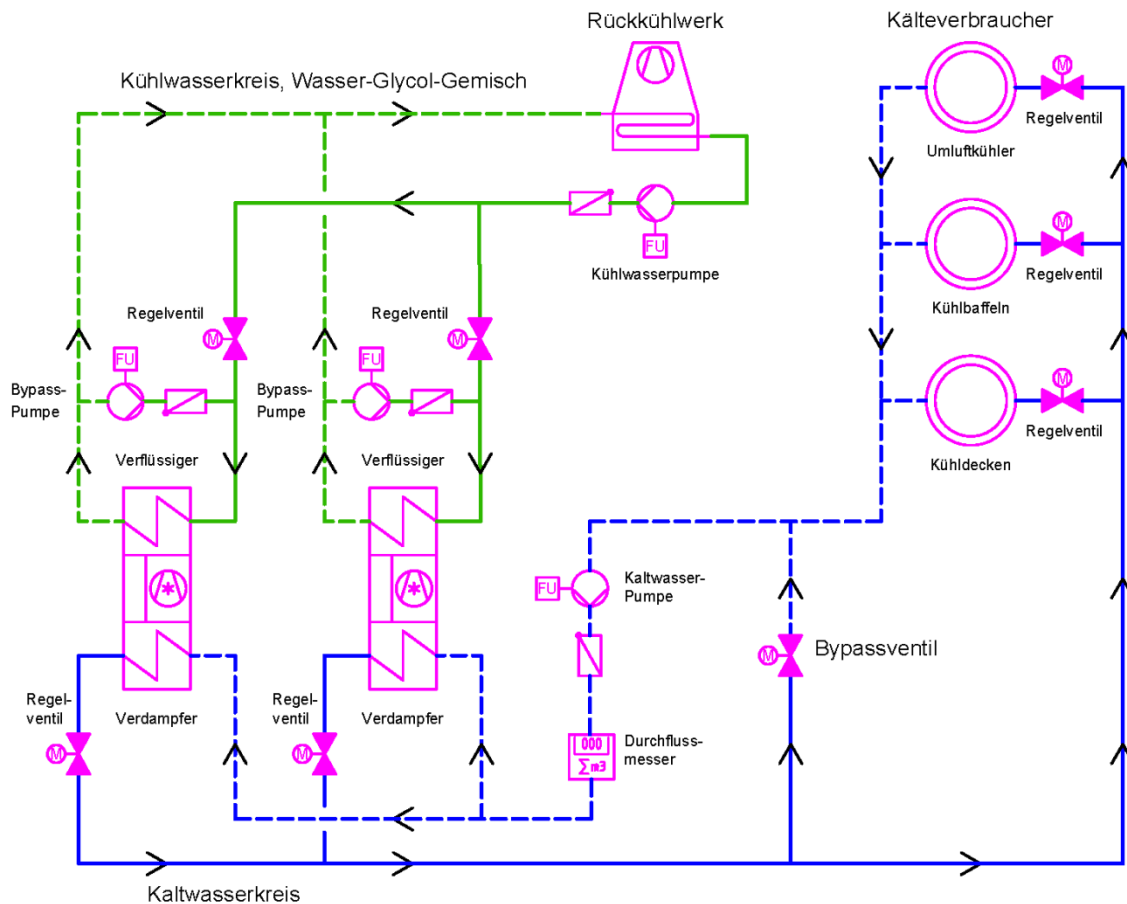


Abbildung 12, Schema für mehrere Kältemaschinen ohne hydraulische Entkopplung, mit Bypass.

Merkmale:

- Die Drehzahlregelung des Kaltwasservolumenstroms erfolgt über den Differenzdruck des ungünstigen Verbrauchers. Im Vollastbetrieb sind alle Regelventile offen und die Pumpe fördert den vollen Volumenstrom. Bei sinkender Last schließen die Regelventile und der Differenzdruck erhöht sich, infolgedessen reduziert die Pumpenregelung ihre Drehzahl bzw. den Volumenstrom, bis der eingestellte Differenzdruck wieder erreicht wird.
- Die Kältemaschinen werden entsprechend der momentanen Last aller Kälteverbraucher zu- oder abgeschaltet. Die Abstufung kann dabei entsprechend dem optimalen Wirkungsgrad der Maschinen erfolgen. Statt eine Maschine mit 100 % Last zu betreiben, kann der Betrieb von zwei Maschinen mit jeweils 50 % Last energetisch sinnvoller sein.
- Das Bypassventil wird über den Durchflussmesser angesteuert. Sind für die Kälteverbraucher nur geringe Volumenströme notwendig, die niedriger als der Mindestdurchfluss der Maschinen sind, öffnet das Ventil und es strömt die Menge Kaltwasser über die Bypassleitung wieder zurück, bis die Maschinenvorgaben eingehalten werden. Die Kälteverbraucher erhalten dann einen geringeren, jedoch der Last angepassten Volumenstrom.

- Die Temperaturbegrenzung für den Verflüssiger-Eintritt erfolgt über Bypass-Pumpen. Bei zu geringer Kühlwassertemperatur wird warmes Medium von der Austrittsseite über den Bypass auf die Eintrittsseite gefördert und erhöht damit dessen Temperatur. Zusätzlich erfolgt eine Temperaturregelung der Verflüssiger-Austrittstemperatur, indem der Ventilhub des Regelventiles verstellt wird.

5.6.3 Kaltwassersatz, luftgekühlt, mit Freikühler & Trennung

Kaltwassererzeuger, luftgekühlt, mit Speicher, Systemtrennung, variable Volumenströme, Freikühlfunktion über separaten Kühler mit serieller Einbindung.

