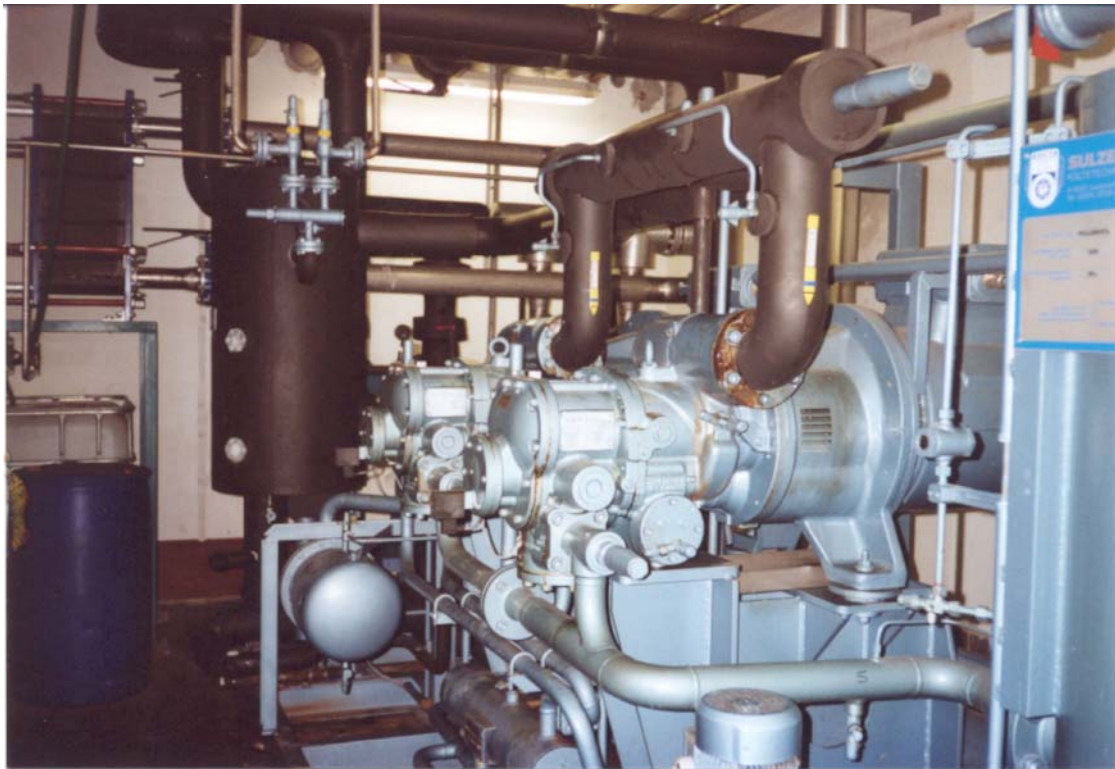


Energieeffizienz in Kältesystemen

Beraterinformation klima:aktiv Programm energieeffiziente Betriebe
Stand: 22. November 2007





Haftungsausschluss

Das Projektmanagement von klima:aktiv energieeffiziente Betriebe hat im Rahmen der Beraterinformationen verschiedene Informationen zu ausgewählten Themenbereichen erstellt und den Teilnehmern als mögliche Hilfsmittel für die spätere Projektarbeit zur Verfügung gestellt.

Diese Informationen stellen lediglich Vorschläge für mögliche Maßnahmen dar, die vom Berater in Eigenverantwortung auf das jeweilige Projekt und den Kunden angepasst werden müssen.

Die Haftung für mögliche Schäden aus der Verwendung dieser Informationsunterlagen in der Praxis wird vom Projektmanagement hiermit ausdrücklich ausgeschlossen.

Die Verwendung dieser zur Verfügung gestellten Informationsunterlagen gilt als ausdrückliches Anerkenntnis dieser Haftungsregelung.

Impressum

Herausgeberin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency,
 Otto-Bauer-Gasse 6, A-1060 Wien; Tel. +43 (1) 586 15 24, Fax +43 (1) 586 15 24 - 40;
 E-Mail: office@energyagency.at, Internet: <http://www.energyagency.at>

Für den Inhalt verantwortlich: Dr. Fritz Unterpertinger

Gesamtleitung: DI Michael Harhammer

Autor: Mag. DI Konstantin Kulterer

Herstellerin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency

Inhaltsverzeichnis

Übersicht Einsparmaßnahmen	3
Basissystembeschreibung	5
Beschreibung Kältesystem	8
Verdichterarten	11
Antriebsmotor	14
Leistungsregelung von Verdichtern	16
Kondensator	20
Entspannungsventile	26
Verdampfer	29
Kältemittel	33
Verteilnetz	36
Abtauen	38
WRG, Kältebedarf, Kühlzellen, Regelung	40
Quellenverzeichnis	43

Übersicht Einsparmaßnahmen

Beispiele für Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz in Kältesystemen

Maßnahme	Einsparpotential
Verminderung des Kältebedarfs	
Systemoptimierung	8 – 10 %
Betriebs- und Wartungsmaßnahmen	4 – 8 %
Stärkere Wärmedämmung	5 – 10 %
Wärmerückgewinnung	80 % (der Wärme)
Effiziente Geräte/Beleuchtung in Kühlräumen	2%
Benutzung von effizienten Geräten und Anlagen	
Antriebe mit Drehzahlregelung für Verdichter, Ventilatoren und Pumpen	4 – 6 %
Hocheffizienzmotoren für den Ventilator am Verdampfer	2 - 5 %
Hocheffizienter Kältekompressor	2 - 5 %
Hocheffizienzmotoren für den Ventilator am Kondensator	2 - 5 %
Verdunstungskühler	
Richtige Bedienung und Vermeidung unnötig niedriger Temperaturen	
Reinigung der Wärmeübertragerflächen	3%
Steuerung des Verdichtungsendrucks am Kältekompressor	10 – 15 %
Abtausteuerung	5 %

Basissystembeschreibung

Die Beschreibung eines Kältesystems kann auf Basis vorhandener Aufzeichnungen oder auf Basis einfacher Messungen erstellt werden. Im Rahmen dieser Arbeiten sollten die folgenden Informationen gesammelt werden.

1. Liste der Komponenten und deren Verschaltung mit Angabe der technischen Parameter (Elektrische Leistung, Kühlleistung, Technologie, Alter...),
2. Eingesetztes Kältemittel
3. Nutzttemperatur (Anwendungsbereich, Minimum/Maximum)
4. Einsatzfelder für die Kälteerzeugung und Kühlung (Welche Art und Menge eines Produkts wird gefroren/gekühlt)
5. Wird Kälte auf verschiedenen Temperaturniveaus benötigt?
6. Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr
7. Bedarfsprofil: Geschätzte Schwankung innerhalb eines Tages/einer Woche, Tag/Nacht und nach Jahreszeit
8. Wird das System abgeschaltet wenn kein Kältebedarf vorhanden ist?

In den meisten Firmen können alle oder die meisten dieser Daten durch eigenes Personal ermittelt und zusammengestellt werden.

Anlagen unter 10 kW_{el}

Beachten Sie, dass bei vielen Systemen (vor allem Systemen unter 10 kW) die potentiellen Einsparungen komplexe und teure Maßnahmen zur Ermittlung von spezifischen Werten nicht rechtfertigen. In diesen Fällen kann die Bewertung mit Hilfe von Faustregeln erfolgen, z.B.:

- Stromkosten können aus der nominalen Leistung des Verdichterantriebsmotors und der Betriebsstundenzahl abgeschätzt werden.
- Die jährlichen Kapitalkosten können auf 10% der derzeitigen Kosten für den Austausch des gesamten Systems geschätzt werden.
- Die Wartungskosten entsprechen ca. 7% bis 9% der Anschaffungskosten.

Anlagen über 20 kW_{el}

Die Dokumentation oder Messung der Betriebsparameter ist für alle Systeme erstrebenswert und bei großen Systemen (mehr als 20 kW_{el}) essentiell. Die Ermittlung dieser Daten kann durch qualifizierte Mitarbeiter oder Fachfirmen erfolgen.

1. Last- / Leerlaufzeiten
2. Typ und Funktionsweise der Anlagensteuerung und der einzelnen Kälteverbraucher.
3. Gesamtstromverbrauch (einschließlich Ventilatoren am Kondensator und Pumpen – z.B. für Kühlwasser in einem Sekundärkreislauf)
4. Bei großen Systemen sollte ein Datenlogger zum Erfassen der Daten verwendet werden (ggf. für die Zeit der Ist-Aufnahme zu installieren) mit dem Druck, Temperatur, Durchfluss,

Leistungsaufnahme und relative Feuchtigkeit über einen repräsentativen Zeitraum gemessen werden.

Tipps zur Leistungsmessung

Leistungsziffer

Wenn nicht bekannt, kann eine gute Schätzung der Leistungsziffer mit Hilfe der Temperaturen im Kondensator und Verdampfer gemacht werden. (Beachten Sie, dass die Temperaturen in Kelvin angegeben werden müssen: $273.15 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$).

$$\varepsilon = 0,5 * \frac{T_o}{T_c - T_o}$$

T_o = Verdampfertemperatur in [K]!

T_c = Kondensationstemperatur in [K]!

Leistungsmessung Verflüssiger

Die Leistung wassergekühlter Verflüssiger lässt sich mit einer einfachen Messung errechnen. Man misst die Temperatur des Eintrittswassers t_{we} und die des Austrittswassers t_{wa} , dann lässt man Wasser in ein Gefäß mit bekanntem Inhalt ablaufen und stoppt die zum Füllen des Behälters erforderliche Zeit. Aus der Zeit und dem Behälterinhalt kann man die stündliche Durchflussmenge errechnen.

$$G_w = \frac{V[\text{Behälter}] * 3.600}{t}$$

G_w Durchflussmenge in [l/h]

$V[\text{Behälter}]$ Behältervolumen in [l]

T Zeit zur Befüllung des Behälters in [s]

Verflüssigerleistung

$$Q = G_w * c * (t_{wa} - t_{we})$$

Q Verflüssigerleistung in [kJ/h]

c spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K], bei Wasser 4,19

Ableitung von ökonomischen Kennzahlen:

Auf der Basis der gesammelten Daten können die folgenden Kennzahlen berechnet werden, mit deren Hilfe eine Beurteilung der Systemleistung erfolgen kann.

I Jährliche Kapitalkosten [Euro/a]		A Jährliche Betriebsstunden [h/a]	
II Jährliche Wartungskosten [Euro/a]		B Leistung der Kälteanlage [kW]	
III Energiekosten für die Kälteerzeugung [Euro/a]		C Leistungszahl ϵ [-]	
IV Gesamtkosten (Summe von I-III) [Euro/a]		D Kälteleistung (B*C) [kW]	
V Produktmenge [kg; Liter;...]		E Strompreis [Euro/kWh _{el}]	
Spezifische Kältegesamtkosten (IV/D) [Euro/kWKälte]			
Spezifisches Verhältnis: (wenn möglich) kWh _{el} /Produktmenge (A*B/V) Euro/Produktmenge (IV/V)			

Quelle: Europäische Kommission, MCP Modul Industrielle Kälte, Brüssel 2006

Kennzahlen

Vergleichsgröße pro Nettovolumen	Durchschnittswert	energieeffiziente Anlage
Tiefkühlmöbel (- 18 °C)	16'000 (kWh/a)/m ³	10'000 (kWh/a)/m ³
Kühlmöbel (+ 2 °C)	8000 (kWh/a)/m ³	5000 (kWh/a)/m ³
Tiefkühlraum (- 18 °C)	400 (kWh/a)/m ³	200 (kWh/a)/m ³
Kühlraum (+ 2 °C)	200 (kWh/a)/m ³	100 (kWh/a)/m ³

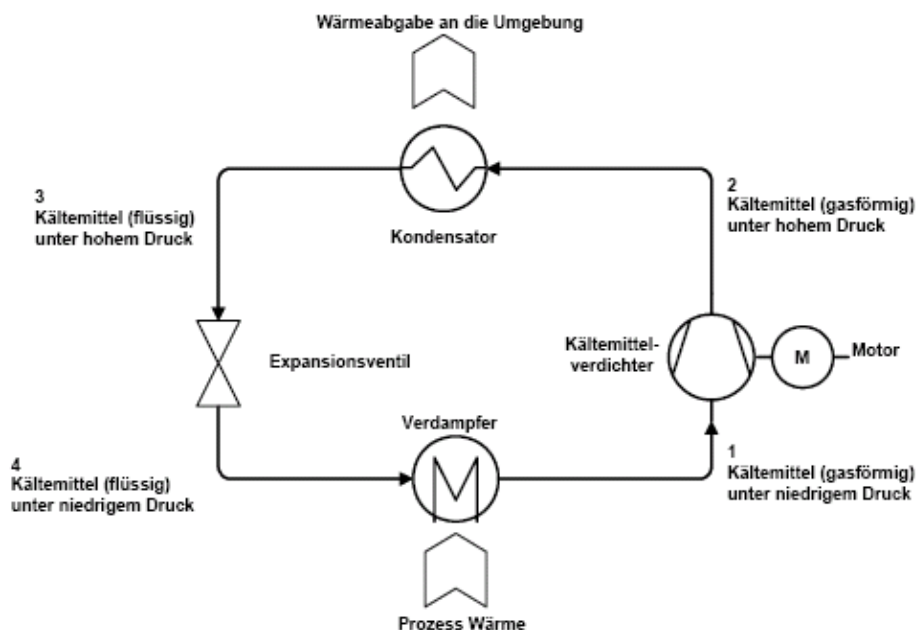
Quelle: <http://www.energie.ch/themen/industrie/infel/kaelteanlagen.htm>

Beschreibung Kältesystem

Unter Kältemaschinen werden Maschinen verstanden, die mit einem thermodynamischen Kreisprozess Wärme von tiefer zu hoher Temperatur fördern und damit einen Wärmeträger abkühlen. In den meisten Fällen erfolgt dies unter Zuhilfenahme von mechanischer Arbeit bzw. eines Kompressors. Dem Verdampfer wird auf tiefem Temperaturniveau Wärme zugeführt (hier Kälte) und die vom Kondensator abgegebene Wärme als Abwärme betrachtet. Eine Kälteanlage nimmt also Wärme an der Kühlstelle auf, transportiert sie ab und gibt sie an anderer Stelle wieder frei.

