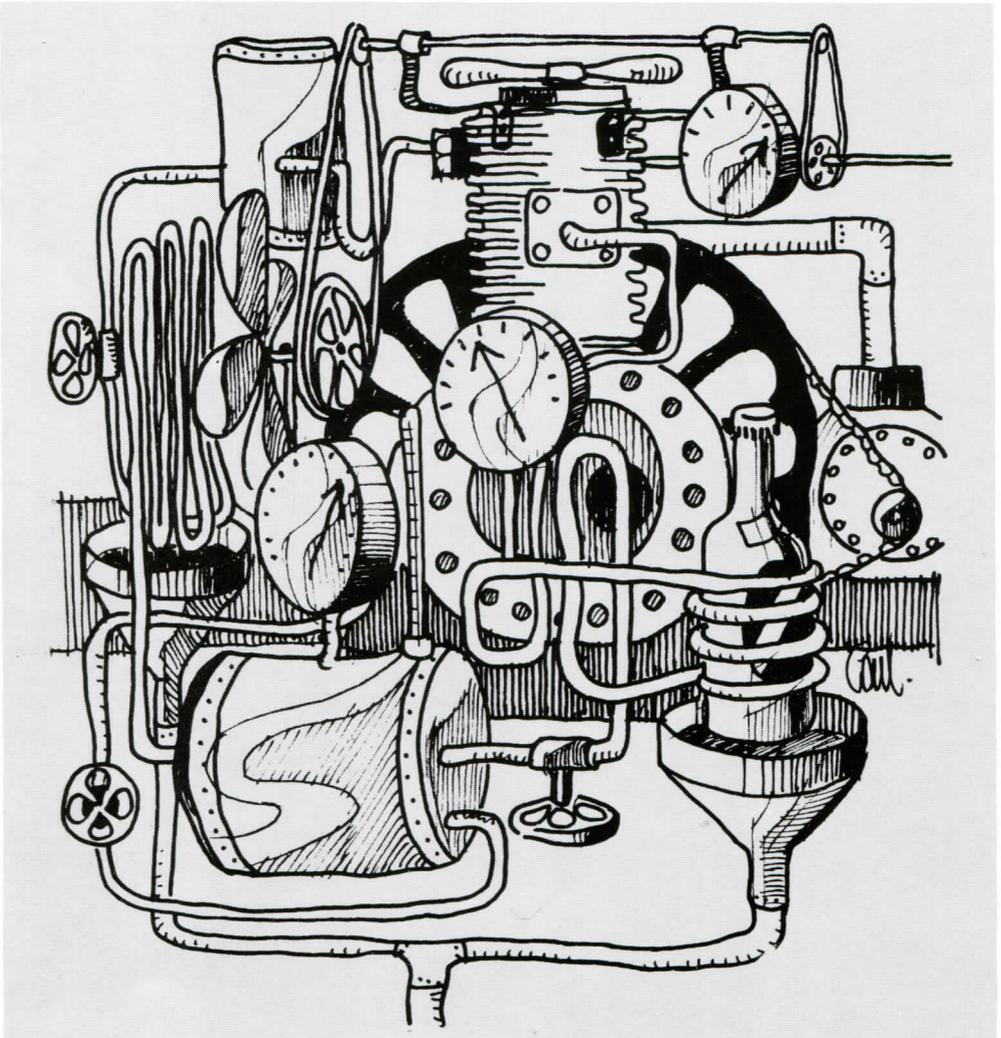




Einführung in die Grundlagen der Kälte

Literaturarchiv des HKK
Historische Kälte- und Klimatechnik e.V.
Website: www.vhkk.org



Einführung in die Grundlagen der Kälte

Einführung in die Grundlagen der Kälte

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorwort	5
1. Einleitung	6
2. Grundlegende Begriffe	8
2.1 Das SI-System	8
2.2 Druck	8
2.3 Wärme und Temperatur	10
2.4 Zustandsänderungen	11
2.5 Verdampfungswärme	12
2.6 Überhitzung	14
2.7 Der Verflüssigungsprozess	14
2.8 Das Temperatur-/Enthalpie-Diagramm	15
2.9 Das Druck-/Enthalpie-Diagramm	16
3. Der Kältekreislauf	17
3.1 Der Verdampfer	17
3.2 Der Verdichter	17
3.3 Der Verdichtungsprozess	18
3.4 Der Verflüssiger	19
3.5 Der Expansionsprozess	20
3.6 Hoch- und Niederdruckseite der Kälteanlage	20
4. Der Kälteprozess und das Druck-/Enthalpie-Diagramm	21
5. Kältemittel	23
5.1 Generelle Anforderungen	23
5.2 Fluorierte Kältemittel	23
5.3 Ammoniak, NH ₃	24
5.4 Sekundäre Kältemittel	24
6. Hauptkomponenten der Kälteanlage	25
6.1 Der Verdichter	25
6.2 Der Verflüssiger	26
6.3 Das Expansionsventil	29
6.4 Der Verdampfer	31
7. Der praktische Aufbau einer Kälteanlage	32

Vorwort

Das heute erhältliche und umfangreiche Schrifttum in puncto Kälte wendet sich vorwiegend an Leser mit einem professionellen Verhältnis zur Materie.