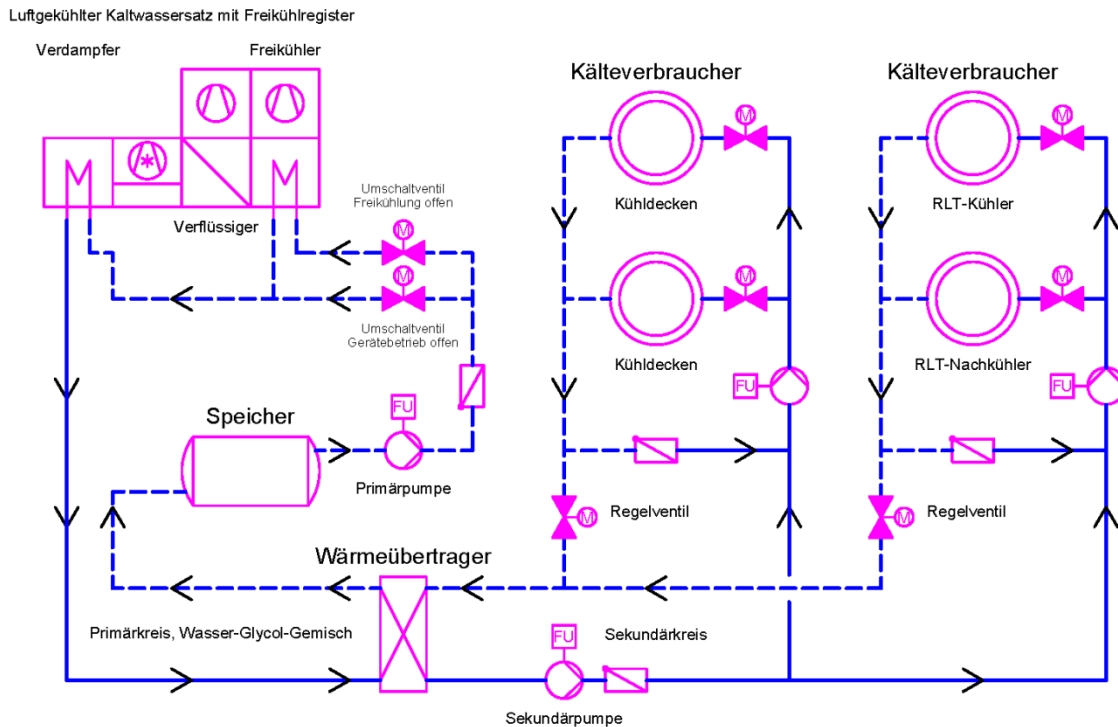


Abbildung 13, Schema luftgekühlter Kaltwassersatz mit Systemtrennung und separaten Freikühler.

Merkmale:

- Aus Frostschutzgründen werden Rohrleitungen und Kältemaschine im Außenbereich mit einem Wasser- Glykol- Gemisch gefüllt und es erfolgt eine Systemtrennung mit einem Wärmeübertrager.
- Primär und Sekundärkreis sind beide variabel, können jedoch mit unterschiedlichen Volumenströmen betrieben werden. Die Drehzahlregelung der Primärkreispumpe erfolgt über die Temperaturen von Ein- und Austritt an der Kältemaschine und die Sekundärkreispumpe wird über den Differenzdruck der Verbraucher geregelt.
- Der Einkreis-Pufferspeicher dient der Volumenerhöhung im hydraulischen System, um die Mindestlaufzeit der Verdichter sicherzustellen bzw. um häufiges An- und Ausschalten zu vermeiden.
- Bei niedrigen Außentemperaturen erfolgt eine freie Kühlung über einen seriell eingebundenen, zusätzlichen Rückkühler. Entsprechend den Außen- und

Kaltwassertemperaturen kann die Wärmeabgabe entweder vollständig über den Freikühler erfolgen oder der Freikühler kühlt den Kaltwasserrücklauf vor und die Kältemaschine muss lediglich die restliche Kälteleistung aufbringen. Die Umschaltventile regeln stetig die entsprechenden Wasserströme.

5.6.4 Kältemaschine mit Wärmenutzung und Erdreich-Regeneration

Sole/Wasser Wärmepumpe, zur Kaltwassererzeugung und Wärmenutzung mit Erdwärmesonden und Rückkühlwerk.

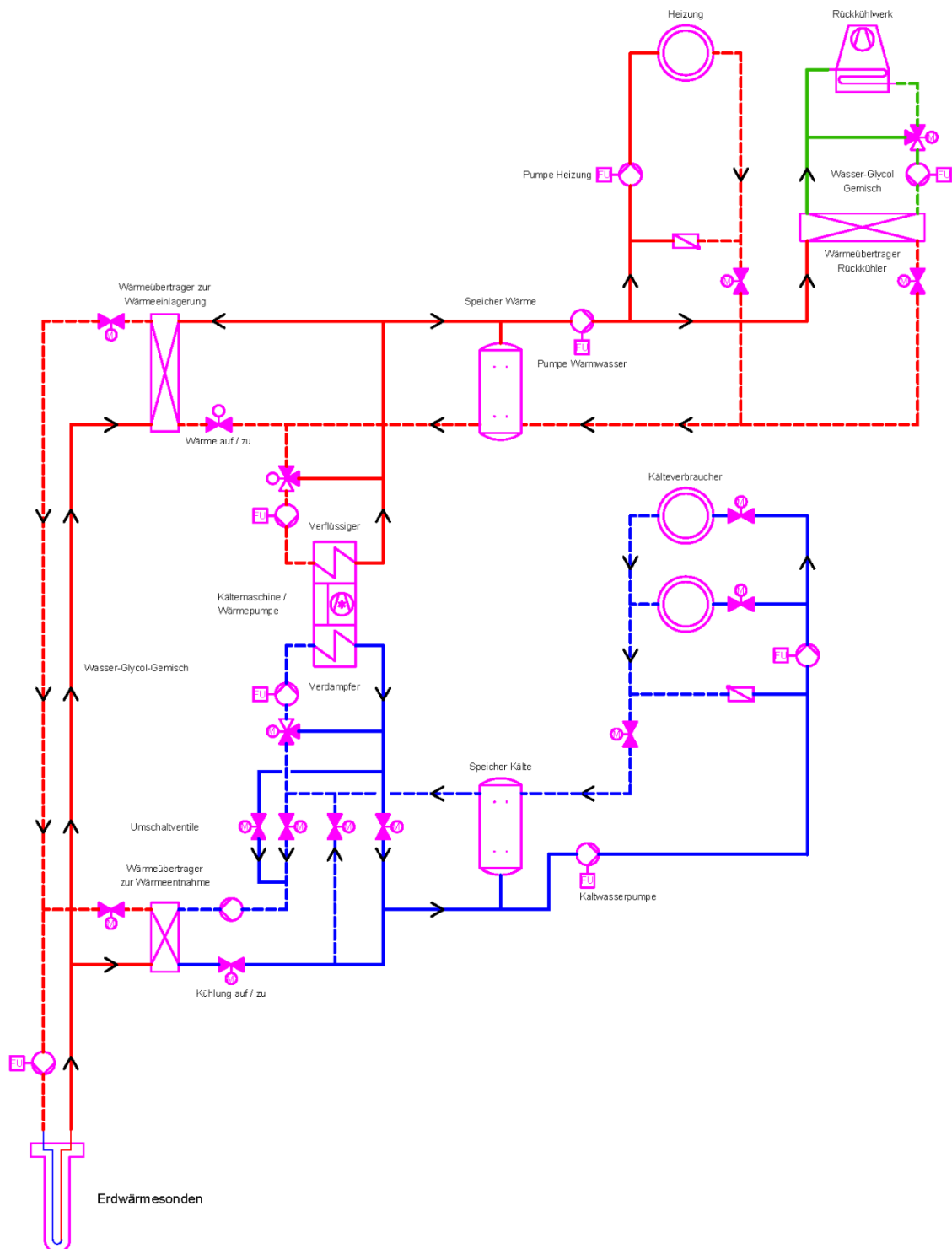


Abbildung 14, **Schema Kältemaschine mit Wärmenutzung und Erdreich-Regeneration**

Merkmale:

- Gesamtsystem zur Nutzung von Wärme, aktiver Kühlung und passiver Kühlung mit Regeneration des Erdreichs.
- Als Wärmequelle für den Heizbetrieb sowie für die Wärmeabgabe im Kühlbetrieb werden Erdsonden eingesetzt.
- Die Errichtung der Erdwärmesondenanlage benötigt meistens eine wasserrechtliche oder bergbaurechtliche Anzeige und Erlaubnis. Die Planungen werden gemäß der VDI 4640 (Thermische Nutzung des Untergrunds) durchgeführt.
- Im aktiven Kühlbetrieb arbeitet die Anlage primär als Kältemaschine und versorgt die Kälteverbraucher mit entsprechendem Kaltwasser. Die Abwärme wird hierbei zum Teil über einen Wärmeübertrager dem Erdreich zugeführt und dort gespeichert (Erdreich-Regeneration). Die restliche Energie wird über den Rückkühler an die Außenluft abgeführt werden.
- Im Teillastbetrieb der Kühlung kann über die Erdwärmesonden direkt gekühlt werden, ohne Kältemaschinenbetrieb (passive Kühlung). Die Wärme wird ebenfalls im Erdreich gespeichert, welches zu auch einer Regeneration des Erdreichs beiträgt.
- Im Heizbetrieb (Wärmepumpenbetrieb) arbeitet die Anlage primär zur Deckung des Wärmebedarfs. Dabei wird dem Erdreich und gegebenenfalls den Kälteverbrauchern die Wärme entzogen. Die Temperaturregelung erfolgt wärmegeführt in Abhängigkeit der Außentemperatur.
- Durch die Regeneration im Sommer wird das Temperaturniveau des Erdreichs und infolgedessen die Effizienz der Wärmepumpe erhöht. Ohne die Regeneration würde das Erdreich in Sondennähe auskühlen, welches langfristig die Effizienz verringern und Störungen zu führen könnte.

5.6.5 Fernkälteanlagen

Bei Verfügbarkeit ist die Nah- bzw. Fernkälteversorgung grundsätzlich eine zu prüfende Planungsoption. Fernkälteanlagen sind für ausgedehnte Gebäudekomplexe bzw. Campusliegenschaften mit entsprechend großem Kältebedarf geeignet.

Die Gesamtkälteleistung wird auf mehrere Kältemaschinen aufgeteilt, sodass die Kälte effizient erzeugt werden kann und mit der vorhandenen Redundanz eine hohe Versorgungssicherheit besteht. Da die Lastspitzen bei den Abnehmern meist nicht zur gleichen Zeit auftreten, entsteht im Netz ein Gleichzeitigkeitsfaktor, mit dem die installierte Kälteleistung minimiert werden kann. Das Kältemedium kann zwischen den einzelnen Abnehmern je nach Bedarf zugeteilt werden. Eine Kombination mit Kältespeichern stellt eine günstige Kälteanlagenvariante dar und ist auch aus ökologischen Gründen zu empfehlen. So können Fernkälteanlagen auch mit Flüssigeissystemen (Gemisch aus feinkristallinem Eis und Sole) realisiert werden. Vorteile solcher Anlagen sind aufgrund des höheren Energieinhalts vor allem ein kleinerer Rohrdurchmesser und durch den geringen Volumenstrom geringere Pumpleistungen (siehe Kapitel 4.2 Kältespeicher).

Vor- und Nachteile von Fernkältesystemen gegenüber dezentralen Kälteanlagen:

Vorteile:

- Konzentration der Emissionen von Geräuschen und Schwaden an einem Ort und dadurch geringere Aufwendungen für Schutzmaßnahmen
- zentrale Anlage erleichtert die Wartung und die Überwachung
- höhere Leistungszahl durch größere Einheiten
- bei Gebäuden unterschiedlicher Nutzungsart Verschiebung der Lastschwerpunkte
- geringere installierte Kälteleistungen
- durch Gleichzeitigkeitsfaktor geringerer Spitzenkältebedarf
- Fernkältenetz arbeitet auch als Kältespeicher
- Redundanz der Kälteerzeugung
- Betriebsverhältnisse werden günstig durch die große Kältespeicherung des Fernnetzes beeinflusst

Nachteile:

- ausgedehntes Fernleitungsnetz
- zusätzliche Investitionskosten für zentrale Leitungen und Gebäudeunterstationen
- höherer Aufwand für Regelungs- und Steuerungstechnik
- Lecksuche in verzweigten Rohrleitungssystem
- zusätzliche Förderkosten und Transmissionskälteverluste
- bei längerem Ausfall der Kälteanlagen ist die Gesamtanlage betroffen
- ganzjähriger Betrieb mit niedriger Temperatur notwendig

Hinweise zur Planung:

- Ein Anheben der Kaltwassertemperatur in der kalten Jahreszeit ist anzustreben.
- Freie Kühlung mit Rückkühlwerken nutzen (s. Kap. 4.1).
- Niedrigtarifzeiten für die Kälteerzeugung nutzen.
- Generell ist für Fernkälteanlagen eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen.
- kritische Verbraucher mit ausreichendem Differenzdruck versehen

Der Aufbau von Fernkälteanlagen umfasst im Wesentlichen drei Hauptbestandteile. Die Kälteerzeugung (Kältezentrale), das Fernkältenetz und die Kälteabnehmer.

Kälteerzeugung

In der Kältezentrale wird die angeforderte Kälte erzeugt. Die Steuerung wird so optimiert, dass ein energieoptimierter Betrieb mit hohen Wirkungsgraden (Teillastbetrieb) gewährleistet werden. Von großer Bedeutung ist daher die Einhaltung der zulässigen Volumenströme durch die Verdampfer. Nähert sich der Volumenstrom eines Verdampfers der Mindestdurchflussrate, muss über eine Bypassleitung wieder Wasser zurückgeführt

werden um die Schwankungen im vorgeschriebenen Bereich zu halten. Eine direkte Messung der Verdampferdurchflüsse (mit kalibrierten Geräten) ist für diese Regelung wichtig.

Fernkältenetz

Der Volumenstrom im Fernkältenetz wird von Umwälzpumpen generiert, welche entsprechend dem Verteilernetz und Anlagenaufbau auszulegen ist. Die Pumpenregelung ist so zu installieren, dass ein variabler Volumenstrom möglich ist. Dies kann erreicht werden, wenn mehrere Umwälzpumpen mit regelbarer Drehzahl parallelgeschaltet (Kaskadenschaltung) werden.

Für das Fernkältenetz gibt es zwei Grundformen der Netzstruktur. Das Strahlnetz und das Maschennetz. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in den niedrigeren Herstellungskosten des Strahlnetzes, das Maschennetz bietet jedoch eine wesentlich höhere Versorgungssicherheit. Die verwendeten Rohre sind meist unterirdisch verlegte Stahlrohre, die mit einem PUR-Schaum gedämmt und einem Mantelrohr aus HDPE geschützt werden. Zur Sicherheit sollen sie mit einem Leckage-Überwachungssystem ausgestattet werden.

Kälteabnehmer

Die Übergabestationen bilden die Schnittstelle zu den Kälteabnehmern.

Die Stationen können als direkter oder als indirekter Anschluss ausgeführt werden.