Kältesysteme werden heutzutage in vielen industriellen Anwendungen genutzt. Branchen mit einem großen Bedarf an Kälteanlagen sind die Lebensmittel-, Chemie- und Bauindustrie. Die meisten Systeme basieren auf dem Kaltdampfprozess, bei dem ein Kältemittel verwendet wird, das einen Wechsel vom flüssigen zum gasförmigen Aggregatzustand erfährt.

Die Hauptkomponenten eines solchen Systems sind ein Verdichter, ein Kondensator und ein Verdampfer (siehe folgende Abbildung). Abhängig von der Anwendung kann ein System auch aus mehreren dieser Komponenten bestehen. Die Kälte kann direkt über einen Wärmetauscher oder durch einen sekundären Kältekreislauf transportiert werden, vor allem wenn die Gefahr einer Kontaminierung durch das Kältemittel hoch ist. Bei einer Kühltemperatur von mehr als 0°C wird dazu häufig kaltes Wasser eingesetzt.



Beschreibung eines Kälteprozesses

Verdampfung: Bei einer Temperatur von $-26,4\text{ °C}$ beginnt das zunächst flüssige Kältemittel R 134 zu verdampfen. Es entzieht dabei der Umgebung z.B. einem Kühlschranks bei einer Temperatur von 5 °C Wärme.

Verdichtung: Um das Kältemittel nicht an die Umgebung abzugeben, muss es wieder verflüssigt werden. Dies geschieht indem man es unter $-26,4\text{ °C}$ abkühlt oder indem man es so weit verdichtet (auf 8,15 bar), dass der Verflüssigungspunkt (32°C) auf über die Umgebungstemperatur erhöht wird.

Verflüssigung: In diesem Hochdruckzustand kann Wärme an die Umgebung abgegeben werden und das Kältemittel kondensiert wieder. Ist es wärmer, muss das Kältemittel auf einen noch höheren Druck verdichtet werden.

Leistungsziffer

Die Leistungsziffer einer Kältemaschine, auch Kälteziffer genannt, berechnet sich als Verhältnis der erzeugten Kälte (Verdampfer-Wärme) zur Antriebsenergie:

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{Q}}{P}$$

ε_k Kälteziffer auch COP genannt

Q Kälteleistung in [kW]

P Antriebsleistung in [kW]

Carnot Wirkungsgrad:

$$\eta_c = \frac{T_o}{T_c - T_o}$$

T_o = Verdampfertemperatur in [K], auch Kältetemperatur (z.B. $6\text{-}12\text{°C}$ bzw. $279 - 285\text{ K}$)

T_c = Kondensationstemperatur in [K], auch Rückkühltemperatur (z.B. $30\text{-}50\text{°C}$ bzw. $303 - 323\text{ K}$)

Effizienzkriterien

Die Erhöhung der Verdampfertemperatur um 1 K führt zu einer Energieeinsparung von ca. 3-4%. Eine Verminderung der Kondensationstemperatur um 1 K führt zu einer Energieeinsparung von 1-2%!

Die Kondensationstemperatur wird geringer, wenn:

- Die Kondensationsfläche größer ist und die Wärmeübertragung ungehindert erfolgen kann;
- Die Kondensationstemperatur mit der Umgebungstemperatur nach unten geregelt wird;
- Wasser statt Luft als Kühlmedium verwendet wird;

Die Verdampfungstemperatur wird höher, wenn:

Die Verdampferfläche größer ist und die Wärmeübertragung ungehindert erfolgen kann (insbesondere eisfrei ist);

Weitere Einflussfaktoren auf die Leistung eines Kältesystems sind:

Die **Effizienz** von verschiedenen Kompressortypen variiert. Diese sollten nach Größe der Kühllast, Art des Kältemittels, erforderliche Temperatur und durchschnittliche Temperatur des Kühlmediums (Luft oder Wasser) ausgewählt werden.



Kälteanlage	EER (Min – Max)
Luftgekühlt	1,61 – 3,97
Wassergekühlt	2,62 – 6,38

Die **Menge des Kältemittels** hat einen großen Einfluss auf die Höhe des Druckunterschiedes zwischen Saug- und Druckseite. Systeme mit Leckagen aber auch Systeme, die mit Kältemittel überfüllt sind, haben schlechtere Leistungsziffern.

Die **Auswahl des Kältemittels** ist entscheidend, allerdings oft von den Systembedingungen (Temperatur, Kompressor, usw.) vorgegeben: Energieeinsparungen können bis zu 10% betragen.

Die **Überhitzung des Saugdampfes** soll so gering wie möglich sein. Dies wird z.B. durch Expansionsventile gesteuert.

Die **Unterkühlung des Kältemittels** vor der Entspannung sollte so weit wie möglich erfolgen, daher darf die Flüssigkeitsleitung nicht durch warme Räume verlegt werden.

Verdichterarten

Das Kaltgas aus dem Verdampfer wird durch den Verdichter angesaugt und auf einen höheren Druck gebracht. Durch die Kompression steigt die Siedetemperatur des Kältemittels an. Kälteverdichter befinden sich normalerweise in einem zentralen Maschinenraum. Drei Haupttypen werden überwiegend in der Praxis eingesetzt: Kolben-, Schrauben- oder Turboverdichter.

Kolbenkompressoren

In der gewerblichen Anwendung werden Verdichter mit hin- und hergehenden Kolben (Hubkolbenverdichter) am häufigsten eingesetzt.

Im mittleren Leistungsbereich werden halbhermetische Verdichter eingesetzt: Bei diesen Verdichtern sind Motor und Verdichter in einem Gehäuse untergebracht. Das Gehäuse ist (im Gegensatz zu den hermetischen Kolbenverdichtern) nicht verschweißt, sondern verschraubt, um Reparaturen an inneren mechanischen Bauteilen vorzunehmen.

Der zurückgehende Kolben erzeugt im Zylinder einen Unterdruck gegenüber der Saugleitung. Dadurch öffnet sich das Einlassventil und es strömt Kältemittel mit Niederdruck in den Zylinder ein. Hat der Kolben seinen Totpunkt überschritten, beginnt der Zylinderdruck zu steigen, das Einlassventil schließt sich. Das Auslassventil bleibt noch geschlossen, da der Druck auf der Hochdruckseite (Verflüssigerdruck) noch höher ist. Während der Kompression wird Kältemittel in dem Zylinder vom Verdampfungsdruck (Niederdruck) auf den Verflüssigerdruck (Hochdruck) komprimiert. Wenn der Zylinderdruck den Verflüssigerdruck überschritten hat, wird das hochgespannte Gas ausgestoßen.

Vorteile: bewährte Bauart, hohe Leistungsziffern

Nachteile: hoher Unterhaltsbedarf, Vibration, eher schlechte Regelbarkeit

Schraubenverdichter

In diesen Verdichtern verdichten parallel - achsige Rotoren durch formschlüssige Zahnprofile im gegenseitig dichtenden Kämmeingriff (z.B. Hauptrotor konvex, Nebenrotor konkav geformte Zähne) den Kältemitteldampf. Die Verdichtung wird durch die Lage der Öffnungskanten bestimmt. Schraubenkompressoren sind eher teurer als Kolbenkompressoren und etwas weniger effizient. Dafür ist die Leistung stufenlos und mit gutem Teillastwirkungsgrad regelbar. Schraubenverdichter werden für den mittleren Leistungsbereich von 50 kW bis 1.000 kW eingesetzt. Bei einer Leistung unter 60% ist der Kompressor relativ ineffizient.

Turbokompressoren

Bei diesen Kompressoren für große Leistungen von mehreren MWs sind Turbinenschaufeln auf einer rotierenden Welle angeordnet. Sie erreichen gute Leistungsziffern, sind jedoch nicht für alle Kältemittel erhältlich. (z.B. Ammoniak).

Für alle Verdichter gilt:

- Je niedriger der Saugdruck, umso weniger Kältemitteldampf wird angesaugt.

- Je höher der Verflüssigungsdruck ist, umso weniger Kältemitteldampf wird ausgestoßen.
- Je größer der Druckunterschied zwischen Hoch- und Niederdruck ist, umso weniger Kältemitteldampf wird befördert.
- Je weniger Kältemittel befördert wird, umso geringer ist die Kälteleistung.

Die Kälteleistung und damit die Leistungszahl ist daher umso höher:

Je höher der Saugdruck (Verdampfungsdruck/-temperatur);

Je niedriger der Verflüssigungsdruck (-temperatur);

Je kleiner der Druckunterschied zwischen Hoch- und Niederdruck;

Je höher der mittlere Kolbendruck ist, umso größer muss die Antriebsleistung des Verdichters sein.

Kühlung des Schmierölsystems für Schraubenverdichter

Schraubenverdichter benötigen zur Aufnahme des Wärmestromes der Verdichtung, zum Schmieren und Abdichten der Flanken der Läufer, zum Schmieren der Lager usw. Schmieröl. In der Regel werden Kälteanlagen mit externen Schmierölkreislauf ausgeführt, es gibt auch solche in Kompaktausführung.

Für die Kühlung des Schmieröls stehen mehrere Möglichkeiten zu Verfügung:

Bei wassergekühlten Kühlern ist Frischwasser erforderlich und mit hohen Betriebskosten zu rechnen.

Die Kühlung durch direkte Einspritzung des Kältemittels in den Arbeitsraum benötigt 5-15% der Kompressorleistung, es sind bei luftgekühlten Verflüssigern hohe Druckdifferenzen zu überwinden.

Bei der Kühlung des Schmieröls durch den Thermosiphon wird weniger Energie als bei der Einspritzung des Kältemittels benötigt. Das flüssige Hochdruck-Kältemittel wird durch natürliches Gefälle, also ohne Pumpen, aus dem Verflüssiger zum Ölkühler (ein Wärmetauscher) gefördert, das Öl damit gekühlt. Der Dampf wird über die Heißgasleitung wieder zum Kondensator geführt. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die maximale Druckdifferenz im Verflüssiger und im Ölkühler geringer als die Höhendifferenz der Flüssigkeitssäule ist.

Economizer

Schraubenverdichter haben einen zweiten Sauganschluss für einen höheren Saugdruck, der über dem Verdampfungsdruck liegt. Der in diesem Zustand angesaugte Kältemitteldampf wird über eine kleinere Druckdifferenz verdichtet, wodurch Energie gespart wird.