Dies sind namentlich die auf diesem Gebiet tätigen Ingenieure, Planer und Monteure.

Der Inhalt dieser Schrift zielt darauf ab, das Interesse jener Leserschaft zu gewinnen, die sich nicht täglich mit dem Stoff befasst, ihr Wissen in bezug auf dessen Grundlagen jedoch zu vertiefen wünscht.

Dadurch soll ein Verständnis für die Vorgänge in den im täglichen Leben anzutreffenden Kälteapplikationen geschaffen werden.

Bei der Zusammenstellung des Materials für diese Schrift wurde versucht, mit einfachen und verständlichen Worten eine gründliche Beschreibung der elementaren Prinzipien zu verfassen.

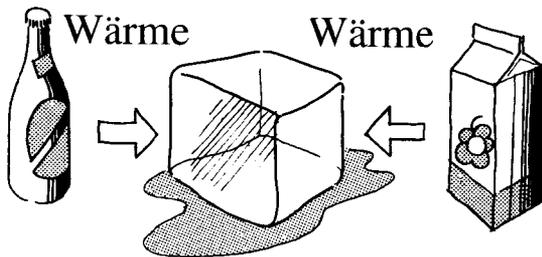
Danfoss, März 1992

Über die Kälte

1. Einleitung

Die Aufgabe einer Kälteanlage ist es, Waren und anderes Gut abzukühlen und bei einer Temperatur aufzubewahren, die tiefer ist als die der Umgebung. Kühlung kann definiert werden als ein Prozess, der Wärme entfernt.

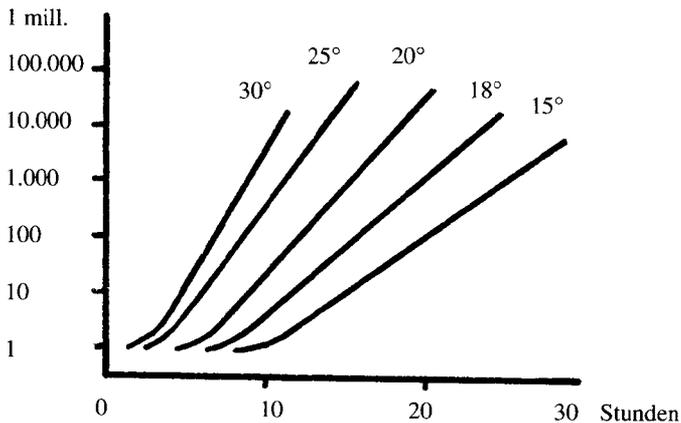
Die ältesten und bekanntesten unter den Kältemitteln sind Eis, Wasser und Luft. Anfänglich war das Konservieren von Nahrungsmitteln der einzige Zweck. Die Chinesen entdeckten als erste, dass Eis die Haltbarkeit von Getränken verlängern und ihren Geschmack verbessern konnte, und die Eskimos haben seit Jahrhunderten ihre Lebensmittel durch Gefrieren konserviert.



Anfang des vorigen Jahrhunderts waren Begriffe wie Bakterien, Hefe, Schimmel, Enzyme usw. schon bekannt. Man hatte die Temperaturabhängigkeit des Wachstums von Mikroorganismen entdeckt, d.h. dass die Wachstumsrate mit fallender Temperatur abnimmt und bei Temperaturen unter $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehr klein ist.

Als Folge dieses neuerworbenen Wissens wurde Kühlung eingesetzt, um Lebensmittel zu konservieren, wobei natürlich vorkommendes Eis für diesen Zweck angewendet wurde.

Bakterien-Population



Die ersten mechanischen Kältemaschinen zur Herstellung von Eis wurden um das Jahr 1860 produziert. Die ersten Ammoniakverdichter und die ersten isolierten Kühlräume wurden 1880 in den Vereinigten Staaten in Betrieb genommen.



Elektrizität gewann als Energieträger eine immer bedeutendere Rolle am Anfang dieses Jahrhunderts, und mechanisierte Kälteanlagen gehörten in gewissen Bereichen schon zur Standardausrüstung; z.B. in Brauereien, Schlachthäusern, in der Fischindustrie und bei der Eiszerzeugung.

Nach dem Zweiten Weltkrieg nahm die Entwicklung von kleinen, hermetischen Verdichtern ihren rasanten Lauf, und Kühl- und Gefrierschränke hielten ihren Einzug in den Haushalten. Heute sind diese Einrichtungen aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken.