Beim direkten Anschluss besteht eine hydraulische Verbindung zwischen dem Fernkältenetz und dem Gebäudekreis. Dessen Merkmale sind geringe Investitionskosten, höhere Temperaturdifferenzen sind möglich (besser Wirtschaftlichkeit), höhere Gefahr von Schäden und die Druckstufe der Gebäude-Armaturen müssen der, des Fernkältenetzes gleich sein.

Beim indirekten Anschluss wird der Gebäudekreis mit einem Wärmetauscher entkoppelt. Es entsteht eine absolute Trennung mit einem Primär- und einem Sekundärkreis. Hierdurch erhöht sich jedoch die Vorlauftemperatur um ca. 1 bis 2 K, welches Nachteile für die verfügbare Kälteleistung hat und es muss bei der Gebäudeauslegung beachtet werden. Insbesondere wegen der größeren Sicherheit z.B. bei Leckagen oder Verschmutzungen wird der indirekte Anschluss bei vielen Anlagen bevorzugt.

Beim Aufbau der Übergabestationen und beim Anschluss der Kälte-Verbraucher ist es von großer Wichtigkeit, dass die höchstmögliche Temperaturdifferenz erreicht wird. Damit werden die Volumenströme und die Betriebskosten erheblich gesenkt. Empfohlen wird eine Vorlauf-Temperaturregelung, die auch die Rücklauftemperaturen mit einbezieht, um so eine Mindesttemperaturdifferenz gewährleisten zu können.

Für die meisten Fernkälteanlagen liegen technische Anschlussbedingungen (TAB) vor, die genaue Angaben zum Anlagenaufbau enthalten, Abweichungen hiervon sind mit dem Netzbetreiber abzustimmen.

6 Betrieb und Monitoring

6.1 Betreiberpflichten-/verantwortung

Die Komplexität von Kälteanlagen spiegelt sich auch in den verschiedenen Rechtsbereichen denen solche Anlagen unterliegen. Dabei hat die europäische Rechtssetzung mittels Richtlinien und Verordnungen im Zusammenwirken mit harmonisierten Normen unmittelbare Wirkung.

Diese beinhaltet eine strikte Trennung zwischen den Pflichten des Herstellers und des Betreibers einer Kälteanlage. Die Herstellung und das Inverkehrbringen sind im Produktsicherheitsrecht geregelt. Die Pflichten des Arbeitgebers (Betreibers) dagegen sind im Arbeitsschutzrecht behandelt mit Regelungen zur Betriebs- und Anlagensicherheit (Betriebssicherheitsverordnung) und zum Umgang mit Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung).

Ebenso ist das Umweltrecht zu beachten bezüglich E- bzw. Immissionen in den Bereichen Boden, Luft und Wasser. Das Energieeinsparrecht stellt Anforderungen an den energieeffizienten Betrieb.

Grundsätzlich sind technische Arbeitsmittel und Anlagen und damit auch Kälteanlagen gemäß dem Stand der Technik zu betreiben und instand zu halten.

Es gilt die Betriebssicherheitsverordnung. Hinweise für Arbeitgeber („Betreiber“) siehe auch DIN EN 378-4 sowie VDMA 24020 Teil 1 – 5.

Für Altanlagen, die vor dem 29.05.2002 errichtet wurden, gilt die alte Unfallverhütungsvorschrift BGV D4 noch. Wiederholungsprüfungen an diesen Anlagen unterliegen aber der Betriebssicherheitsverordnung.

Weitere Grundsätze zum Betreiben siehe VDI 3810 Blatt 1 und VDI 3810 Blatt 1.1

6.1.1 Energetische Inspektion nach §74-78 GEG

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) schreibt eine Inspektion von fest in Gebäuden installierten Klimaanlage mit einer Kälteleistung größer 12 kW unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz verbindlich vor. In Abhängigkeit vom Alter und der Größe ist durch fachkundige Personen die Prüfung der Anlagendimensionierung im Verhältnis zum Kühlbedarf durchzuführen und die energetische Qualität der Klimaanlage einschließlich der wesentlichen Hilfsenergieverbraucher (Rückkühlwerke, Pumpen) festzustellen. Für Klimaanlage mit einer Nennkälteleistung >70 kW ist der in DIN SPEC 15240 beschriebene Inspektionsumfang verpflichtend umzusetzen; für kleinere Anlagen ist die Anwendung der Norm freiwillig. Im Ergebnis der Energetischen Inspektion sind durch den Inspekteur fachliche Hinweise für Maßnahmen zur kostengünstigen Verbesserung der energetischen Eigenschaften der Anlage und in speziellen Fällen auch für deren Austausch oder Alternativlösungen zu geben. Die Inspektion ist wiederkehrend im Zyklus von 10 Jahren durchzuführen und muss vom Betreiber der Klimaanlage beauftragt werden. Von der Inspektionspflicht ausgeschlossen sind kleine Klimaanlage mit einer Nennleistung <12 kW und Anlagen, deren Energieeinsatz ausschließlich der Aufrechterhaltung eines Produktions- oder Lagerprozesses dient (z.B. Rechenzentren ohne Bedienpersonal,

Lebensmittellagerung). Sind in Gebäuden spezielle Gebäudeautomationssysteme eingebaut, die ein umfangreiches Energiemanagement ermöglichen, sind die installierten Klimaanlage ebenfalls von der Inspektionspflicht ausgeschlossen.

Die Umsetzung der Inspektionspflicht liegt in der Verantwortung des Betreibers. Gemäß DIN SPEC 15240 können in Abhängigkeit der vorhandenen Anlagentechnik verschiedene Inspektionsstufen mit unterschiedlichem Inspektionsumfang beauftragt werden.

Stufe A: begrenzter Umfang für einfache Klimaanlage (z.B. Split- und Multisplit-Klimaanlagen, VRF-Klimaanlagen, kleinere Kaltwassersysteme ohne Außenluftaufbereitung)

Stufe B: normaler Umfang (z.B. RLT-Geräte mit Außenluftaufbereitung, große Kaltwassernetze)

Stufe C: optionale, zusätzliche Leistungen (z.B. Kühllastberechnung, Wirtschaftlichkeitsberechnung)

Die Beauftragung sollte in schriftlicher Form mit einem klar definierten Anlagenumfang und Festlegung der (bei mehreren Anlagen jeweiligen) Inspektionsstufe erfolgen. Zusätzliche Leistungen sollten getrennt angeboten und vergütet werden.

Im Ergebnis der Energetischen Inspektion ist ein Inspektionsbericht zu erstellen, der folgende Informationen enthalten muss:

- Allgemeine Angaben zum Objekt, Auftraggeber, Inspekteur
- Beurteilung des Gesamtsystems (DIN SPEC 15240, Tabelle 18)
- Übersichtsblätter je Komponente (DIN SPEC 15240 Anhang B)
- Hinweise zur Lastreduzierung und auffälligem Betriebsverhalten
- Fachliche Hinweise zu energetischen Verbesserungspotentialen, zum Austausch von Komponenten oder für Alternativlösungen
- Benennung von Handlungsempfehlungen

Der Inspektionsbericht muss vom Inspekteur unterschrieben und mit einer Registriernummer versehen an den Betreiber übergeben werden.