Energieeffizienzkriterien Verdichter

- Die Effizienz verschiedener Verdichter variiert sehr stark, auch bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Bei der Auswahl der Verdichter sind auch die Zusatzkomponenten wie Kühlventilatoren zu berücksichtigen.
- Bei großer Kühllast ist es oft effizienter, die Last auf mehrere Verdichter mit einem Kontrollsystem aufzuteilen. Zu rascher Lastwechsel aufgrund der Anpassung eines überdimensionierten Kompressors an die Last führt zu geringerer Effizienz und zu schnellerem Verschleiß.
- Vermeidung interner Regelungen, effizienter sind Anlagenverbunde.
- Falls Regelung des einzelnen Kompressors erforderlich: Nutzung moderner Regelungsmethoden (z.B. Drehzahlregelung)

Antriebsmotoren

Die erforderliche Leistung des Antriebsmotors muss umso höher sein

- Je größer der Verdichter (Kolbenhub und/oder Zylinderdurchmesser)
- Je höher der Saugdruck
- Je höher der Verflüssigungsdruck
- Je höher die Drehfrequenz

Für ein und denselben Verdichter können also je nach Betriebsbedingungen oder Drehzahl verschieden starke Antriebsmotoren erforderlich sein.

Der Antriebsmotor einer Kältemaschine muss gegen Volllast anlaufen können. Also für den Fall, dass sich im Zylinder gerade hochgespanntes Gas befindet. Um den Energiebedarf einer Kälteanlage möglichst gering zu halten, hat man Spezialdrehstrommotoren für den Antrieb entwickelt. Diese Motoren haben eine besonders starke Zugkraft beim Anlaufen. Mit steigender Drehfrequenz fällt die Anlaufkraft auf die normale Zugkraft ab, damit verbraucht der Motor weniger Energie. Bei größeren Anlagen oder Tiefkühlanwendungen lohnt es sich, eine Startregelung vorzusehen.

Wird durch ein Kapillarrohr in der Stillstandszeit der Kälteanlage ein Druckausgleich erzielt, können Motoren mit einem niedrigen Drehmoment eingesetzt werden.

Die Leistung einer Kälteanlage ist nicht von der Leistung des Antriebsmotors abhängig. Eine Kälteanlage arbeitet dann optimal, wenn sie zum Erreichen ihrer Kälteleistung die geringste Antriebsleistung benötigt.

Keilriemenantrieb

Ein oft eingesetzter Antrieb beim offenen Kältemittelverdichter ist der mit Keilriemen. Beim Keilriemenantrieb ist zu beachten, dass die Keilriemen Querkräfte auf die Wellenlager übertragen, die durch Kugellager besser aufgefangen werden als durch Gleitlager. Die Spannkraft der Keilriemen ist regelmäßig zu überprüfen, da gedehnte Riemen auch zu verstärkten Schwingungen führen.

Eine zu geringe Vorspannung der Keilriemen führt zu:

- Mangelnder Übertragung der Leistung
- Sinkendem Wirkungsgrad
- Vorzeitiger Zerstörung der Keilriemen

Allerdings darf ein Keilriemen auch nicht zu stark gespannt werden:

Gefahr von Querbiegung, erhöhte Beanspruchung der Zugträger, vorzeitige Dehnung der Keilriemen und Schäden an Wellenlager wären die Folge.

Direktkupplung

Ein offener Kältemittelverdichter kann aber auch direkt von einem Elektromotor angetrieben werden, was durch eine flexible Kupplung realisiert wird. Der Verdichter muss dabei für die gewünschte Motordrehfrequenz bemessen sein. Der Vorteil liegt gegenüber anderen Antrieben

bei der Vermeidung der Übertragungsverluste. Zu beachten sind: Der Wellenversatz muss ausgeglichen werden (Anflanschen des Motors zur optimalen Fluchtung der Maschine zum Motor); die Schwingungen müssen gedämpft werden. Dazu ist wiederum eine elastische Kupplung mit großem Durchmesser des Elastomers zu wählen.

Energieeffizienzkriterien Antriebssystem

- Einsatz hocheffizienter Motoren (eff 1 und besser)
- Einsatz von Kälteanlagen mit Direktkupplung
- Bei Einsatz von Keilriemen: regelmäßige Kontrolle, Nachspannung

Leistungsregelung von Verdichtern

Wie bei allen energetischen Systemen ist nach Senkung des Bedarfs und der Verteilungsverluste die Anpassung der Bereitstellung an den Bedarf die wichtigste Energieeinsparmöglichkeit.

Kälteanlagen müssen hinsichtlich der benötigten Kälteleistung auf die maximalen Betriebsbedingungen, d.h. auf den größten Temperaturhub ausgelegt werden. Dies führt dazu, dass sie für alle anderen Betriebszustände zu groß dimensioniert sind, also zu viel Leistung anbieten. Daher gehört eine adäquate Leistungsregelung zu den wichtigsten Effizienzmaßnahmen.

Weitere Kriterien für eine Regelungsauswahl sind:

- Qualität der Regelung
- Kosten
- Betriebssicherheit
- Einsatzbereich des Verdichters
- Mindestlaufzeit
- Belastung des Stromnetzes

Hubkolbenverdichter	Schraubenverdichter
Abhebung der Saugventile	Interner Bypass
Interner Bypass	Interne Reglerkolben
Vergrößerung des Zylinder-Schadraums	Parallel zur Rotorachse bewegter Regelschieber
Absperrung des Ansaugkanals zu einzelnen Zylindern	Drehzahlregelung
Drehzahlregelung	

(Quelle: Bitzer, A600-1, S 4, www.bitzer.de)

Externe Regelungsmöglichkeiten

Saugdrossel

Saugdrossel-Regelungen finden sich aufgrund des höheren Saugdrucks eher bei Klimaanwendungen. Durch den Drosseleffekt in der Saugleitung wird der Saugdruck für den Verdichter künstlich abgesenkt. Der eigentliche Verdampfungsdruck wird dabei nur indirekt durch die geringere Kälteleistung beeinflusst. Der Verdichtungsprozess wird aus energetischer Sicht durch das höhere Druckverhältnis verschlechtert.

Externer Bypass

Bei Klima- und Normalkühlung kann ein externer Bypass in der Regel durch eine einfache Rohrleitung zwischen Hoch- und Niederdruckleitung ausgeführt werden. Ein durch den Verdampfungsdruck geregeltes Ventil öffnet/schließt den Bypass zur permanenten Anpassung der Kälteleistung. Bei Tiefkühlanwendungen ist ein zusätzliches Flüssigkeits-Nacheinspritzventil erforderlich oder die Rückführung direkt zur Verdampfer-Eintrittsseite möglich.

Aussetzregelung

Die einfachste Art der Steuerung ist das Ein- und Ausschalten. Dabei muss aber der Motor häufig gegen Last angefahren werden. Stark schwankende Betriebsbedingungen führen aufgrund hoher Schalthäufigkeit auch zu reduzierter Lebensdauer von Verdichter und Systemkomponenten. Die Taktzahl kann jedoch z.B. durch Pufferspeicher vermindert werden.

Die Leistungszahl ist von der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur abhängig. Mit der Aussetzregelung ist es meist nicht möglich, die Anlage in den verschiedenen Betriebspunkten optimiert zu betreiben, dies führt daher zu höheren Betriebskosten.

Aber auch sehr gut regelbare Systeme müssen bei sehr geringem Massenstrom ab einer gewissen Laststufe im Aussetzbetrieb betrieben werden, aufgrund der Charakteristik des Expansionsventils und eines gesicherten Öltransports.

Hubkolbenverdichter

Integrierter Bypass

Bei älteren halbhermetischen Verdichtern wurde oft die integrierte Bypass-Schaltung genutzt. In den zu entlastenden Zylinder wurde eine Verbindung zwischen Hoch- und Niederdruckkammer hergestellt, die Gasförderung unterbrochen und damit der Verflüssigungsdruck abgesenkt. Aufgrund hoher Strömungsverluste ist die Effizienz ungünstig, die thermische Belastung sehr hoch. Die Leistungsaufnahme des Verdichters bei Teillast reduziert sich nur wenig.

Systeme zum Anheben der Saugarbeitsventile

Bei Mehrzylinder-Bauweisen werden Verfahren zur „Zylinderabschaltung“ verwendet, Zylinder also durch Anheben der Saugventile wirkungslos gemacht. Dieses schließt beim Aufwärtshub nicht, der Volumenstrom wird wieder zur Saugseite gefördert. Der Zylinder arbeitet im Leerlauf. Bei 4-, 6-, 8-Zylinderverdichtern werden meist zwei Zylinder pro Laststufe geschaltet, wodurch sich z.B. bei einer 6-Zylinder Bauweise die Stufen 33-66-100% ergeben. Diese Steuerung kann auch zur Anlaufentlastung des Antriebsmotors sinnvoll genutzt werden.

Die mechanischen Verluste des Verdichters sowie die Ventilverluste bleiben erhalten, die Antriebsleistung sinkt weniger als die Kälteleistung.

Schadraum-Regelung

Bei der sog. Schadraum-Regelung wird beim Verdichtungsprozess ein Teil des Gasstroms in einen zusätzlichen Druckraum gefördert, beim Abwärtshub strömt das Gas wieder zurück. Damit wird die Zylinderfüllung wesentlich reduziert. Es wird bei Verdichtern mit weniger als 3 Zylindern eingesetzt. Die hohen Rückexpansionsverluste führen zu einem stärkeren Abfall im Teillast-Wirkungsgrad.

Schließen der Saugventile

Die am häufigsten eingesetzte integrierte Leistungsregelung für Hubkolben-Verdichter in gewerblichen Anwendungen ist die Absperrung des Saugkanals. (Drosselung des Ansaugdrucks)

Umgekehrt zur Anhebung der Saugventile, werden diese bei dieser Schaltung geschlossen. Der Gasfluss wird unterbrochen und die Kolben laufen ohne Gasdruck leer mit. So können die

Strömungsverluste vermieden werden, die Leistungsaufnahme des Motors reduziert sich nahezu proportional zur Leistungsreduzierung.

Schraubenverdichter

Interner Bypass

Beim internen Bypass-System werden radial angeordnete Bohrungen in den Profildbereich eingebracht, die mit einem steuerbaren Ventil zur Saugseite hin geöffnet werden. Im Teillastbetrieb strömt dann vorverdichtetes Gas wieder zur Saugkammer zurück und reduziert den Förderstrom. Bei höherem Querschnitt dieser Bohrung kommt es allerdings zu zusätzlichen Leckagen bei der Verdichtung während des Volllastbetriebes. Im Regelbetrieb entstehen Verluste durch Vorverdichtung und hohen Strömungswiderstand.

Steuerkolben

Großdimensionierte Steuerkolben greifen direkt in den Profildbereich ein. Sie sind an die Kontur des Rotorgehäuses angepasst, wodurch interne Leckagen bei der Verdichtung vermieden werden.

Regelschieber

Bei größeren Schraubenaggregaten kann eine Leistungsregelung mittels Schiebersteuerung stufig oder bei größeren Schrauben meist stufenlos zu einer Minimalleistung von ca. 10% realisiert werden. Bei Volllastbetrieb befindet sich der Schieber in der Anschlagposition. Bei Drehung der Rotoren wird der gesamte Profilarbeitsraum mit Sauggas gefüllt und damit die volle Förderleistung erreicht. Je weiter der Schieber zur Hochdruckseite hin bewegt wird, desto kleiner ist das verfügbare Profilvervolumen. Es wird weniger Volumen angesaugt, die Kälteleistung sinkt. Bis zu einer Leistung von ca. 50% ist die Steuerung effizient, darunter fällt die Leistungszahl drastisch ab. Sie ist wesentlich kostengünstiger als die Drehzahlregelung.

Polumschaltbare Motoren

Sie sind kostengünstig, werden aber bei Kälteverdichtern nicht mehr eingesetzt. Polumschaltbare Motoren wurden üblicherweise für eine Drehzahl hinsichtlich Wirkungsgrad, Drehmomentverlauf und Leistungsfaktor optimiert. In anderen Drehzahlstufen liegen schlechtere Bedingungen vor, die hohe Schaltfrequenz wirkt sich sehr nachteilig auf Verdichter- und Motorlebensdauer sowie auf Netzbelastung aus.

Drehzahlregelung

Die Kälteleistung der Kältemaschine wird vor allem durch den geförderten Kältemittelvolumenstrom bestimmt.