Für Kälteanlagen gibt es unzählige Anwendungsbereiche. Beispiele sind :

- Konservieren von Lebensmitteln
- Prozesskühlung
- Klimatisierung
- Trocknungsanlagen
- Trinkwasseranlagen
- Kühlcontainer
- Wärmepumpen
- Eiszerzeugung
- Gefriertrocknung

Es ist in der Tat schwierig, sich unser Leben ohne Kühlung und Gefrieren vorzustellen; – ihr Einfluss auf unsere Existenz ist viel grösser, als man es sich vorstellt !



2. Grundlegende Begriffe

2.1 Das SI-System

Auf internationaler Ebene hat man sich auf ein einheitliches Mass-System festgelegt: das SI-System (Système International d'Unités), welches das veraltete metrische System abgelöst hat.

Zustandsgrösse	Metrisches System	SI-System
Temperatur	°C	°C
Temp.-Differenz	°C	K
Kraft	kilopond	Newton
Druck	at, ata, atü, mm Hg	Pascal, bar
Arbeit	kpm, kcal	Joule
Leistung	PS, kcal/h	Watt
Enthalpie	kcal/kg	Joule/kg

Das System hat in der Kälteindustrie noch nicht vollends den gebührenden Anklang gefunden; da aber viele Industrieländer sich in ihrer Normgebung und in der darauf bezogenen Gesetzgebung auf das SI-System beziehen, wird es für die Kältebranche immer notwendiger, sich daran zu gewöhnen.

Danfoss bezieht sich konsequent auf das SI-System; – wo es jedoch aus traditionellen oder anderen Gründen sinnvoll erscheint, werden auch noch Angaben im metrischen System zusätzlich aufgeführt.

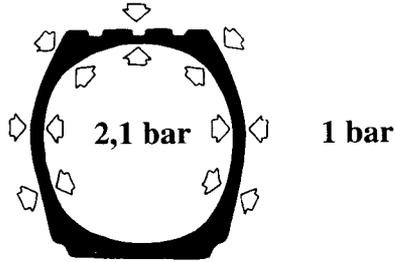
2.2 Druck

Wirkt eine Kraft auf eine Fläche, so ist ihr Einfluss abhängig von der Grösse dieser Fläche. Ein einleuchtendes Beispiel hierfür ist die Tatsache, dass man auf einer Schneedecke mit Skiern weniger tief einsinkt als ohne diese Utensilien. Sie verteilen nämlich das Gewicht über eine grosse Fläche, so dass das Gewicht pro Flächeneinheit relativ klein wird.



Druck wird definiert als das Verhältnis zwischen einer Kraft und der Fläche, auf die sie wirkt. Je nach Zweck wird diese Grösse in verschiedenen Einheiten angegeben.

Dies kann am Beispiel eines Autoreifens veranschaulicht werden :



Der Reifen ist vom Atmosphärendruck umgeben. Dieser beträgt an dem betreffenden Tag beispielsweise genau 1 bar. Das heisst : Pro m² Reifenoberfläche wirkt eine Kraft 100.000 Newton. Pumpt man den Reifen jetzt auf, herrscht in seinem Inneren beispielsweise ein Druck von 2,1 bar. Der Druckunterschied ist somit 1,1 bar, durch den sich der Reifen nach aussen hin ausdehnt.

Es ist heute teilweise noch üblich, den Luftdruck mit der Bezeichnung „Atmosphäre“ (atm) anzugeben.

Die Einheiten „bar“ und „atm“ entsprechen einander nicht genau : 1 bar = 0,987 atm

In der Kältetechnik ist die Grösse „bar“ gebräuchlich, während z.B. im Lüftungsbereich eher „Pascal“ (verkürzt: „Pa“) verwendet wird.

Der Grund ist, dass hier oftmals mit viel kleineren Drücken gearbeitet wird.

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Newton/m}^2 = 100.000 \text{ Pa}$$

Bei Manometerablesungen ist Vorsicht geboten: Hier ist in der Regel ein Überdruck angegeben !

Liest man auf einem solchen Messgerät den Wert 0 bar ab, herrscht somit kein Überdruck über dem Bezugspunkt = 1 bar absolut.

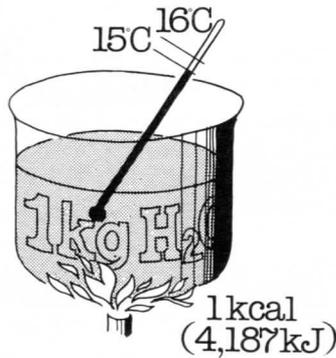
Der Wert 2 bar Überdruck würde einem absoluten Druck von 3 bar entsprechen, usw.