6.1.2 Betriebssicherheitsverordnung

Die Betriebssicherheitsverordnung findet Anwendung als Instrument des Arbeitsschutzes bei der Verwendung von Arbeitsmitteln durch Beschäftigte. Sie dient ebenso dem Schutz Dritter beim Betrieb von überwachungsbedürftigen Anlagen.

Die aktuelle Ausgabe wurde konzeptionell und strukturell neu gestaltet. Doppelregelungen u.a. in der Gefahrstoffverordnung und im nationalen Wasserrecht wurden beseitigt, ebenso Angleichungen an modernisierte Rechtsmaterien wie beispielsweise Arbeitsschutzverordnungen durchgeführt.

Die Prüfung besonders gefährlicher Arbeitsmittel wurde aufgewertet und konkretisiert. Materielle Anforderungen an den Brand- und Explosionsschutz sind nur noch im

Gefahrstoffrecht geregelt. Das Explosionsschutzdokument wird Bestandteil der Gefährdungsbeurteilung.

Die Betriebssicherheitsverordnung beschreibt Rahmenbedingungen für das Betreiben von neuen und bestehenden Kälteanlagen. Der zuständige Arbeitgeber muss nach den § 4 und 5 ArbSchG in Verbindung mit § 3 BetrSichV eine Gefährdungsbeurteilung an seinen kältetechnischen Anlagen vornehmen. Sie ist ein wesentliches Element des Arbeitsschutzmanagements. Beispielsweise kann das Ablaufschema der Bundesanstalt für Arbeitsschutz- und Arbeitsmedizin (BAuA) verwendet werden (www.baua.de – TRBS 1111). Bei überwachungsbedürftigen Anlagen hat der Betreiber die Prüffristen der Gesamtanlage und der Anlagenteile auf der Grundlage einer sicherheitstechnischen Bewertung zu ermitteln. Weiterhin gilt auch noch das ÜAnlG (Gesetz über überwachungsbedürftige Anlagen).

Weitere Hilfen zur Anwendung der BetrSichV bieten die turnusmäßig aktualisierten Leitlinien zur Betriebssicherheitsverordnung des LASI (Länderausschuss zur Arbeitssicherheit).

6.2 Bedienen von Kälteanlagen

Die Bedienung von Kälteanlagen im täglichen Normalbetrieb beinhaltet im Wesentlichen die folgenden Handlungen:

- Ein- und Ausschalten der Anlagen (z. B. während der Nutzungs- bzw. Nichtnutzungszeit) entweder von Hand oder durch eine anlagenbezogene Bedieneinrichtung oder mit Hilfe eines Gebäudeautomationssystems
- Abschalten der Anlage im Notfall
- Einstellen von Schaltzeiten zum Ein- bzw. Ausschalten der Anlage durch eine anlagenbezogene Bedieneinrichtung oder mit Hilfe eines übergeordneten Gebäudeautomationssystems
- Schalten von Betriebsstufen (z. B. Zu- oder Abschaltung von Kältemaschinen)
- Einstellen von Sollwerten (z. B. Temperaturen) innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite

Das Bedienungspersonal muss über eine geeignete Qualifikation verfügen.

Die Taktzeiten der Kälteanlagen sind im Rahmen der seitens des Herstellers vorgegebenen Rahmenbedingungen auf das notwendige Maß zu beschränken. Durch Reduzierung der Betriebszeiten der Anlagen kann sowohl der Energieverbrauch, als auch der Wartungsaufwand gesenkt werden.

Auch bei weitgehend automatischer Regelung und Steuerung der Anlagen sollte seitens des Betriebspersonals geprüft werden, ob die eingestellten Schaltzeiten und Sollwerte noch aktuelle bzw. sinnvoll sind, oder ob Verbesserungen im Betriebsverhalten oder bei den Betriebskosten erzielbar sind. Anregungen für Verbesserungen (z. B. durch Nachrüstungen) sollten an die zuständigen Stellen weitergegeben werden. Dies gilt z. B. für Einbauten zur Reduzierung von Betriebszeiten oder für das Nachrüsten von Steuer- und Regeleinrichtungen (z. B. für Pumpen).

Im weitesten Sinne kann das Bedienen auch die regelmäßige Sicht- und Funktionskontrolle (z. B. im Rahmen eines täglichen Rundgangs) gehören, bei dem nach Kriterien für fehlerhalten Verhalten der Anlage wie Geräusche, Wasseraustritt, Störungsanzeigen gesucht sowie die Kontrolle bestimmter Anzeigeinstrumente durchgeführt wird. Eine systematische Kontrolle ist unter dem Begriff Inspektion im folgenden Abschnitt beschrieben.

6.3 Monitoring

Monitoring, im Sinne von Erfassen, Beobachten und Dokumentieren, ist ein unverzichtbarer Bestandteil für eine optimierte Betriebsführung von Kälteanlagen und ein verbessertes Energiemanagement im Bereich der Kältetechnik.

Richtig geplant und umgesetzt kann Monitoring einen hohen Mehrwert und gute Synergien beispielsweise für die Erfüllung des Energiedienstleistungsgesetzes oder die Überprüfung von Planungs- und Ausführungsleistungen schaffen.

Im Interesse einer Betriebs-/Energieoptimierung wird ein Monitoring entsprechend der AMEV-Empfehlung Technisches Monitoring empfohlen, weitere Hinweise sind in VDI 6041 enthalten

6.4 Instandhaltung

Gemäß BetrSichV ist der Betreiber einer Kälteanlage verpflichtet, die Anlage in einem betriebssicheren Zustand zu erhalten. Dazu sind gem. DIN 31051 neben der Inspektion und Wartung auch notwendige Instandsetzungen sowie ggf. erforderliche Verbesserungen zur Steigerung der Funktionssicherheit an der Anlage durchzuführen.

Die notwendigen Tätigkeiten legt das Instandhaltungsunternehmen auf der Grundlage der von ihm durchzuführenden systematischen Instandhaltungs-kontrollen unter Berücksichtigung der vom Errichter neuer Kälteanlagen zu erstellenden Instandhaltungsanweisung fest. Auch für bestehende Anlagen werden die notwendigen Tätigkeiten vom Instandhaltungsunternehmen unter Berücksichtigung vorhandener Instandhaltungsanweisungen festgelegt. Wartung, Inspektion und Instandsetzung an kältetechnischen Anlagen dürfen nur von sachkundigem Personal vorgenommen werden (Fachbetrieb nach § 63 WHG, zur Prüfung befähigte Person nach BetrSichV). Die erforderlichen Kenntnisse vermitteln dafür geeignete Bildungsinstitute. Arbeiten, die der Mithilfe fachfremden Personals bedürfen (Schweißer, Elektriker, Regelungstechniker usw.) sind nur unter Aufsicht des Sachkundigen durchzuführen, um Unfälle oder Emissionen, die im Zusammenhang mit Kälteanlagen auftreten können, zu vermeiden.