Der Kältebedarf von Anlagen ist meistens nicht stabil und variiert über das Jahr. Durch Drehzahlregelung wird die Leistung des Verdichters an den jeweiligen Bedarf angepasst und vermieden, dass er mit zu hoher Drehzahl läuft. Da bei Drehzahlregelung die Systemdrücke in der Kälteanlage trotz möglicher Lastschwankungen stabil bleiben, werden folgende Vorteile erreicht:

Energieeinsparung durch

- Anhebung der Verdampfungstemperatur

- Optimierung der Kondensationstemperatur
- Reduzierung des Vereisungsgrades des Verdampfers und verlängerte Abtauintervalle
- Kühlqualitätsverbesserung
- Reduzierung von Temperaturschwankungen an den Kühlstellen
- Verbesserte Kühlgutqualität

Die Verdampfungstemperaturabweichung können im Vergleich zur Stufenschaltung um etwa 4-6 K verringert werden. Durch diese kleinere Regelbreite des Verdampfungsdruckes können im Teillastbetrieb ca. 16-25% Energieersparnisse realisiert werden. (1K höhere Verdampfungstemperatur bedeutet 3-4% Energieersparnis).

Ein weiterer Pluspunkt ist die Tatsache, dass bei der Auswahl von Kältemaschinenverdichtern aus Sicherheitsgründen oft der maximal erwartete Bedarf zugrunde gelegt wird, was zu einer Überdimensionierung der Geräte führt. Ein Modell mit variabler Drehzahl hingegen kann für eine gegebene Systemleistung wesentlich kleiner dimensioniert werden, was ebenfalls Kostenersparnisse ermöglicht.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Drehzahlregelung für Verdichter: der Einsatz eines Frequenzumrichters, angeboten von zahlreichen Herstellern wie Danfoss, Dorin, Bock, Bitzer oder Frigopol und der Einsatz einer digitalen Regelung wie bei dem Copeland Digital Scroll.

Hemmschuhe zur Nutzung der Drehzahlregelung stellen/stellten die höheren Kosten, die Probleme mit auftretenden Oberwellen sowie die Ausfallsgefahr der Leistungselektronik dar. Die Entwicklung der letzten Jahre zeigt aber einen vermehrten Einsatz der Frequenzumformertechnik in vielen Gebieten.

Anlagenparallelverbund

Die Möglichkeit der Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Verdichter bietet folgende Vorteile:

- Anpassung der Leistung an den Kältebedarf, durch Ein- Ausschalten einzelner Verdichter
- Hohe Leistungszahlen in der Übergangszeit bei Nutzung gemeinsamer Verdampfer und Kondensatoren
- Abbau der Antriebsleistungsspitze
- Ausfallsicherheit, bessere Möglichkeiten zur Wartung

Durch eine entsprechende Verdichteranzahl und jeweilige Leistungsgröße lässt sich durch eine intelligente Steuerung eine hohe Regelgüte erreichen. Zur Erreichung gleicher Betriebsstunden der Verdichter ist es üblich durch eine Folgesteuerung für eine gleichmäßige Abnutzung der Aggregate zu sorgen.

Gesamtregelung

Eine wirtschaftliche Teillastregelung erfordert eine kontrollierte Absenkung des Verflüssigungsdruckes und eine Anhebung des Saugdrucks. Außerdem muss der Energiebedarf für Hilfsantriebe (Ventilatoren, Pumpen) genau bilanziert werden, diese sollten ebenfalls geregelt werden.

Kondensator

Der typischerweise getrennt von der übrigen Anlage gelegene Wärmetauscher sorgt für die Wärmeabfuhr vom Kältemittel an die Umgebung. Die Verflüssigungsarbeit einer Kältemaschine ist die Summe aus der Verdampfungsarbeit und der in Wärme umgerechneten Arbeit des Antriebsmotors des Verdichters. Am Verflüssiger wird also mehr Wärme abgegeben als im Verdampfer aufgenommen wird. Da ein Wärmestrom nur dann fließen kann, wenn eine Temperaturdifferenz vorhanden ist, muss die Verflüssigungstemperatur immer über der Kühlmitteltemperatur (Umgebungsluft oder Wasser) liegen.

Das gasförmige Kältemittel bei hohem Druck wird bei einer hohen Temperatur im Kondensator verflüssigt.

Der Kältemitteldampf durchströmt dabei drei Zonen bei konstantem Druck:

Die Enthitzungszone: Abkühlung des überhitzten gasförmigen Kältemittel auf Verflüssigungstemperatur

Verflüssigungszone: Verflüssigung bei konstanter Temperatur

Unterkühlungszone: Abkühlung des flüssigen Kältemittels unter die Verflüssigungstemperatur

Das flüssige Kältemittel tritt aus dem Kondensator mit hohem Druck und mit mittlerer Temperatur aus.

Luftgekühlte Verflüssiger

Der Verflüssigungsdruck – also damit auch die Verflüssigungstemperatur – hängt von verschiedenen Faktoren ab.

Je niedriger der Verflüssigungsdruck um so besser für die Energieeffizienz.

Der Verflüssigungsdruck muss aber immer so hoch sein, dass die Verflüssigungstemperatur über der Umgebungstemperatur der Luft liegt, da sonst keine Wärme aus dem Verflüssiger in die Umgebung fließen kann.

Je größer die Verflüssigeroberfläche ist, desto niedriger kann die Verflüssigungstemperatur und damit der Verflüssigungsdruck liegen und umso größer damit die Leistung der Kälteanlage.

In der Praxis wird die Oberfläche so gewählt, dass sich eine Verflüssigungstemperatur von 10K über der Umgebungstemperatur ergibt.

Umgekehrt vermindert eine ungenügend große Verflüssigungsfläche die Kälteleistung der Gesamtanlage, der Verdichter muss gegen einen hohen Druck arbeiten.

Da man die Verflüssigungstemperatur zur Steigerung der Kälteleistung möglichst niedrig halten will, diese aber höher als die Umgebungstemperatur sein muss, folgt daraus: die Temperatur der Verflüssigerkühlluft muss möglichst niedrig sein!

Der Verflüssiger muss daher an einem Platz stehen, an dem die Kühlluft möglichst niedrig ist und die erwärmende Luft gut abströmen kann. Warme Räume, direkt an der Sonne, unter Treppen, kleine Räume, Keller usw. eignen sich daher eigentlich nicht für die Aufstellung.

Die Temperatur des Kühlmediums steigt, während es das Kältemittel kühlt. Diese Temperatursteigerung sollte so gering wie möglich sein, was z.B. durch einen höheren Kühlmittelstrom erreicht wird. Allerdings ist dabei der zusätzliche Energieverbrauch für Ventilatoren oder Pumpen zu berücksichtigen.

Lamellenverflüssiger

Lamellenverflüssiger bestehen aus verkupferten Stahlrohren mit 10mm Außendurchmesser (Abstand 22mm) und aufgesetzten Aluminiumlamellen (Abstand ca.3 mm).

Rein statisch belüftete Verflüssiger werden hauptsächlich in kleineren Kühlmöbeln bis 250 W eingesetzt. Entsprechend den Anforderungen im Hinblick auf Luftwiderstand, Geräuschentwicklung, Platzverhältnisse und Kanalanschluss setzt man Axial- oder Radialventilatoren zur Belüftung ein. Ein hoher Wirkungsgrad der Lüfter wird erreicht, wenn der Verflüssiger durch ein Stahlblechgehäuse abgeschottet ist und der Luftstrom durch einen Einlauftrichter strömt. Der Luftstrom wird dann durch das Lamellenpaket gesaugt und nach oben abgeführt.

Verflüssiger können im Freien auf der Erde, dem Dach oder einer Außenwandkonsole aufgestellt werden. Sie sollten mit Sonnen- und Wetterschutzhauben ausgestattet sein und so ausgerichtet sein, dass die im Sommer vorherrschenden Winde den Ventilator unterstützen. Der Aufstellungsort muss sauber sein, Staub und Schmutz sollen die Wärmeübertragung nicht behindern. Die Kühler müssen daher regelmäßig gereinigt werden! Bei Aufstellung von Verflüssigern kleinerer Leistung im Gebäudeinneren können Kanäle, die einerseits kühle Luft zuführen, andererseits die warme Luft wieder abführen an den Verflüssiger mit Zentrifugal-Ventilator angeschlossen werden. An der Ausblas- und Ansaugöffnung darf dabei keinesfalls ein Kurzschluss entstehen! Ein Staubfilter am Lufteintritt kann Ablagerungen mindern.

In der Nacht wird eine geringere Kälteleistung benötigt, gleichzeitig sind die Vorschriften für den Schalleistungspegel schärfer. Der Antriebsmotor könnte daher für die Lüfter in der Nacht auf eine geringere Drehfrequenz geregelt werden.

Durch eine zusätzliche Unterkühlungsrohrschlange am luftgekühlten Verflüssiger lässt sich die Verdichterleistung um 1% pro 1 K Flüssigkeitsunterkühlung steigern. Die Unterkühlung erhöht damit die Kälteleistung, da pro kg Kältemittel mehr Wärme aufgenommen werden kann. Unterkühlungsrohre zur Unterkühlung ausgelegt auf 5-10 K führen damit zu einer Steigerung der Verdichterleistung von 5-10%. Ein kleinerer Verdichter reicht dann aus. In der Praxis sind die Möglichkeiten begrenzt: Einerseits kann die Unterkühlungstemperatur nicht niedriger werden als die Temperatur des Kühlmittels (Luft, Wasser) am Eintritt in den Verflüssiger. Bei luftgekühlten Verflüssigern beträgt die Unterkühlung bis zu 2 K. Andererseits ist ein konstruktiver Mehraufwand nötig.

Druckregelung von Verflüssigern

Für eine optimale Arbeitsweise einer Kälteanlage sollte der Verflüssigungsdruck immer an der unteren möglichen Grenze liegen. Ein hoher Verflüssigungsdruck bedeutet immer eine geringere Leistungszahl bei gleichzeitig höherer notwendiger Antriebsleistung für den Verdichter. Sicherheits- und Begrenzungseinrichtungen sollten den Motor davor schützen.

Ein zu tiefer Verflüssigungsdruck hat aber ebenfalls gravierende Nachteile: Durch das Expansionsventil fließt nicht mehr der notwendige Kältemittelstrom, der Kühler wird unterversorgt, was wiederum eine Minderleistung bewirkt.

Die Leistung steigt also nur solange an, solange der Verflüssigungsdruck über den minimal zulässigen Druck des Expansionsventils gesenkt wird.

Kältemittelseitige Regelung luftgekühlter Verflüssiger

Wird der Soll-Verflüssigungsdruck unterschritten, leitet der Regler unter Umgehung des Verflüssigers den überhitzten Kältemitteldampf direkt in den Flüssigkeitssammler, was zu einem Rückstau von flüssigem Kältemittel im Verflüssiger führt (der Flüssigkeitssammler ist für das verflüssigte Kältemittel blockiert). Damit entsteht ein höherer Verflüssigungsdruck. Allerdings ist für diese Regelung eine große Füllmasse und damit ein großer Flüssigkeitssammler notwendig, damit auch bei geflutetem Verflüssiger im Flüssigkeitssammler immer noch der minimale Flüssigkeitsstand vorhanden ist.

Auf einen gewünschten Verflüssigungsdruck einstellbare Regler werden zwischen Verflüssiger und Flüssigkeitsraum eingebaut. Sinkt der Druck am Eintritt unter den eingestellten, schließt der Regler und regelt damit den Verflüssigungsdruck. Der Flüssigkeitssammler ist groß zu wählen.

Für die Funktion der Kälteanlage ist aber auch der Druck vor dem Expansionsventil von Bedeutung. Dieser darf nicht zu gering ausfallen. Ist der Flüssigkeitssammler im Freien aufgestellt wird mit sinkender Umgebungstemperatur auch der Sättigungsdruck der Flüssigkeit niedriger. Daher wird zusätzlich ein Konstantdruckventil im Bypass zwischen Verflüssiger und Regler eingebaut.

Nachteile: große Flüssigkeitssammler, höhere potenzielle Umweltbelastung durch zusätzliche Kältemittelfüllung

Luftseitige Regelung

Diese vermeidet die Nachteile der kältemittelseitigen Regelung. Dabei werden einfach Lüfter mittels an die Druckleitung angeschlossenen Druckschaltern ein- oder ausgeschaltet.

In Abhängigkeit von der Außenluft können aber auch Lüfter thermostatisch gesteuert werden. Die Thermostate können dann für die einzelnen Lüfter gestuft eingestellt werden. Zu beachten sind aber auch hier einige Dinge: plötzliche Senkung des Verflüssigungsdruckes sind zu vermeiden und der Abluftstrom eines Lüfters darf nicht durch die abgeschalteten fließen. Drehfrequenzgeregelte Lüfter können in Abhängigkeit des Verflüssigungsdrucks kontinuierlich gesteuert werden. Plötzliche Druckänderungen werden dadurch vermieden.

Vorteile für Axialventilatoren sind eine höhere Lebensdauer der Antriebsmotoren, geringerer Schalleistungspegel, weniger Energieverbrauch.