Der absolute Nullpunkt entspräche letztlich einem Unterdruck von 1 bar.

[bar]	[bar]
3	2
2	1
1	0
Absoluter Nullpunkt: 0	-1
Absoluter Druck	Überdruck = Manometerdruck

2.3 Wärme und Temperatur

Wärme ist eine Energieform und damit „unsichtbar“. Einzig ihr Einfluss kann mittels entsprechender Messinstrumente aufgezeigt und damit ihr Vorhandensein nachgewiesen werden. Im jetzt veralteten metrischen Einheitssystem mass man die Wärme in Kalorien (cal). Dies entspricht der Energiemenge, die notwendig ist, um 1 Gramm Wasser von 15 °C auf 16 °C zu erwärmen.



Im SI-System ist die für Energie generell angewendete Einheit Joule (J):

- 1 cal = 4,187 J
- 1 kcal = 4,187 kJ

Verschiedene Stoffe benötigen unterschiedliche Wärmemengen, um ihre Temperatur um ein Kelvin zu erhöhen: 1 kg Eisen braucht rund 0,5 Joule während 1 kg Luft etwa 1 Joule benötigt.

Die „spezifische Wärme“ eines Stoffes ist die Wärmemenge, mit der 1 kg um ein Kelvin erwärmt werden kann. Sie ist für eine lange Reihe von Stoffen und Substanzen tabellarisch aufgeführt und hat die Einheit kJ/(kg × K).

Die Einheit K = Kelvin bezeichnet hier einen Temperaturunterschied. Beispielsweise wäre der oben beschriebene Temperaturunterschied von 15 °C auf 16 °C gleich 1 K. Obwohl Kelvin die offizielle SI-Bezeichnung für Temperatur ist, hat sie sich im täglichen Leben nur begrenzt durchgesetzt. Der Grund ist, dass die metrische Einheit °C sich auf den Zustand von Wasser bezieht, der uns ja täglich vor Augen ist. Die Einheit Kelvin jedoch bezieht sich auf den absoluten Nullpunkt der Temperatur, wie sie beispielsweise im luftleeren Weltall herrscht. Dieser Nullpunkt liegt bei -273,15 °C.

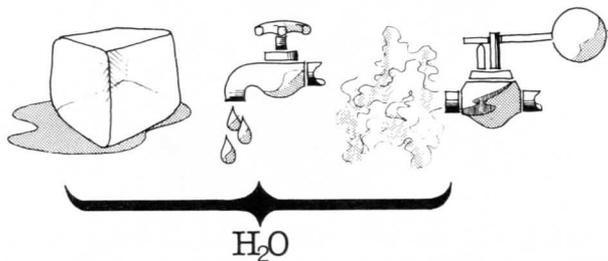
Es ist (z.Z. noch) schwer, sich vorzustellen, dass in der Wettervorhersage von Temperaturen „unter 273 K“ anstatt „unter dem Gefrierpunkt“ die Rede ist.

Dem Kältetechniker jedoch kommt diese Differenzierung zugute, weil er Temperaturunterschiede (= K) von absoluten Temperaturen (= °C) dadurch unterscheiden kann.

2.4 Zustandsänderungen

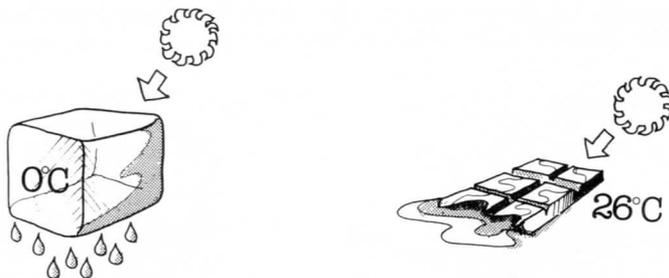
Jede Substanz kann in drei verschiedenen Erscheinungsformen auftreten: in festem, flüssigem oder in gasförmigem Zustand. Das bekannteste Beispiel ist Wasser: in festem Zustand tritt es als Eis auf, in gasförmigem Zustand als Dampf, während wir ihm in seiner flüssigen Form überall in unserem täglichen Leben begegnen.

All diese Zustandsformen haben eines gemeinsam: Das Wassermolekül tritt in unveränderlicher Form auf; d.h. dass Eis, Wasser und Dampf mit derselben molekularen Bezeichnung benannt werden können: H_2O .



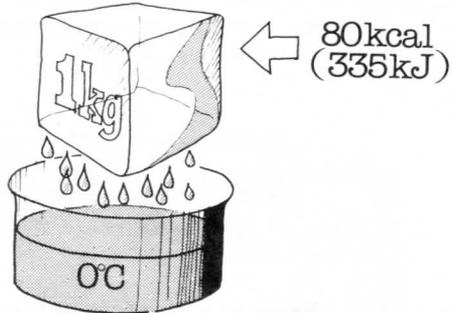
Der Druck und die Temperatur, denen ein Stoff ausgesetzt ist, bestimmen, in welcher Zustandsform er auftritt.