Bei der Beurteilung eines Angebotes für Neuanlagen soll immer die Höhe der zu erwartenden Folgekosten einbezogen werden. Alle Neuanlagen sind abschnittsweise mit ausreichend Absaug- oder Verlagerungsmöglichkeit für den Kältemittelinhalt auszustatten.

6.4.1 Unterlagen für den Betrieb von Kälteanlagen

Zu jeder Anlage muss die Dokumentation des Anlagenerrichters (vgl. VDI 6026) verfügbar sein. Hierzu zählen insbesondere

- Bestandszeichnungen
- Aufstellungs- und Installationspläne
- Anlagenschemata (Schaltschemata)
- Funktionsbeschreibungen der Anlage
- Betriebsanleitungen
- Technische Daten der wesentlichen Anlagenteile (z. B. Pumpen, Wärmetauscher)
- Elektrische Schaltpläne, Regelschemata
- Messprotokolle (zu den während der Einregulierung durchgeführten Messungen)
- Soll-Werte (Übersicht, Liste)
- Wartungspläne
- Inspektionspläne
- Instandsetzungsanleitungen
- Ersatzteillisten

Die Unterlagen müssen entweder direkt vor Ort bei den Anlagen und/oder an zentraler Stelle verfügbar sein (elektronisch z. B. in einem für die Betreffenden zugänglichen strukturierten Verzeichnis). Gebäudeautomations- und insbesondere CAFM- und Dokumentenmanagementsysteme können hierzu genutzt werden.

6.4.2 Inspektion

Gemäß DIN 31051 beinhaltet die Inspektion die „Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes“ einer Betrachtungseinheit – in diesem Falle einer Kälteanlage – einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung. In der Praxis wird die Maßnahme anhand eines Planes zur Inspektion der Anlage durchgeführt. Dieser Plan erhält Angaben über Ort, Termin, Methode, Gerät sowie die einzelnen Inspektionsmaßnahmen.

Bei vielen Kälteanlagen ist die Inspektion schon aus Sicherheitsgründen aufgrund der verwendeten z. T. toxischen und/oder brennbaren Kältemittel erforderlich. Dichtheitsprüfungen sind dort mindestens einmal jährlich durchzuführen und zu dokumentieren. Gemäß der F-Gase VO gibt es in Abhängigkeit des eingesetzten Kältemittels, dessen Menge bzw. CO₂-Äquivalent, Intervalle von vierteljährlich, halbjährlich, jährlich und 2 jährlich.

Ein ordnungsgemäßer und an den Nutzungszeiten orientierter Betrieb ist die Voraussetzung für Wirtschaftlichkeit und geringen Energieverbrauch. Insbesondere die bedarfsabhängige Abschaltung bzw. das Herunterfahren der Anlage bzw. von Anlagenteilen und die Nutzung der vorhandenen Betriebsprogramme zur Optimierung sind hierzu notwendig.

Der ordnungsgemäße Betrieb der Anlage lässt sich mit Hilfe eines Soll-/Ist-Wertvergleichs der wichtigen Parameter erkennen. Hierzu sind die erforderlichen Informationen z. B. in tabellarischer Form aufzulisten und die entsprechenden Instrumente bzw. Orte zur Ablesung der Daten (an der Anlage oder in Gebäudeautomationssystemen) zu kennzeichnen und zu beschreiben. Insbesondere wenn kein speziell qualifiziertes Personal zur Verfügung steht, sind entsprechende Erläuterungen notwendig.

Ein Inspektionsgang (einfach, z. B. 14-tägig bis monatlich) kann neben der Sichtprüfung und der Prüfung der wichtigsten Anlagenparameter (Vor- und Rücklauftemperaturen, Betriebsdruck, Leistungsaufnahme auch die Durchführung vorgegebener Diagnoseprogramme beinhalten.

Wichtig ist auch, dass die von der Herstellerfirma vorgenommene Einstellung der Mess-, Steuer- und Regelgeräte vom Bedienungspersonal durch regelmäßige Kontrollen überwacht wird. Insbesondere können Nutzungsänderungen eine Neueinstellung erforderlich machen.

Das Bedienungspersonal soll in Abstimmung mit der zuständigen Dienststelle (z. B. Bauamt oder Betriebsüberwachung) Betriebsaufzeichnungen regelmäßig und vollständig anfertigen. Die Ergebnisse von Kontrollmessungen sind in einem Betriebsbuch zu protokollieren. Betriebsaufzeichnungen ermöglichen es, Abweichungen vom Soll-Betrieb zu erkennen bzw. Störungen und besondere Vorkommnisse im Nachhinein auszuwerten. Sind Anlagen mit Betriebsstundenzählern ausgerüstet, so sollen deren Zählerstände in regelmäßigen Abständen abgelesen und protokolliert werden.

6.4.3 Wartung

Wartungsaufgaben werden in der Regel von der hausverwaltenden Dienststelle bzw. dem Eigentümer beauftragt. Sie können mit eigenem Personal (mit entsprechender Qualifikation und Sachkenntnis), vom Produkthersteller selbst oder von Dritten vorgenommen werden. Ein wichtiger Verantwortungsbereich des Bedienungspersonals besteht darin, darauf zu achten, dass die notwendigen Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten entsprechend den Vorgaben durchgeführt werden. Bei der Vergabe soll das aktuelle AMEV-Vertragsmuster verwendet werden.

Empfohlen wird das Anlegen von Arbeitskarten für jede Anlage, die auf die spezifischen Belange des jeweiligen Betriebes abgestellt sind. Die Arbeitskarten werden nach den gültigen Betriebsanleitungen oder nach den AMEV-Vertragsmustern angefertigt, die spätestens zur Inbetriebnahme vorliegen müssen. Dort werden durchgeführte Wartungen mit Datum wie Ölwechsel bei Verdichtern, Kältemittelstand prüfen, Lagerwechsel, oder umfassende Reinigungen sowie umfangreichere Arbeiten gesondert eingetragen. Hinweise hierzu sind in der AMEV-Empfehlung „Wartung“ enthalten. Die Arbeitskarten sind auf der Webseite der AMEV (www.amev-online.de) zu finden.

6.4.4 Instandsetzung

Aufgaben zur Instandsetzung von Kälteanlagen dürfen nur von entsprechend qualifiziertem Personal ausgeführt werden. Üblicherweise werden hierzu Fachfirmen beauftragt.

Zur Instandhaltung einer Kälteanlage gehören neben Systemveränderungen auch Sanierungsmaßnahmen. Eine Sanierung wird erforderlich, wenn durch technische Neuerungen die Energie- bzw. Medienverbräuche eine deutlich bessere Wirtschaftlichkeit und geringe Umweltbelastungen erwarten lassen. Hierzu sind z. B. die Anwendung von Kältespeichern, verbesserte elektronische Regelanlagen, geringere Kühlwasserverbräuche sowie das Verwenden von umweltfreundlichen Kältemitteln zu untersuchen.