Wassergekühlte Verflüssiger

Beim wassergekühlten Verflüssiger wird die Wärme des kondensierenden Kältemittels durch das Kühlwasser aufgenommen. Wie beim luftgekühlten Verflüssiger kühlt sich das gasförmige

Kältemittel ab und kondensiert erst dann. Die Verflüssigungstemperatur muss immer höher als die Kühlwassereintrittstemperatur liegen, um eine Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Das Kühlwasser ist in der Regel kälter als die Luft, daher kann die Verflüssigungstemperatur und damit der Verflüssigungsdruck geringer gehalten werden. Damit ergeben sich für Verdichter mit wassergekühlten Verflüssigern höhere Leistungsziffern. Der Verflüssigungsdruck ergibt sich aus der Kühlwassereintritts- und -austrittstemperatur, der Verflüssigeroberfläche und der zu kondensierenden Kältemittelmenge.

Eine große Verflüssigeroberfläche hält daher den Verflüssigungsdruck gering und vergrößert damit die Leistung einer Kälteanlage. Die Größe der Oberfläche wird so gewählt, dass die Verflüssigungstemperatur bei 10 K über der mittleren Wassertemperatur liegt.

Je höher die Wassermenge, desto mehr Wärme kann aufgenommen werden, desto geringer ist die Temperaturerhöhung des Kühlwassers. Bei Drosselung der Wassermenge, erhöht sich die mittlere Wassertemperatur und damit die Verflüssigungstemperatur. Die günstigste Wassermenge kann durch ein Kühlwasserregulierventil eingestellt werden, das die Wassermenge in Abhängigkeit des Verflüssigungsdrucks regelt.

Aufgrund von verschmutztem Wasser oder einfach aufgrund der Verkalkung der Verflüssigerrohre, sollte zumindest einmal im Jahr eine Reinigung erfolgen. (Bei der Auslegung wird ein sog. Verschmutzungsfaktor berücksichtigt)

Rohrschlangen-Verflüssiger

In diesem Verflüssiger fließt das Kühlwasser innerhalb der Rohre, während der vom Verdichter kommende überhitzte Kältemitteldampf in den Behälter eintritt und beim Kontakt mit den Rohren kondensiert. Am Boden des Behälters befindet sich die Auffangschale. Derzeit werden sie vor allem bei anschlussfertigen Klimageräten eingesetzt.

Bündelrohr - Verflüssiger

Dieser Verflüssiger besteht aus einem zylindrischen Mantel, im Inneren zirkuliert das Verflüssigerkühlwasser in Rohren. Der Kältemitteldampf füllt den Raum zwischen den Rohren und dem Mantel, kondensiert und wird am Boden des Mantels aufgefangen und fließt direkt zum Expansionsventil. Sein Vorteil liegt in der kompakten Bauweise, der leichten Reinigung und dem guten Wärmeübergang durch gerillte Rohre.

Der Gegenstrom – Doppelrohrverflüssiger

Der Doppelrohrverflüssiger besteht aus zwei Rohren. Im inneren Kupferrohr fließt das Kühlwasser, während im äußeren Stahlrohr das Kältemittel im Gegenstrom zum Kühlwasser zirkuliert. Das Außenrohr kann durch die Umgebungsluft zusätzlich mitgekühlt werden.

Kühlwasser-Rückkühler (Kühltürme)

Kühltürme ermöglichen es, den Wasserverbrauch für wassergekühlte Verflüssiger, um bis zu 95% zu reduzieren. Das vom Verflüssiger kommende Wasser wird zum oberen Teil des Kühlturms gepumpt und verrieselt bzw. versprüht. Ein kleiner Prozentsatz des Wassers verdunstet und entzieht dabei dem übrigen Wasser die Wärme, die Luft nimmt den Wasserdampf auf. Am Boden des Kühlturms wird das Wasser gesammelt und wieder zum

Verflüssiger gepumpt. Während Kühltürme mit statischer Belüftung nur für sehr große Kälteleistungen zu finden sind, unterscheidet man bei den zwangsbelüfteten solche die axial- oder radial belüftet werden.

Klarerweise sollte ein Kühlturm nur dort aufgestellt werden, wo:

- Genügend freier Raum zur Luftzirkulation vorhanden ist;
- Die austretende Luft keine Kondensation auf anderen Flächen verursacht;
- kein Warmluftstrom oder stark verschmutzte Luft vorhanden ist;

Der Stromverbrauch für Pumpen und Lüfter (Ventilatoren) stellen bei dieser Technologie den überwiegenden Teil des Energieverbrauchs dar. Die Ventilatoren zur Regelung des Luftstroms im Kühlturm könnten in Abhängigkeit der erforderlichen Kälteleistung durch polumschaltbare Elektromotoren, Ein- Ausschaltregelung oder Frequenzumrichter geregelt werden.

Im Falle einer gewünschten Teilkälteleistung oder einer niedrigeren Temperatur kann der Kühlwassereintrittstemperatur auch erhöht werden, indem durch Bypass der aus dem Verflüssiger kommende Wasserstrom wieder in den Verflüssiger zurückströmt.

Verdunstungs-Verflüssiger

Bei Verdunstungs-Verflüssigern werden die Verflüssigerrohrschlangen (Lamellen) zusätzlich zur Kühlung mit Luft mit Wasser besprüht. Dabei verdampft es und entzieht so dem Kältemittel die Wärme. Dieser Verflüssiger ist also eine Kombination von luftgekühltem Verflüssiger und Kühlturm. Die Frischluft wird im Gegenstrom zu versprühten Wasser von unten angesaugt, erwärmt, gesättigt und strömt ab. Am Austritt ist ein Tröpfchenabscheider angebracht, der das Mitreißen von Wassertröpfchen verhindert. Die Druckdifferenz wird mittels Radiallüfter überwunden. Die Steuerung erfolgt über ein Schwimmerventil, welches eine genau eingestellte Wasserhöhe in der Sammelwanne einhält. Für die Aufstellung im Freien und im Winterbetrieb sind besondere Vorkehrungen zu treffen. Besonders im Winterbetrieb fällt die Leistung auf 50%, was allerdings aufgrund der geringeren erforderliche Leistung nicht immer zu Problemen führen muss.

Bei Verdunstungs - Verflüssigern reduziert sich die zu pumpende Wassermenge auf die versprühte Menge. Die benötigte Antriebsleistung ist daher gegenüber Kühltürmen gleicher Leistung geringer. Die Antriebsleistung für die Ventilatoren ist für die beiden Anwendungen ähnlich. Der Verdunstungs-Verflüssiger sollte so nahe wie möglich am Verdichter stehen, um lange Wege des Kältemittels zu vermeiden.

Eine Regelung des Verflüssigungsdruckes kann erfolgen durch:

Ein- Ausschalten der Lüfter: Sinkt der Verflüssigungsdruck unter den eingestellten Soll-Wert, wird der Lüfter ausgeschaltet. Die Pumpen für den Wasserstrom bleiben in Betrieb.

Modulierende Klappen: Diese Klappen regeln den Luftstrom am Eintritt in den Verflüssiger in Abhängigkeit vom jeweiligen Verflüssigungsdruck.

Beim Umluftbetrieb wird der austretende Luftstrom rückgeführt oder mit dem eintretenden Luftstrom gemischt, dadurch erhöht sich die Feuchtkugeltemperatur.

Energieeffizienzkriterien Verflüssiger

- Alle Arten von Verflüssigern haben einen relevanten Energieverbrauch, der berücksichtigt werden muss: Ventilatoren bei luftgekühlten Verflüssigern, Pumpen bei wassergekühlten Verflüssigern oder beides bei Verdunstungs-Verflüssigern.
- Je größer die Verflüssiger-Oberfläche, desto näher die Verflüssigungstemperatur an der Kühlmediumtemperatur; diese niedrigere Temperatur führt zu höherer Effizienz (pro K rund 1-2% Energieeinsparung)
- Der Wärmeaustausch an der Verflüssiger-Oberfläche muss ungehindert erfolgen: Luftgekühlte Anlagen sollen daher frei von Schmutz sein; Rohre im Wasserkühler frei von Korrosion und Ablagerungen (Kühlwasser muss daher oft behandelt werden)
- Luft und nichtkondensierbare Bestandteile im Kältemittel verringern die Wärmeübertragung. Gute Installationen können dies vermeiden. Systeme mit Saugdrücken unter dem Umgebungsdruck müssen regelmäßig, am besten automatisch entlüftet werden.
- Um die Kondensationstemperatur an die Umgebungstemperatur anzupassen (Nacht, Winter), sollten entsprechende Regelungsmechanismen (z.B. elektronische Expansionsventile) eingesetzt werden. Diese verhindern Probleme mit starken Druckschwankungen im System, die bei einigen Expansionsventilen auftreten könnten.
- Weitere Regelungsmöglichkeiten wie drehzahlgeregelte Ventilatoren oder stufenweise Abschaltung von Ventilatoren sollen genutzt werden.



FAUSTREGEL: Die Temperaturdifferenz zwischen dem Kühlmittel und der Luft durch den Kondensator sollte nicht mehr als 15 K betragen.

Entspannungsventile

Im Expansionsventil wird das flüssige Kältemittel aus dem Verflüssiger bzw. dem Flüssigkeitssammler von hohem Druck und hoher Temperatur auf niederen Druck und niedere Temperatur (Verdampfungsdruck und -temperatur) für den Verdampfer entspannt. Ein Teil des Kältemittels verdampft bereits und kühlt dabei das restliche Kältemittel ab. Durch die Absenkung des Drucks des Kältemittels wird auch die Siedetemperatur herabgesetzt. Es kann dann bei einer niedrigen Temperatur erneut verdampft werden.

Dem Kühler muss je nach Betriebszustand der Kältemittelstrom zu Verfügung gestellt werden, der für die Verdampfung erforderlich ist:

Eine große Arbeitsüberhitzung im Kühler bedeutet einen reduzierten Kältemittelstrom durch den Kühler und damit eine schlechte Ausnutzung der Kühlerfläche, damit eine tiefere Verdampfungstemperatur und kleinere Kältezahl.

Eine kleine Arbeitsüberhitzung bedeutet hohen Kältemittelstrom, gute Ausnutzung der Kühlerfläche, damit eine höhere Verdampfungstemperatur und höhere Kältezahl.

Eine Überhitzung von 0 K ist allerdings nicht möglich, da die Trennung zwischen überhitztem und gesättigtem Saugdampf nicht übergangslos verläuft. Ist der Kältemittelstrom durch den Kühler höher als erforderlich, gelangt flüssiges Kältemittel zum Kältemittelverdichter. Der Nutzkältegewinn nimmt ab und muss durch eine längere Betriebszeit ausgeglichen werden. Die Kältezahl sinkt, trotz steigender Verdampfungstemperatur.

Handexpansionsventil

Das handgesteuertes Expansionsventil wird in großen Systemen mit konstanter Last verwendet. Bei Laständerungen muss es nachgestellt werden.

Niederdruck-Schwimmerventil

Der Niederdruck Schwimmer befindet sich auf der Niederdruckseite des Systems, also direkt im überfluteten Verdampfer oder in der Nähe. Der Flüssigkeitsstand in der Schwimmerkammer ist mit jenem im Verdampfer verbunden. Steigt die Last am Verdampfer, wird mehr Kältemittel verdampft der Flüssigkeitsspiegel fällt. Der fallende Schwimmer öffnet das Ventil und mehr Flüssigkeit gelangt in den Verdampfer.

Hochdruck-Schwimmerventil

Dieses Drosselorgan wird für Kälteanlagen mit nur einem Verflüssiger und Verdampfer eingesetzt und befindet sich auf der Hochdruckseite des Systems nach dem Verflüssiger. Bei steigendem Flüssigkeitsspiegel öffnet das Ventil. Es wird bei kritischer Kältemittelfüllmenge verwendet, d.h. die Kältemittelmasse muss genau abgestimmt werden.

Automatisches Expansionsventil

Ein automatisches arbeitendes Expansionsventil kann nur in Kälteanlagen mit einem gleich bleibenden Wärmestrom zum Luftkühler verwendet werden, bei denen die Wirtschaftlichkeit eine geringe Rolle spielt. Anwendung für kleine Wasser- oder Milchkühler. Das Ventil kann den

Verdampfungsdruck und damit die Temperatur bei sich ändernden äußeren Betriebsbedingung der Kälteanlage selbsttätig regeln.