Die Temperatur, bei welcher ein Stoff vom festen in den flüssigen Zustand übergeht, nennt man seinen Schmelzpunkt. Während des Schmelzens verändert sich die Temperatur nicht: Die gesamte Wärme wird dazu verwendet, die Substanz von der festen in die flüssige Form umzuwandeln. Wenn schließlich der Stoff völlig umgewandelt worden ist, wird die Zufuhr weiterer Wärme seine Temperatur erhöhen. Verschiedene Stoffe haben verschiedene Schmelzpunkte. Schokolade schmilzt beispielsweise bei $26\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Als Beispiel für die beschriebenen Verhältnisse kann ein Eisbehälter angeführt werden. Nehmen wir an, Eis von der Temperatur $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird ungehindert dem Einfluss der Umgebungswärme ausgesetzt, die durch die Behälterwand ins Innere eindringt. Die zugeführte Wärme hebt die Eistemperatur relativ schnell auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ an. Dann fängt das Eis an zu schmelzen, welches bei einer konstanten Temperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vonstatten geht. Sofern kein neues Eis in den Behälter getan wird, ist nach einer gewissen Zeit der ursprüngliche Inhalt völlig geschmolzen und in Wasser von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ umgewandelt worden. Fortgesetzte Zufuhr von Wärme erhöht dann allmählich die Wassertemperatur, bis diese endlich das Niveau der Raumtemperatur erreicht.

Die Wärme, die während des Schmelzprozesses zugeführt werden muss, nennt man die Schmelzwärme. Genauer: Sie ist definiert als die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes zu schmelzen, dessen Temperatur vorher auf den Schmelzpunkt angehoben wurde. Wasser hat beispielsweise eine Schmelzwärme von 335 kJ/kg.

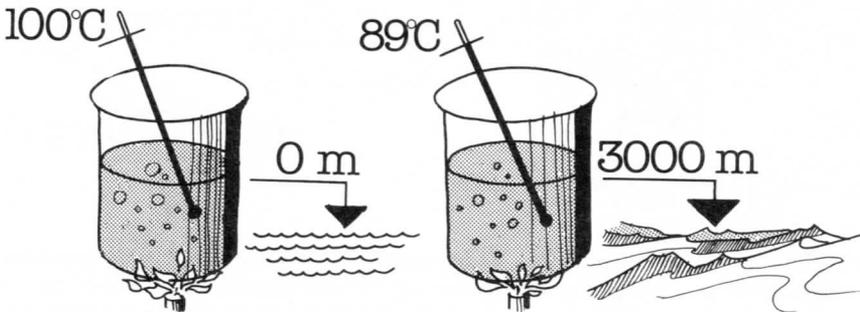


Das Verständnis für die Vorgänge, die sich während der Zustandsänderung eines Stoffes abspielen, ist in bezug auf die Kältetechnik von Bedeutung, da:

- Zustandsänderungen bei konstanten Temperaturen geschehen und
- Zustandsänderungen verhältnismässig grosse Wärmemengen pro kg des betreffenden Stoffes beanspruchen

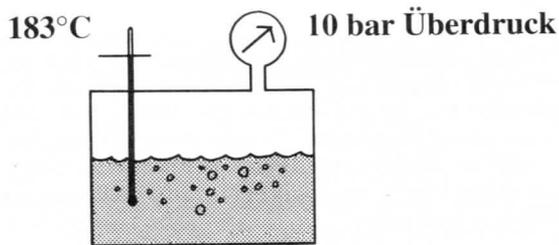
2.5 Verdampfungswärme

Da die Besonderheiten von Wasser allgemein bekannt und leicht zu beobachten sind, und da Wasser sich im Prinzip wie die meisten Kältemittel verhält, wird dieser Stoff stellvertretend für alle anderen in diesem Abschnitt behandelt.



Wird Wasser erwärmt, steigt seine Temperatur stetig bis zum Siedepunkt, der jedoch von dem herrschenden Druck abhängig ist. Bei normalem Atmosphärendruck an der Meeresoberfläche liegt der Siedepunkt des Wassers in einem offenen Gefäss bei 100 °C.

Fällt der Druck unter den Atmosphärendruck, fällt ebenfalls der Siedepunkt unter die erwähnten 100 °C. Beispielsweise liegt der Siedepunkt bei einem Druck von etwa 0,7 bar – entsprechend einer Höhe von 3000 m über dem Meeresspiegel – bei 89 °C.