Soweit auch Arbeiten mit Wärmeeinwirkungen oder ähnliche gravierende Eingriffe vorgenommen werden, sind die Anlagen gemäß Anhang 2 Abschnitt 4 BetrSichV auf Festigkeit zu prüfen und es ist eine innere Prüfung vorzunehmen.

7 Anhänge:

7.1 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 1, „linkslaufender“ Carnot-Prozess	5
Abbildung 2, Prinzipdarstellung Kompressionskältemaschine	8
Abbildung 3, Verdichterbauformen mit Leistungsbereichen	11
Abbildung 4, Schema einer Splitanlage.....	14
Abbildung 5, Prinzipschaltbild einer Ammoniak/Wasser Absorptionskältemaschine	17
Abbildung 6, Prinzipdarstellung einer Adsorptionskältemaschine	17
Abbildung 7, Quoten-Regelung gemäß Verordnung (EU) Nr. 2024/573 (rot dargestellt)	20
Abbildung 8, Einordnung der Rückkühler	25
Abbildung 9, Einfluss der Systemtemperaturen auf die Leistungszahl einer Kältemaschine im Bereich der Komfortanwendung (Carnot-Umrechnung)	33
Abbildung 10, mögliche Ablaufschritte bei der Planung einer kältetechnischen Anlage	34
Abbildung 11, Schema für eine System mit hydraulischer Entkopplung und Freikühlung	47
Abbildung 12, Schema für mehrere Kältemaschinen ohne hydraulische Entkopplung, mit Bypass.....	49
Abbildung 13, Schema luftgekühlter Kaltwassersatz mit Systemtrennung und separaten Freikühler	50
Abbildung 14, Schema Kältemaschine mit Wärmenutzung und Erdreich-Regeneration	51

Tabellen

Tabelle 1, Vor- und Nachteile der Bauarten von Verdichtern.....	9
Tabelle 2, Tabelle der Kältemittel-Sicherheitsklassen.....	19
Tabelle 3: Beschränkungen / Auflagen für gewerbliche und industrielle Kälteanlagen,	21
Tabelle 4, Bestimmungen für Wartung und Instandhaltung gemäß Verordnung (EU) Nr. 2024/573.....	21
Tabelle 5, Natürliche Kältemittel, nicht von F-Gase-Verordnung oder PFAS-Verbot betroffen	23
Tabelle 6, Mindestwert des primärenergetischen Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrades ($\eta_{s,c}$) für Komfort-Wasserkühler mit Elektromotor nach EU 2016/2281	31
Tabelle 7, Mindestwert der Jahresarbeitszahl (SEPR) für Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur nach EU 2016/2281	31
Tabelle 8, Mindestwert der Jahresarbeitszahl (JAZ) für Prozesskühler nach EU 2015/1095	32
Tabelle 9, Vor- und Nachteile von Einzelreglern und Automationsstationen	41
Tabelle 10, maximale Füllmenge an Kältemittel in Abhängigkeit vom Aufstellort	45

7.2 Begriffe und Definitionen

ASHRAE	Berufsverband aller in Heizungs-, Kühlungs-, Lüftungs- und Klimaanlagebau Tätigen in den USA. Dieser Verband veröffentlicht Normen und Richtlinien im Bereich Klimatechnik.
EER	E nergy e fficiency r atio - Leistungszahl der Kältemaschine, Kälteleistung bezogen auf die eingesetzte elektrische Leistung des Kältemittelverdichters
SEER ESEER	S easonal E ER E uropean S easonal E ER- Jahresleistungszahl der Kältemaschine, saisonale Energieeffizienz von Flüssigkeitskühlsätzen zur Komfortkühlung - saisonale Profile von Kühlbedarf und Außentemperatur
SEPR	S easonal E nergy P erformance R atio saisonale Energieeffizienz von Flüssigkeitskühlsätzen zur industriellen Prozesskühlung - saisonale Profile von Kühlbedarf und Außentemperatur
GLZ	Gesamtleistungszahl kombinierter Kältemaschinen - Wärmepumpen, Heiz- und Kälteleistung bezogen auf die eingesetzte elektrische Leistung
GWP-Wert	G lobal W arming P otential - relatives direktes Treibhauspotenzial eines Stoffes bezogen auf das Treibhauspotenzial von Kohlendioxid (CO ₂) an, dessen Wert mit 1,0 definiert wurde
JAZ	Jahresarbeitszahl - Die JAZ ist das Verhältnis der erzeugten (Wärme)-Energie zur eingesetzten elektrischen Energie (Strom) über ein ganzes Jahr.
ODP-Wert	O zon D epletion P otential - relatives Ozonabbaupotential eines Stoffes bezogen auf das (hohe) Ozonabbaupotential des FCKW Trichlorfluormethan (R 11), dessen Wert mit 1,0 definiert wurde
TEWI-Zahl	T otal E quivalent W arming I mpact - Kennzahl für das Treibhaus-potential unter Einbeziehung des direkten Erwärmungsbeitrages durch entweichendes Kältemittel (GWP) und des indirekten Beitrages durch den Energiebedarf für den Antrieb des Kälteerzeugers während der Nutzungsdauer
CO ₂ Äquivalent	Steigerung des Treibhauseffekts durch entweichendes Kältemittel bezogen zu der bei der Verbrennung entstehenden Menge an CO ₂ als Äquivalent, entspricht dem GWP-Wert

7.3 Vorschriften und Regelwerke

Bei Planung, Ausführung sowie Herstellung und Betrieb von Kältetechnischen Anlagen sind neben den Gesetzen und Verordnungen der Bundesländer insbesondere zu beachten:

EU-Verordnungen

- EU 2024/573 (F-Gase-Verordnung): Verordnung (EU) Nr. 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 07. Feb. 2024 über fluorierte Treibhausgase
- EU 2015/1095: Verordnung (EU) 2015/1095 der Kommission vom 5. Mai 2015 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von gewerblichen Kühltagschränken, Schnellkühlern/-froster, Verflüssigungssätzen und Prozesskühlern
- EU 2016/2281: Verordnung (EU) 2016/2281 der Kommission vom 30. November 2016 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte im Hinblick auf Luftheizungsprodukte, Kühlungsprodukte, Prozesskühler mit hoher Betriebstemperatur und Gebläsekonvektoren (Text von Bedeutung für den EWR) C/2016/7769
- 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie): Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung) Ökodesign-Richtlinie
- 2009/125/EG (Ökodesign-Richtlinie): RICHTLINIE 2009/125/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte
- Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission

Gesetze, Verordnungen des Bundes

- Gesetz über die Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG), Verwaltungsvorschrift (Wassergefährdungsklassen - VwVwS), Verordnungen der Länder (Anlagenverordnung – VawS)
- Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)
- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV)
- Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV)
- Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit

(Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG)

- Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSGV) einschließlich Verordnungen
- Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG)
- 42. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verdunstungskühlanlagen und Nassabscheider (VerdunstKühlV) – 42. BImSchV)

Berufsgenossenschaftliche Vorschriften und Regeln

- DGUV-Regel 100–500 Kap. 2.35 Betreiben von Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen

Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)

- TRBS 1111, Gefährdungsbeurteilung und sicherheitstechnische Bewertung
- TRBS 1201, Prüfungen und Kontrollen von Arbeitsmitteln und überwachungsbedürftigen Anlagen. Technische Regel für Betriebssicherheit, März 2019

Normen

- DIN 276-1, Kosten im Bauwesen, Ausgabe 2018-12
- DIN EN 378, Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen
Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Definitionen, Klassifikationen und Auswahlkriterien, Ausgabe 2021-06
Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation, Ausgabe 2018-04
Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen, Ausgabe 2020-12
Teil 4, Betrieb, Instandhaltung, Instandsetzung und Rückgewinnung, Ausgabe 2019-12
- DIN 2405
Rohrleitungen in Kälteanlagen und Kühleinrichtungen – Kennzeichnung
- DIN 4108-2, Ausgabe 2024-12 (Entwurf)
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden
Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- DIN EN 12735, Ausgabe 2020-06
Kupfer und Kupferlegierungen – Nahtlose Rundrohre aus Kupfer für die Kälte- und Klimatechnik
Teil 1: Rohre für Leitungssysteme
- DIN EN 14511-2, Ausgabe:2023-08
Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für Raumheizung und Kühlung
Teil 2: Prüfbedingungen
- DIN SPEC 15240, Ausgabe 2019-03
Lüftung von Gebäuden – Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Energetische Inspektion von Klimaanlage
- DIN EN 16798-17, Entwurf

Energieeffizienz von Gebäuden

Teil 9 (2015-01, prEN 16798-9:2014): Lüftung von Gebäuden – Modul M4-1 –
Berechnungsmethoden für energetische Anforderungen von Kühlsystemen –
Allgemeine Anforderungen

Teil 10 (2018-03, CEN/TR 16798-10): Lüftung von Gebäuden – Modul 4-1 –
Berechnungsmethoden für energetische Anforderungen von Kühlsystemen - Allgemeine
Festlegungen – Technischer Report zur Interpretation der Festlegungen in EN 16798-9

Teil 11 (2015-06, prEN 16798-11:2015): Modul M4-3 – Berechnung der Norm-Kühllast

Teil 12 (CEN/TR 16798-12): Modul M4-3 – Berechnung der Norm-Kühllast; Technischer
Report zur Interpretation der Festlegungen in DIN EN 16798-11

Teil 13 (2017-11, prEN 16798-13:2014): Module M4-8 – Berechnungsmethoden für
Kälteanlagen

Teil 14 (CEN/TR 16798-14: 2014-03): Modul M4-8 - Berechnung von Kühlsystemen -
Erzeugung - Technischer Report zur Interpretation der Anforderungen in EN 16798-13

Teil 15 (2015-01, prEN 16798-15:2017-11): Modul M4-7 - Berechnungsmethoden für
den Energiebedarf von Kälteanlagen - Speicherung – Allgemeines

- DIN 18379, Ausgabe 2019-09
VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische
Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Raumluftechnische Anlagen
- DIN 31051, Ausgabe 2016-06
Grundlagen der Instandhaltung
- DIN 51503-1, Ausgabe 2021-12
Schmierstoffe – Kältemaschinenöle
Teil 1: Mindestanforderungen
- DIN EN 60204-1, Ausgabe 2019-06
Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil1: Allgemeine
Anforderungen

VDMA-Einheitsblätter, VDI-Richtlinien

- VDMA 24020
Betriebliche Anforderungen an Kälteanlagen
Teil 1 (Ausgabe 2008-11): Ammoniak-Kälteanlagen
Teil 2 (Ausgabe 2008-11): Kälteanlagen mit nicht brennbaren Kältemitteln
(Sicherheitsklasse A1 gemäß EN 378)
Teil 3 (Ausgabe 2013-04): Kälteanlagen mit brennbaren Kältemitteln der
Sicherheitsklasse A3 gemäß DIN EN 378
Teil 4 (Ausgabe 2011-6): Kälteanlagen mit Kohlenstoffdioxid (CO₂ – R744)
Teil 5 (Ausgabe 2013-11): Kälteanlagen mit Kältemitteln geringerer Brennbarkeit
(Sicherheitsklasse A2 gemäß DIN EN 378)
- VDI 2047 Blatt 2:2019-01 Sicherstellung des hygienegerechten Betriebs von
Verdunstungskühlanlagen (VDI-Kühlturmregeln)
- VDI 2067 Blatt 1:2021-01 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen
und Kostenberechnung
- VDI 2078:2015-06 Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen
(Auslegung Kühllast und Jahressimulation)
- VDI 3810 Blatt 1:2023-03 Betreiben und Instandhalten von gebäudetechnischen
Anlagen – Grundlagen

- VDI 3810 Blatt 1.1:2014-09 Betreiben und Instandhalten von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen – Grundlagen – Betreiberverantwortung
- VDI 3814 Blatt 1:2009-11 Gebäudeautomation (GA) - Systemgrundlagen
- VDI 3814 Blatt 6:2008-07 Gebäudeautomation (GA) - Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben
- VDI 4660 Blatt 1:2010-06 Thermische Nutzung des Untergrunds
- VDI 6026 Blatt 1:2022-08 Dokumentation in der Technischen Gebäudeausrüstung – Inhalte und Beschaffenheit von Planungs-, Ausführungs- und Revisionsunterlagen
- VDI 6026 Blatt 1.1:2015-04 Dokumentation in der technischen Gebäudeausrüstung - Inhalte und Beschaffenheit von Planungs-, Ausführungs- und Revisionsunterlagen – FM-spezifische Anforderungen an die Dokumentation
- VDI 6041:2017-06 Facility-Management – Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen

Bezugsquellen Gesetze, Verordnungen, Technische Regeln

- EU-Verordnungen: https://europa.eu/european-union/eu-law/legal-acts_de
- Gesetze und Verordnungen des Bundes: <https://www.gesetze-im-internet.de/>
- Berufsgenossenschaftliche Vorschriften und Regeln, Unfallverhütungsvorschriften: <http://www.dguv.de>
- Technische Regeln für Betriebssicherheit: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS.html>
- Normen und Technische Regeln: Deutsche Informationszentrum für Technische Regeln (DITR) <http://www.beuth.de/de/normenverwaltung/datenservice> sowie <http://www.din.de> <https://www.vdi.de/technik/richtlinien/> <http://www.vdma.org/>

7.4 Mitarbeiter

Lutz Grunicke (Obmann)	Brandenburgischer Landesbetrieb für Liegenschaften und Bauen (BLB)
Prof. Dr.-Ing. Uwe Franzke	Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH
Otmar Gerhard	Regierung von Unterfranken
Thorsten Lerch	Landesinnung Kälte-Klima-Technik
Frank Mertens	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Ralf Dieter Person	HIS-Institut für Hochschulentwicklung e. V., Hannover
Horst Schüssler	Ministerium der Finanzen Rheinland-Pfalz
Martin Tischer	Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg
Michael Weigand	Vermögen und Bau Baden-Württemberg