Konstantdruck-Expansionsventil

Dieses Ventil hält den Verdampfungsdruck und damit die –temperatur konstant, egal wie die Temperaturverhältnisse an der Kühlstelle sind. Ein Teil der Verdampferoberfläche wird im Fall von einer Unterfüllung mit Kältemittel nicht für eine Wärmeübertragung genutzt. Es eignet sich hauptsächlich für kleinere Kühlanlagen mit ausgeglichenem Lastprofil.

Thermostatisches Expansionsventil

Das TEV (thermostatische Expansionsventil) wird am häufigsten genutzt. Es reguliert eine einzustellende Temperaturdifferenz zwischen Verdampferanfang und –ende (Überhitzung). Es sorgt dafür, dass genauso viel Kältemittel zugeführt wird, wie auch verdampft werden kann. Die Temperaturdifferenz bleibt konstant, wobei sich die Verdampfungstemperatur mit der Kühlstellentemperatur ändert. Die gesamte Oberfläche des Verdampfers wird zur Wärmeübertragung ausgenutzt. Für Verdampfer innerhalb derer der Druckabfall groß ist (lange Schlangen) ist dieses Ventil ungeeignet.

Bei Anlagen mit Verdampfern mit sich stark ändernden Druckabfall innerhalb des Verdampfers, bei Anlagen mit parallelen Verdichtern am selben Verdampfer oder mit mehreren parallel geschalteten Verdampfern sind thermostatische Expansionsventile mit äußerem Druckausgleich zu verwenden.

Elektronisches Expansionsventil

Das vom elektronischen Temperatursensor kommende Signal wird zur Öffnung und Schließung der Ausflussöffnung genutzt. Sie sind zwar teurer als konventionelle Ventile, zahlen sich aber für größere Systeme aus. Damit kann die Überhitzung genauer eingestellt werden und über einen größeren Bereich von Kondensations- und Verdampfungsdrücken geregelt werden.

Kapillardrosselrohr

Die Kapillare (Kapillardrosselrohr) stellt durch Durchmesser- und Längenvariation das gewünschte Druckverhältnis und die gewünschte Durchströmmenge ein. Diese Rohre sind einfach und betriebssicher, allerdings nur für einen bestimmten Anwendungsbereich berechnet. Sie werden eher für kleinere Leistungen und konstante Betriebsverhältnisse eingestellt bzw. finden sich in Verbindung mit anderen Drosselorganen. (Haushalts-, Gewerbekühlschränke, kleinere Kühlteile)

Energieeffizienzkriterien Expansionsventil

- Bei thermostatischen Expansionsventilen hat die Regelung der Überhitzungstemperatur einen bedeutenden Effekt auf die Effizienz und Zuverlässigkeit: bei zu geringer Überhitzung kann flüssiges Kältemittel in den Verdichter gelangen und Ausfälle verursachen; bei zu hoher Überhitzung (5 K) sinkt die Effizienz.
- Bei variierenden Druckdifferenzen, z.B. auch in Folge der Angleichung an niedrigere Umgebungstemperaturen, sind Schwimmerventile , TEVs mit äußeren Druckausgleich oder elektronische Expansionsventile besser zu verwenden.



- Hochdruck-Schwimmerventile haben den Vorteil, dass es bei Anlagenstopp zu einem Druckausgleich über das Entlüftungsrohr kommt und daher der Kompressor beim Start weniger Energie aufnimmt.

Verdampfer

Der Verdampfer hat die Aufgabe, das flüssig eingespritzte Kältemittel durch Aufnahme der Wärme im zu kühlenden Bereich zu verdampfen. In jeder Kälteanlage muss die Leistung des Verdampfers bei der geplanten Verdampfungstemperatur gleich groß sein, wie die Leistung der Kältemaschine. Der Verdampfer muss sämtliche Wärmeströme, wie Sonneneinstrahlung, Wärmeströme von Beleuchtung, Personen, Kühlgütern, Lüfterneuerungen usw. aufnehmen.

Im Verdampfer wird das flüssige Kältemittel also zunächst bei konstanter (Verdampfungs-) Temperatur verdampft. Erst wenn die gesamte Flüssigkeitsmenge verdampft ist, steigt die Temperatur in der sog. Überhitzungszone. Diese ist notwendig, damit keinerlei Flüssigkeit zurück zum Kompressor gelangen kann. Die Überhitzung ist aber keine sehr effiziente Weise, Wärme aufzunehmen (sensible Wärme), daher sollte diese Überhitzung nicht mehr als 5 K über der Verdampfungstemperatur liegen.

Entscheidend für die Leistung eines Verdampfers sind:

- die Verdampferoberfläche, also die Summe aller Außenflächen in m² (bei Lamellen und Plattenverdampfer zählen beide Seiten)
- der k-Wert (wie viel Wärme in W/m² Oberfläche wird aufgenommen, wenn Verdampfungstemperatur 1 K unter der Umgebungstemperatur liegt); dieser Wert hängt allerdings wiederum von der Verdampfungstemperatur und z.B. der Geschwindigkeit des vorbeiströmenden Mediums ab (Vereisung!), Flüssigkeiten haben ebenfalls eine höheren Wärmeübergang;
- Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfungstemperatur und Umgebungstemperatur des Verdampfers ist, umso größer ist seine Leistung.

$$Q_0 = A \cdot k \cdot (T_a - T_i) \text{ [W]}$$

Q Verdampferleistung

A Verdampferfläche

T_i Verdampfungstemperatur [K]

T_a Kühlstellentemperatur [K]

Je kleiner der Verdampfer wird, desto größer muss die Temperaturdifferenz werden, um die gewünschte Leistung zu erzielen. Bei größeren Oberflächen kann die Temperaturdifferenz geringer sein.

Unterschieden wird zwischen Luftkühler, Flüssigkeitskühler oder Berieselungskühlern. Diese Kühler können dann entweder das Kühlmittel direkt über die Verdampfung des Kältemittels kühlen (direkte Verdampfung) oder durch Zwischenschaltung eines weiteren Kühlmittels das Kühlmittel indirekt kühlen (indirekte Verdampfung).

Glattrohr-Verdampfer

Bei einem Glattrohr-Verdampfer wird das Kältemittel in ein System aus glatten Kupferrohren eingespritzt, wo es verdampft und die umgebende Luft oder Flüssigkeiten damit abkühlt. Sie sollen den Wärmeaustausch maximieren, das Öl zum Kompressor rückführen und einen möglichst geringen Druckverlust erzeugen. Durch Kontrolle des Kältemittelstroms durch den

Verflüssiger stellt das Expansionsventil die maximale Überhitzung und damit den maximalen Kühleffekt sicher, bei gleichzeitigem Schutz des Kompressors vor rückfließendem flüssigem Kältemittel.

Rohr-Verdampfer können in Flüssigkeiten (Milchkühler, Speiseeis, Bierkühlung, usw.) oder zur Luftkühlung von Kühlräumen eingesetzt werden.

Beim **Lamellen-Verdampfer** sind auf den Rohrbündeln Metalllamellen aufgezogen um den Wärmeübertragung durch eine größere Oberfläche zu erleichtern. Der notwendige Lamellenabstand hängt von der Gefahr der Reifbildung ab. Bei Klimaverdampfer (15°C) kann er 3,5 mm betragen, in Kühlräumen (0°C) soll er 10 mm, bei Tiefkühlanwendungen noch größer sein. Kälteanlagen, die bei Verdampfungstemperaturen unter 0°C arbeiten, müssen von Zeit zu Zeit abgetaut werden. Je öfter dies erfolgt, desto enger kann der Abstand sein. (siehe Informationen zum Abtauen)

Platten-Verdampfer bestehen aus zwei verbundenen Blechplatten, der Kanal bildet sich durch Ausprägungen in beiden Platten. Sie können sowohl als überflutete oder Trocken-Verdampfer eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch geringen Platzbedarf aus.

Plattenverdampfer für Flüssigkeitskühlung werden besonders in der Industrie (Chemie, Kältetechnik, Nahrungsmittelindustrie) eingesetzt. Ihre Vorteile liegen ebenfalls im geringen Platzbedarf, hohe Wärmeübertragungskoeffizienten, geringere Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und Kältemittel, geringe Kältemittelfüllmasse, geringe Verschmutzungsanfälligkeit, geringe Korrosionsanfälligkeit und einfache Wartung. Außerdem eignet sich diese Bauform gut für Baukastensysteme.

Rohrbündel-Verdampfer

Innerhalb eines Mantels strömt das Kältemittel, über das Expansionsventil geregelt, durch ein Bündel von Rohren. Die zu kühlende Flüssigkeit strömt innerhalb des Mantels um die Rohre. (Verdampferleistung ab 13 kW). Die Geschwindigkeit des Kühlmittelstroms sollte zwischen 1,5 m/s und 2,5 m/s liegen.

Überflutete Verdampfer

Von Trocken-Verdampfern spricht man, wenn nur so viel Kältemittel dem Verdampfer zugeführt wird, wie auch verdampfen kann. Flüssiges Kältemittel befindet sich daher nicht im Verdampfer. In überfluteten Verdampfer fließt das Kältemittel in flüssiger Form. Die Wärmeübertragung ist, da sie durch ein flüssiges Medium erfolgt besser, es ist auch keine Überhitzung zum Schutz des Kompressors vor Flüssigkeit notwendig.

Beim **Berieselungsverdampfer** werden die Rohrreihen im Innenraum eines Mantels mit Sprühdüsen berieselt. Allerdings fließen in den Innenrohren das Kühlmittel, während die Verdampfung des Kältemittels im Mantel stattfindet. Das Kältemittel findet sich also nur als dünner Flüssigkeitsfilm auf den Rohren, dadurch wird die Füllmasse sehr niedrig gehalten. Dennoch wird ein Vielfaches der verdampfenden Kältemittelmasse versprüht, was zu einer gleichmäßigen Kühlung der Rohre führt, im Vorratsbehälter wird das flüssige Kältemittel gesammelt.

Anordnung der Luftkühler

Luftkühler für sog. stille Kühlung (also ohne Ventilatoren) sollten möglichst an der Decke des Kühlraums montiert werden. (Abstand von der Decke Kühlerbreite in mm/4) Warum? Weil der relativ warme Luftstrom sich an der kalten Kühlerfläche abkühlt und dann nach unten fällt. Durch diese natürliche Umwälzung ist keine Zwangsbelüftung erforderlich. Aufgrund der Raumgeometrie kann es vorkommen, dass nicht alle Bereiche ausreichend gekühlt werden. Zur Vermeidung von sog. Wirbelzonen, die nicht den ganzen Raum erreichen, kann es sinnvoll sein, den Kühler senkrecht an die Wand zu hängen und für die Umwälzung mit Leitblechen zu sorgen. Bei größeren Temperaturdifferenzen zu anderen Wänden, entstehen an der Wand Wirbel, was sich ungünstig auf die Wärmezirkulation innerhalb des Raums auswirkt. Hier sind die Kühler an der „kalten Wand“ anzubringen.

Vorteile für stille Kühlung sind:

- Kein Energieverbrauch für Lüfter
- Wenig stör anfällige Teile
- Abtauung nur selten erforderlich
- Kein Luftstrom für Bedienungspersonal

Nachteil: Enteisung per Hand, große Flächen notwendig

Zwangsbelüftete Kühler

Axiallüfter drücken oder saugen den Luftstrom durch die Kühlfläche. Diese werden insbesondere für große Blasweiten eingesetzt. Durch Unterschreitung des Taupunktes an der Kühlerfläche bildet sich Schwitzwasser, das durch Tropfwannen aufgefangen wird. Die Lamellenabstände der Kernrohre betragen ca. 4,5 bis 12 mm, sie müssen bei Verwendung als Kälteanlagen abgetaut werden. Kriterien für die Energieeffizienz sind die Verwendung hocheffizienter Motoren und effiziente Regelungsmöglichkeiten (z.B. Drehzahlregelung).

Ölabscheidung

Das Öl des Kompressors wird über das Kältemittel über das ganze System verteilt. Allerdings ist es notwendig, dass das Öl wieder zum Kompressor zurückkehrt, es kann jedoch auch in den Verdampfer gelangen. Um die optimale Effizienz zu erreichen, ist es wichtig, dass es zu keiner Anreicherung von Schmieröl und damit verbundener schlechterer Wärmeübertragung kommt. In Trocken-Verdampfern muss daher die Kältemittel-Geschwindigkeit hoch genug sein, um das Öl durch die Rohre zu befördern. Bei gefluteten Verdampfern muss das Öl je nach Kältemittel entfernt werden.