In einem geschlossenen Gefäß wird der Siedepunkt durch den herrschenden Druck bestimmt. Ist der Druck höher als der Atmosphärendruck, liegt der Siedepunkt höher als 100 °C. So liegt der Siedepunkt von Wasser bei 120 °C, wenn der Druck sich 1 bar über dem Atmosphärendruck befindet; – bei einem Überdruck von 10 bar kocht Wasser bei 183 °C. Dieses Prinzip wird in den sogenannten Dampfdruckkochern ausgenutzt.

Den Zustand des Wassers am Siedepunkt nennt man den gesättigten Zustand und die Temperatur am Siedepunkt – folglicherweise – die Sättigungstemperatur.

Jeder Druck entspricht somit einer Siede- oder Sättigungstemperatur. Für Wasser sind die betreffenden Werte in der folgenden Tabelle aufgeführt (absolute Drücke):

Druck	Temperatur	Druck	Temperatur
[bar]	[°C]	[bar]	[°C]
0,2	60	2,0	120
0,4	75	4,0	143
0,6	86	6,0	158
0,8	93	8,0	170
1,0	99	10,0	179

Die Wärmemenge, die benötigt wird, um eine Flüssigkeit am Siedepunkt zu verdampfen, nennt man die Verdampfungswärme.

Bei Atmosphärendruck (1013 mbar) ist eine Wärmemenge von 2257 kJoule notwendig, um 1 kg Wasser bei 100 °C zu verdampfen. In diesem Fall wandelt sich das Wasser in 1 kg trockenen, gesättigten Dampf um. Ist die betreffende Wärmemenge kleiner, verdampft lediglich ein Teil des Wassers, wobei das Ergebnis eine Mischung aus gesättigtem Dampf und gesättigtem Wasser ist.

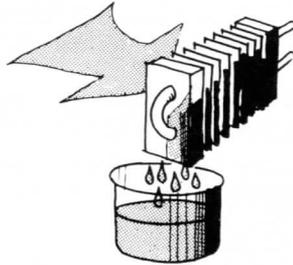
Verdampfungswärme wird auch als *latente* Wärme betitelt; d.h. sein Einfluss bewirkt keine Temperatursteigerung. Umgekehrt bewirkt die *sensible* Wärme eine Temperatursteigerung bei einem Stoff, dessen Temperatur sich über oder unter dem Siedepunkt befindet.

2.6 Überhitzung

Wird Wärme einem gesättigten Dampf zugeführt, erhält man überhitzten Dampf. Die Wärme heisst entsprechend „Überhitzungswärme“. Da die Zustandsänderung schon stattgefunden hat, kommt die sensible Wärme zur Geltung: Sie bewirkt einen Temperaturanstieg des Dampfes. Die spezifische Wärme ändert sich beim Übergang von der flüssigen zur dampfförmigen Phase. Beispielsweise wird nur 1,88 kJ benötigt, um die Temperatur von 1 kg Wasserdampf um 1 K zu erhöhen während für 1 kg Wasser 4,187 kJ aufgebracht werden muss.

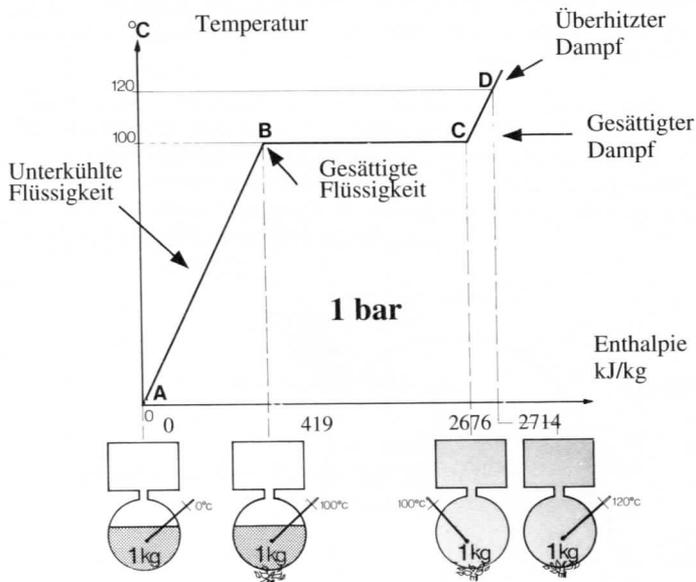
2.7 Der Verflüssigungsprozess

Die Zustandsänderung vom gasförmigen zum flüssigen Medium nennt man Verflüssigung oder Kondensation. Wo beim umgekehrten Prozess, dem Verdampfen, der flüssigen Phase Wärme zugeführt wird, muss in diesem Fall der Dampfphase die gleiche Wärmemenge entzogen werden. Auch hier bestimmt der herrschende Druck die Temperatur, bei der die Kondensation geschieht.



2.8 Das Temperatur-/Enthalpie-Diagramm

Die Zustandsgrößen eines Stoffes können in einem Temperatur-/Enthalpie-Diagramm angegeben werden. Hier ist die Enthalpie auf der Abszisse und die Temperatur auf der Ordinate abgebildet. Die Enthalpie kann quasi als der „Wärmegehalt“ des Stoffes aufgefasst werden und umfasst die gesamte ihm zugeführte Energie. Der Einfachheit halber benutzen wir wieder Wasser bei Atmosphärendruck als Beispiel.



Temperatur-/Enthalpie-Diagramm

Der Achsenschnittpunkt ist so gewählt, dass dort die Temperatur 0 °C und die Enthalpie 0 kJ/kg beträgt. Die Zufuhr sensibler Wärme bewirkt eine Zustandsänderung von Punkt A zu Punkt B (d.h. bis zur Verdampfungstemperatur des Wassers). Der Ordinatenabstand zwischen A und B entspricht einem Temperaturanstieg von 100 K.

Wie bereits erwähnt, muss pro K Temperaturanstieg eines kg Wassers eine Energiemenge von 4,187 kJ aufgewendet werden. Demzufolge ist der entsprechende Abszissenabstand $100 \times 4,187 \text{ kJ} = 419 \text{ kJ}$.

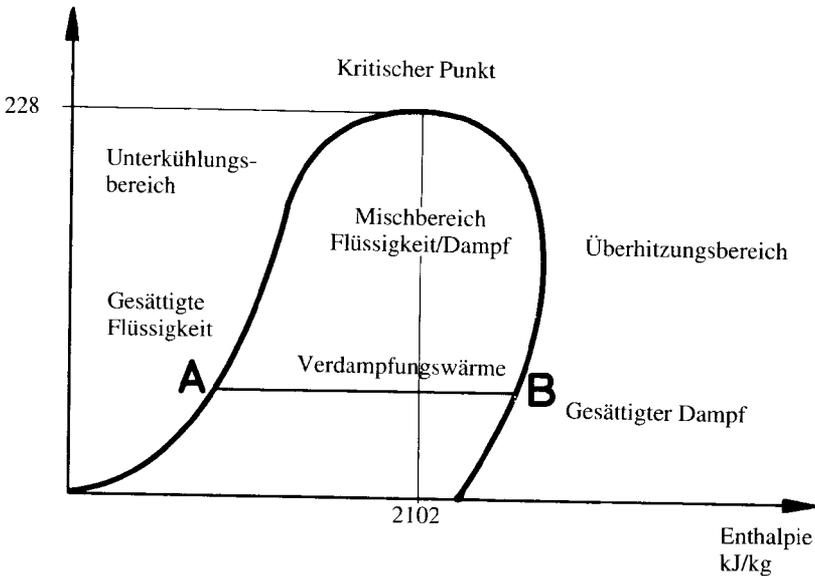
Die Gerade B-C entspricht der latenten Wärme (Verdampfungswärme), die benötigt wird, um 1 kg Wasser (Punkt B) in 1 kg trockenen gesättigten Dampf umzuwandeln (Punkt C). Die Verdampfungswärme von Wasser bei Atmosphärendruck ist – wie vorher erwähnt – 2257 kJ/kg, so dass die Enthalpie im Punkt C schliesslich $2257 + 419 = 2676 \text{ kJ/kg}$ beträgt. Es ist wichtig, sich zu vergegenwärtigen, dass zwischen Punkt B und Punkt C kein Temperaturanstieg geschieht.

Die Gerade C-D zeigt den Einfluss der sensiblen Wärme auf den Dampf, der vom gesättigten in den überhitzten Zustand übergeht. Die spezifische Wärme des Dampfes beträgt 1,88 kJ/(kg × K). In dem obigen Beispiel ist der Temperaturanstieg 20 K, weshalb die benötigte Wärmeenergie $20 \times 1,88 = 38 \text{ kJ/kg}$ beträgt. Daraus ergibt sich im Punkt D die Enthalpie von $2676 + 38 = 2714 \text{ kJ/kg}$.

2.9 Das Druck-/Enthalpie-Diagramm

Wie bereits erläutert, ist das Temperatur-/Enthalpie-Verhältnis vom herrschenden Druck abhängig. Um dieses Verhältnis für einen Stoff in vollem Umfang angeben zu können, müssten Diagramme für alle vorkommenden Drücke erstellt werden. Deswegen wird in der Praxis das flexiblere Druck-/Enthalpie-Diagramm verwendet. Ein solches Diagramm ist im folgenden aufgeführt. Anstelle der Temperatur ist jetzt der Druck die Ordinatengrösse, die aus technischen Gründen im logarithmischen Massstab abgebildet wird. Da in der Kältetechnik mit unterschiedlichen Drücken und Temperaturen gearbeitet wird, bietet diese Abbildungsform eine praktikable Möglichkeit der Bestimmung von Energieumwandlungen in einem Kältesystem.