Energieeffizienzkriterien Verdampfer

- Die Verdampfungstemperatur muss so hoch wie möglich sein, dies kann z.B. durch eine große Verdampferfläche erfolgen.
- In Luftkühlern muss der Kühlblock frei von Schmutz gehalten und regelmäßig abgetaut werden.
- Die Rohre im Rohrbündelverdampfer müssen ebenfalls regelmäßig gesäubert werden um Korrosion zu vermeiden, gegebenenfalls muss das Wasser behandelt werden (Abwassergrenzwerte beachten!)

- Ein ausreichender Kühlmedienstrom muss immer vorhanden sein, Ventilatoren oder Pumpen müssen in Betrieb sein.
- Öl muss entsprechend aus dem Verdampfer entfernt werden.
- Die Regelung der Kältemittelmenge durch den Verdampfer muss so erfolgen, dass nur eine minimale Überhitzung und damit maximale Effizienz gewährleistet ist.



FAUSTREGEL: Die Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittel und dem zu kühlenden Medium sollte zwischen 3 und 7 K betragen. 1 K geringere Temperaturdifferenz bringt ca. 3% Energieeinsparung!

Kältemittel

Grundsätzlich kann man unterscheiden zwischen

HFKW	teilfluorierter Kohlenwasserstoff, enthält Fluor-, Kohlenstoff- und Wasserstoffatome; R 134a
HFCKW	teihalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff; enthält eines oder mehrere Wasserstoffatome; R22
FKW	Fluorkohlenwasserstoff, enthält außer Kohlenstoff nur noch Fluor; z.B. R14
FCKW	vollhalogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff, enthält keinen Wasserstoff; R12
KW	Kohlenwasserstoffe; brennbar

Bezeichnung

Kältemittel werden mit R für Refrigerant bezeichnet:

R XYZ

X: plus 1 ist Zahl der Kohlenstoffatome

Y: minus 1 ist Zahl der Wasserstoffatome

Z: Zahl der Fluoratome

Der Kleinbuchstabe bezeichnet die Verteilung des Molekulargewichts zwischen den Kohlenstoffatomen

zB: R134a: 2 Kohlenstoffatome, 2 Wasserstoffatome, 4 Fluoratome

Aktuell wichtige Kriterien für die Auswahl sind:

- Verbote durch Gesetze
- Kältemittelkosten
- Brennbarkeit und Giftigkeit
- Dampfdruckverlauf
- Mischbarkeit mit Schmieröl
- Auswirkungen auf die Effizienz der Anlage

Hinsichtlich des Druckniveaus unterscheidet man Niederdruck- (R227), Mitteldruck- (R 134a) und Hochdruck-Kältemittel (R404A, R410A).

Kenndaten

Kältemittel	Stoffklasse	Ozonabbau- potential R11=1	Treibhauspotenzial (GWP 100a) CO2=1	Siedepunkt [°C]
R22	HFCKW	0,055	1700	-40,8
R 134a	HFKW	0	1300	- 26,2
R 404A	HFKW	0	3800	-46,4
R 407 C	HFKW	0	1600	-44
R 410 A	HFKW	0	1600	-51,5
R 290	KW Propan	0	3	-42
R 717	Ammoniak anorganisch	0	0	-33,5

R22

Dieses Kältemittel wurde Jahrzehnte in der Kälte- und Klimatechnik eingesetzt, es war auch die Hauptalternative für den Ersatz der FCKWs. Auch die Gemische für den Ersatz von R 12 und R502 enthielten R22. Aufgrund der Anwendungsverbote ist dieses nur noch für den Altanlagenbestand für Servicezwecke interessant.

R134a

Ist ein guter R22 Ersatz, insbesondere im Normalkühl- und Klimabereich. Die Kälteleistung ist vergleichbar mit R12 bei sehr günstigen Leistungszahlen. Im Falle von Kolben- und Schrauben-Verdichtern ist allerdings ein größeres Fördervolumen von ca. 30-40% nötig! Es sind geeignete Kältemittelverdichter mit spezieller Schmierölfüllung erforderlich. Ebenso müssen Rohrdurchmesser im Verdampfer und Arbeitsventile im Verdichter aufgrund der Dichte des Kältemitteldampfes und der damit einhergehenden Druckdifferenzen größer als für andere Kältemittel sein.

R404A

Das Kältemittel ist für Tiefkühltemperaturanwendungen und Gewerbekälte geeignet und kann einen weiten Bereich von Verdampfungstemperaturen abdecken. Das Treibhauspotenzial ist allerdings recht hoch.

R407C

Dieses Kältemittel ist ein guter Ersatz für R22 bei ähnlichen Auslegungskriterien. Allerdings handelt es sich um ein sog. zeotropes Gemisch. Das heisst: einzelne Stoffe dieses Gemisches verdampfen bzw. verflüssigen bei unterschiedlichen Temperaturen. Der Wärmeübergang im Verdampfer oder Verflüssiger ist daher schlechter. Bei trockener Verdampfung in luftgekühlten Lamellenwärmetauschern ist dies jedoch nicht relevant. Bei Leckagen verflüchtigen die Stoffe unterschiedlich stark, was wiederum Auswirkungen auf die Leistungszahl des Kompressors hat.

R410A

Dieses Kältemittel hat ein sehr weites Anwendungsfeld von Klimaanlage bis zu gewerblichen Tieftemperaturanwendungen. Positiv sind die hohen Wärmeübertragungskoeffizienten in Verdampfer und Verflüssiger. Nachteilig ist der hohe notwendige Verflüssigungsdruck von 25 bar bei einer Verflüssigungstemperatur von 41°C.

Ammoniak

Ammoniak ist preisgünstig und energetisch vorteilhaft und schwer brennbar. Üblicherweise wird es mit überfluteter Verdampfung eingesetzt, mischbare Öle sind noch nicht entwickelt. Während Ammoniak in großen Kälteanlagen in der Industrie eingesetzt werden kann, findet es in kleinen Anwendungen aber auch in Supermärkten keine Anwendung. Die Verwendung mit Buntmetallen (Kupfer) ist nicht möglich.

Energieeffizienzkriterien Kältemittel

- Die Art des Kältemittels kann die Gesamteffizienz des Systems um bis zu 10% verändern!
- Die Auswirkung des Kältemittels auf die Effizienz hängt vom Kompressor und den Betriebsbedingungen ab.

- Die Menge des Kältemittels ist für die Effizienz entscheidend, sowohl zu viel als auch zu wenig Kältemittel wirken sich ungünstig aus.
- Leckagen und damit zu wenig Kältemittel führt zu einer Überhitzung im Verdampfer, was den Saugdruck verringert und damit die notwendige Druckerhöhung steigert.
- Bei Lufteinschlüssen im Kältemittel verringert sich auch die Leistung.

Gesetzliche Vorschriften

Die Verwendung teilhalogenerter FCKW, also HFCKW, z.B. R 22, als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlageanlagen in Neuanlagen ist seit dem 1. Jänner 2001 (mit zusätzlicher Differenzierung und Fristen) verboten. Ab 2010 ist weiters ein Verwendungsverbot zur Instandhaltung und Wartung existierender Kälte- und Klimaanlageanlagen, ab 2015 ein totales Verbot aller H-FCKW festgelegt. (Verordnung (EG) Nr. 2037/2000, HFCKW-Verordnung, BGBl. Nr. 750/1995). Darüber hinaus müssen ortsfeste Einrichtungen, die mehr als 3 kg Kältemittel (FCKW, HFCKW) enthalten, jährlich auf Undichtigkeiten überprüft werden.

Für HFCKW sind für ortsfeste Anlagen bei einer Kältemittelfüllmenge größer 3 kg jährliche Dichtheitskontrollen durchzuführen (> 30 kg -> ½ jährl.; >300 kg -> ¼ jährl.).

Gemäß §22 der Kälteanlagenverordnung müssen Kälteanlagen jährlich einer Überprüfung hinsichtlich ihrer Betriebssicherheit unterzogen werden. Ferner ist für jede Kühlanlage über 1,5kg Füllgewicht ein Prüfbuch zu führen, in dem der Zeitpunkt jeder Überprüfung eingetragen sein muss. (§23)

Novellierung Industriegasverordnung (Juni 2007),

Änderungen mit Beginn 2008 in Kraft:

Maximale Füllmengen für Neuanlagen:

Einzelanlagen: Füllmengenbegrenzung < 20kg

Ortsfeste Anlagen mit verzweigten Rohrleitungssystemen (keine Einzelanlagen und keine Kompaktanlagen):

- Maximale Kältemittelfüllmenge < 100 kg.
- Kältemittelfüllmenge > 100 kg
 - Max. Kältemittelfüllmenge ≤ 1,5 kg je kW Kälteleistung bezogen auf bestimmte Randbedingungen

Kompaktanlagen (z.B.: Kaltwassersätze), welche keine Einzelanlagen und keine ortsfesten Anlagen mit verzweigten Rohrleitungssysteme sind:

- Max. Kältemittelfüllmenge ≤ 0,5kg je kW Kälteleistung bezogen auf gegebene Randbedingungen

Die Regelungen zur Wartung und Instandhaltung sehen vor, dass die Verwendung von vollfluorierten oder teilfluorierten Kohlenwasserstoffen als Kältemittel zur Instandhaltung und Wartung weiterhin zulässig ist, wenn die Geräte und Anlagen mit diesen Stoffen bereits befüllt und in Betrieb sind, ein Umbau dieser Geräte und Anlagen zur Verwendung anderer Kältemittel technisch nicht möglich ist oder der damit verbundene Aufwand außer Verhältnis zur erzielbaren Gefahrenminderung steht. (stammt noch aus alter Verordnung)

Verteilnetz

Für eine Kälteanlage sind folgende Rohrleitungsabschnitte notwendig:

- Die Saugleitung führt den unter Verdampfungsdruck stehenden Kältemitteldampf (Saugdampf) vom Verdampfer zum Verdichter.
- Die Druckleitung führt den überhitzten unter Verflüssigungsdruck stehenden Kältemitteldampf (Heißdampf) vom Verdichter zum Verflüssiger.
- Die Flüssigkeitsleitung führt das unter Verflüssigungsdruck stehende flüssige Kältemittel zum Drosselorgan.
- Weiters gibt es noch die Möglichkeit einer Kondensatleitung: Kondensat fließt darin aus dem Verflüssiger zum Flüssigkeitssammler während in umgekehrter Richtung Kältemitteldampf wieder zurückgeführt wird.

Kriterien für das Netz sind:

- Wahl des kürzesten Weges, gute Dämmung: dadurch geringe Gefahr von Undichtigkeiten, geringe Anlagen- und Betriebskosten;
- Dennoch Einbau von Biegungen und Schleifen zum Abdämpfen der Verdichtervibration;
- Kältemittelfluss ohne Druckabfall: keine großen Höhenunterschiede, Reibungen, Biegungen, Verengung, zu kleine Rohrdurchmesser vermeiden;
- Öl muss zur Verdichterkurbelwanne zurückgeführt werden, daher sollten Rohre etwas geneigt sein.
- Vermeidung von flüssigem Kältemittel oder Öl in Verdichterzylinder bei Stillständen;
- Regelmäßiges Entlüften zur Vermeidung von Luft- oder CO₂ Einschlüssen muss beachtet werden;

Insbesondere in der Niederdruckphase, bei Drücken unter dem Umgebungsdruck, tritt Luft in das System ein. Automatische Entlüftungskontrollen sind dazu erhältlich. Da das flüssige Kältemittel vor dem Expansionsventil so weit wie möglich unterkühlt werden sollte (um dann im Verdampfer die maximale Menge an Wärme aufnehmen zu können), darf diese Leitung nicht gedämmt und keinesfalls durch warme Räume oder in der Sonne geführt werden.

Auftrennung des Netzes

Lasten mit ähnlichen Anforderungen an den Verdampfungsdruck sollten über ein gemeinsames Netz mit dem Kompressor versorgt werden. Lasten, die einen sehr niedrigen Verdampfungsdruck benötigen (niedrigere Temperatur), sollten daher über ein eigenes Netz mit zusätzlichem Kompressor versorgt werden oder für einzelnen Lasten sog. Booster (Drucksteigerungsanlagen) einsetzen.

Bei zentralen Anlagen ist der Gesamtwirkungsgrad im Vergleich zu kleineren Anlagen günstiger. Dezentrale ermöglichen jedoch einen besseren Leistungsanpassung und eine reduzierte Rohrlänge.

Leckagenortung

Wenn der Betriebsdruck über dem Umgebungsdruck liegt kann die Tauchprobe durchgeführt werden: Dabei wird das für Leckagen verdächtige Bauteil mit getrocknetem Stickstoff unter Druck gesetzt und anschließend ins Wasser gelegt.



Beim Seifenblasentest wird eine stark konzentrierte Seifenlösung über die verdächtige Stelle gepinselt. Für halogenierte Kohlenwasserstoffe stehen elektronische Lecksuchgeräte zu Verfügung.

Filter

Für einen effizienten Betrieb muss das Kältemittel frei von Feuchtigkeit und Partikeln sein. Feuchtigkeit kann Vereisung des Expansionsventils verursachen. Dazu wird in der Flüssigkeitsleitung ein Filter eingesetzt. Diese Filter sind regelmäßig auszutauschen.

Abtauen

Wenn Luftkühler in Temperaturbereichen arbeiten, in denen sich Reif bildet, müssen diese regelmäßig abgetaut werden.

Nachlauf des Lüfters

Bei Kühlraumtemperaturen über 3°C wird einfach der Reif durch den Zuluftstrom der Lüfter bei abgeschalteter Kälteanlage abgetaut. Die Kälteanlage wird durch den Raumthermostat oder einen Niederdruckschalter ausgeschaltet; der Lüfter bleibt über ein Raumthermostat oder Druckschalter eingeschaltet bis der Kühlerblock abgetaut ist; bei steigender Temperatur schaltet sich zunächst die Kälteanlage ein, sobald der Kühler kalt genug ist auch der Lüfter.

Elektrische Heizstäbe

Bei Kühlraumtemperaturen unter 3°C ist eine zusätzliche Heizung in der Kühlerfläche erforderlich. Elektrische Heizstäbe übertragen die Wärme auf die Lamellen und in weiterer Folge auf den Reif. Aufgrund der schlechten Wärmeübertragung ist der Wirkungsgrad gering. Die Technologie ist dafür einfach und sicher im Betrieb. Bei Tiefkühlern muss auch beim Abfluss aus der Tropfwanne eine Heizung vorgesehen sein.

Der Lüfter muss nach dem Abtauvorgang mit einer Verzögerung eingeschaltet werden, damit der Kühlerblock kalt genug ist. Die Abtauerung ist aber nur einzuschalten, wenn auch der Bedarf vorhanden ist, also bereits eine dicke Reifschicht besteht. Mit modernen Regelgeräten werden bei richtiger Einstellung entsprechende Ergebnisse erzielt. Gut geeignet sind Mikroprozessoren, die auch die Temperatur im Kühlraum berücksichtigen. Eine Möglichkeit bietet eine Abtauschaltuhr mit thermischer Begrenzung (z. B. +10°C) und zeitlicher Begrenzung (z.B. Dauer der Abtauerung aufgrund von Betriebserfahrungen).

Abtauen durch Heiß- und Kaltdampf

Bei diesem Verfahren strömt Kältemitteldampf, direkt vom Kältemittelverdichter geförderte Dampf, in den abzutauenden Luftkühler. Dazu wird eine Heißdampfleitung und ein Magnetventil benötigt.

Abtauen durch warmes Wasser

Diese Abtaumethode findet sich bei großen Kälteleistungen. Eine händische oder automatische Regelung besprüht den Kühler mit warmen Wasser (z.B. aus anderen Prozessen), danach muss das Wasser aus dem Kühler und Rohrnetz entfernt sein, bevor sich die Kälteanlage wieder einschaltet.



Energieeffizienzkriterien Abtauung

- Abtauung nur wenn erforderlich, aufgrund abnehmender Kühlleistung (Zeitsteuerung daher nicht empfehlenswert)
- Anwendung der effizientesten Abtaumethode
- Abtauwärme muss über den gesamten Kühlblock gleichmäßig verteilt werden.
- Stoppen des Abtauprozesses, sobald der Kühlblock eisfrei ist.
- Minimierung der Aufnahme der Abtauwärme durch das zu kühlende Produkt oder Medium
- Minimierung der Reifbildung durch geringe Luftfeuchtigkeit und höhere Verdampfungstemperatur (Anforderung des Produkts hinsichtlich Austrocknung und Temperatur beachten!)

Weitere Effizienzmaßnahmen

Wärmerückgewinnung

Das kondensierende Kältemittel in einem Kältesystem ist wärmer als die Umgebungstemperatur. Die Wärmemenge, die im Kondensator abgegeben wird, ist die Summe der abzuführenden Wärme aus dem Kühlraum (Kälteenergie) und die Verdichtungsenergie, also der eingesetzten elektrischen Energie zum Antrieb des Kompressors.

Theoretisch kann es sinnvoll sein, eine etwas höhere Kondensationstemperatur in Kauf zu nehmen und damit die Effizienz des Kältesystems zu verschlechtern; dafür aber die größere Menge an Abwärme zu nutzen. Wichtig sind dabei die verfügbare und benötigte Energiemenge und Temperaturniveaus in Abhängigkeit des zeitlichen Anfalls.

Bei der Verwendung der Abwärme zur Brauchwasserbereitung, die ganzjährig anfällt, wird lediglich ein Wärmetauscher parallel oder in Serie zum Kondensator geschaltet. Temperaturniveaus von 25°C sind damit erreichbar.

Je höher das Druckverhältnis ist (Tiefkühlbereich) desto größer wird auch der Enthitzungsanteil des Kältemittels an der gesamten Verflüssigerleistung, umso interessanter damit für eine WRG. Bei Schraubenkompressoren fällt ein Teil der Verdichtungswärme (in Abhängigkeit des Kältemittels bis zu 40% der Motorleistung bzw. 15 % der der Kondensationswärme) bei der Ölkühlung an und ist damit zur WRG verfügbar. Mit dieser Überhitzungswärme des Kältemittels in einem eigenen Wärmeübertrager ist es dann möglich, Heißwasser bei 55 °C zu produzieren.

Kältebedarf

Energieeffizienzkriterien Kältebedarf

Wärmeeintrag reduzieren

- Einsatz von Maschinen in Kühlräumen hinterfragen, Abschaltung in Betriebspausen
- Pumpen, Antriebe möglichst außerhalb der Kühlräume
- Überprüfung, welche Zonen, welche Anforderungen an Kühlung stellen
- Energieeffiziente Beleuchtung verwenden
- Kühlräume vor Wärmeeintrag durch Dämmung oder Jalousien schützen
- Minimierung des Abtauwärmestroms
- Anordnung der Räume überprüfen

Luftwechsel minimieren

- Luftwechsel durch Schleußen oder Schnelllaufstore minimieren
- Luftwechsel auf notwendiges Minimum reduzieren, evt. über Drehzahlregelung
- Lüftungsanlage mit Kälterückgewinnung ausstatten

Kühlzellen

Energieeffizienzmaßnahmen Kühlzellen

- Eingebrachtes Produkt darf Luftstrom zu/vom Verdampfer nicht behindern
- Regelmäßige Kontrolle der Kühlraumtemperatur: Tiefkühlzellen mit -24°C statt -18°C benötigen ca. 30% mehr Energie
- Kondensatoren müssen regelmäßig gereinigt werden und bedürfen guter Luftzirkulation
- Prüfung der Möglichkeit zur Abwärmenutzung, z.B. für Vorwärmeboiler

Wärmeeintrag reduzieren

- Keine warme Speisen in Kühlzelle einbringen, Tiefkühlagerräume nicht zum Gefrieren verwenden; dadurch werden Temperaturschwankungen und erforderliche Leistung begrenzt und Energie gespart;
Energiebedarf Tiefkühlen, Auftauen: nur ca. 0,2 kWh/kg
- Türen und deren Dichtungen müssen in einwandfreiem Zustand sein
- Minimieren des Wärmeeintrags während geöffneter Tür, z.B. durch Streifen
- Abtauen: effiziente Abtaustrategie wählen (z.B. mit Zeitschaltuhr in Niedrigverbrauchsperiode, Abtauwasser in Ablauf statt verdunsten)
- Glühlampen mit Bewegungsmeldern oder Sparlampen, die außerhalb der Arbeitszeit ausgeschaltet werden
- Tiefkühlhäuser: effiziente Fördertechnik anwenden



FAUSTREGEL: Ein **Kühlraum** sollte einen ausgehenden Wärmestrom in W/m^2 (Wärmeverlust) von maximal **10 W/m^2** aufweisen. Die Berechnung erfolgt durch Bestimmung der Kühlleistung, die notwendig ist, um den Kühlraum auf der erforderlichen Temperatur zu halten. Dieser Wert ist durch die gesamte Fläche (Wände, Fußboden und Decke) in m^2 zu dividieren. Dies ist ein guter Indikator, um den Energieverbrauch des Raums zu bewerten. Die Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmmaterials sollte möglichst gering sein, typischerweise zwischen **0,016 und 0,023 W/mK** .

Kühlstellenregelung

Kühlstellenregelungen ermöglichen die Umsetzung vieler der angesprochenen Effizienzmaßnahmen: Regelung der Temperatur an der Kühlstelle in einem engen Temperaturband, die Regelung des Verdampferlüfters und die aktive Abtauung, aber auch Regelung des Expansionsventils.

In Kombination mit Verbundregelungen mit denen der Saug- und Verflüssigungsdruck optimiert und mehrere Verdichter gleichzeitig angesteuert werden, können Anlagen effizient betrieben werden.

Kältespeicher

Kältespeicher haben die Aufgabe, die Kälteerzeugung zeitlich vom Kälteverbrauch zu entkoppeln. Dadurch können Leistungsspitzen vermieden werden, Kälte wird auf Vorrat produziert und kann bei Bedarf mit sehr hohen Leistungen abgerufen werden. In Molkereien (Milch) oder Brauereien (Würz) werden an wenigen Stunden am Tag große Mengen abgekühlt. Klimazentralen benötigen vor allem Nachmittags hohe Leistungen.

Vorteile

- kleinere Kälteerzeugungsanlage (geringer Kosten)
- kleineres Kältemittelvolumen notwendig
- geringe elektrische Anschlusskosten
- geringerer Leistungspreis, evt. geringerer Arbeitspreis (Nachtstrom)
- Nachtbetrieb führt aufgrund geringerer Kondensationstemperatur zu höherer Effizienz und macht Speicherverluste teilweise wieder wett

Nachteile

- Zusätzliche Umwandlungs-, Speicherverluste
- Zusätzliche Pumpen, Ventile, Rohre
- Zusätzlicher Steuerungs-, Regelungsaufwand
- Kosten für Speicher und Platzbedarf

Die am weitesten verbreiteten Kältespeicher sind Eisspeicher. Man unterscheidet direkte Systeme, bei denen die Wärmeabfuhr direkt durch Verdampfung des Kältemittels geschieht und indirekte Systeme (z.B. Zwischenschaltung eines Glykolkreises).

Das am weitesten verbreitete System ist das Eisbausystem. Am Verdampfer in Plattenausführung wird an der Oberfläche Eis aufgebaut, das über Heißgas wieder abgesprengt wird. Im Eiswasserbecken oder -turm sammeln sich dann das Eis.

Grundsätzlich liegt der Vorteil eines Kältespeichers eher bei der Einsparung der Betriebskosten als des Energieverbrauchs.

Quellen und weitere Informationen unter:

Bonewille Power Administration: Industrial Audit Guidebook, a Guidebook for Performing Walk-through Energy Audits of Industrial Facilities
www.bpa.gov/energy/n/projects/industrial/pdf/audit_guide.pdf

Bitzer International: Kompetenz in Leistungsregelung, Dokument A-600-1

Breidenbach, Karl: Der Kälteanlagenbauer, Band 2 Kälteanwendung, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2004

Das Europäische Motor Challenge Programm, Modul Industrielle Kälte, Brüssel, 2006
 (<http://energyefficiency.jrc.cec.eu.int/motorchallenge>)

EUREM, Unterlagen Europäischer Energiemanager, Kältetechnik, Wirtschaftskammer Österreich

ETSU, for the Energy Efficiency Best Practice Programme: Energy efficient refrigeration technology – the fundamentals (GPG 280), 2000
www.cibse.org/pdfs/GPG280.pdf

Grundlagen der Kältetechnik, Skriptum, ENERTEC (o.Jg)

Perincioli, L., Dott, Ralf; Energieplattform für die Hotellerie, Standardmaßnahmen Kühlung / gewerbliche Kälte, 2004

Veith, Heinz: Grundkurs der Kältetechnik, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2004

www.benndorf-ralf.de/fckwalte.htm

www.bayern.de/lfu/luft/veroeffentlich/umweltforsch/energieleitfaden/lebensmittel.pdf

www.energie.ch/themen/industrie/infel/kaelteanlagen.htm