Druck in bar



Druck-/Enthalpie-Diagramm

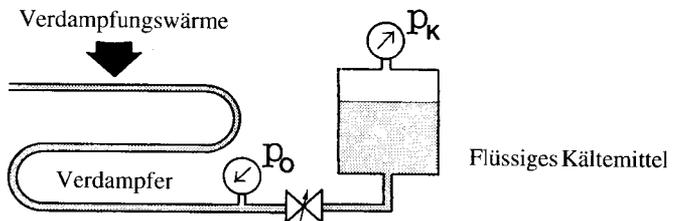
3. Der Kältekreislauf

In den vorausgegangenen Abschnitten wurden die physikalischen Begriffe am Beispiel von Wasser behandelt, obwohl dieses Medium aus praktischen Gründen als Kältemittel ungeeignet ist.

Im folgenden werden die einzelnen Bauteile einer einfachen Kälteanlage beschrieben, um schliesslich den gesamten Kreislauf verständlich erläutern zu können.

3.1 Der Verdampfer

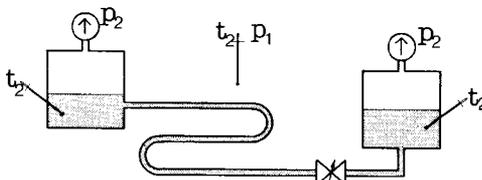
Ein flüssiges Kältemittel nimmt während seiner Verdampfung Wärme auf. Diese Phasenänderung ist es, die in einem Kältekreislauf Kälte erzeugt. Wenn ein Kältemittel bei Umgebungstemperatur durch eine Drosselstelle in die freie Atmosphäre hinaus expandiert, nimmt sie von der umgebenden Luft Wärme auf und verdampft. Ändert sich der Atmosphärendruck, verdampft das Kältemittel bei einer anderen Temperatur, da ja die Verdampfungstemperatur druckabhängig ist.



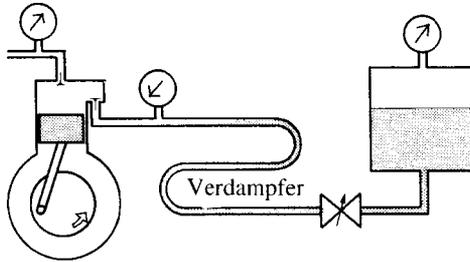
Der Bauteil, in dem der beschriebene Prozess abläuft, ist der Verdampfer. Seine Aufgabe ist es, Wärme aus dem umgebenden Medium zu entfernen, d.h. Kälte zu erzeugen.

3.2 Der Verdichter

Der Kälteprozess ist, wie bereits erwähnt, ein geschlossener Kreisprozess. Das Kältemittel expandiert folglich nicht, wie im obigen Beispiel beschrieben, in die freie Atmosphäre hinaus. Würde das vom Verdampfer kommende Kältemittel in einen geschlossenen Behälter eingespeist, stiege dessen innerer Druck bis zum Verdampfungsdruck. Die Kältemittelzufuhr vom Verdampfer würde somit allmählich aufhören, und die Temperatur sowohl im Verdampfer als auch im Behälter würde sich nach und nach der Umgebungstemperatur angleichen.



Um einen niedrigeren Druck und damit eine niedrigere Temperatur in dem Behälter aufrechtzuerhalten, muss ihm Dampf entzogen werden. Dies erreicht man mittels eines Verdichters, der Dampf aus dem Verdampfer saugt. Der Verdichter kann mit einer Pumpe verglichen werden, die im Kältemittelkreislauf Dampf fördert.



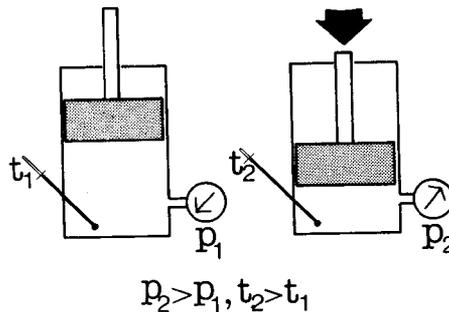
In einem geschlossenen Kreislauf streben Druck und Temperatur immer jeweils einem Gleichgewichtszustand zu. Saugt beispielsweise der Verdichter aus dem Verdampfer mehr Dampf ab als dort erzeugt wird, fällt der dort herrschende Druck und damit die Temperatur. Umgekehrt steigen Druck und Temperatur, sofern die Verdampferbelastung so ansteigt, dass die erzeugte Dampfmenge die Kapazität des Verdichters übersteigt.

3.3 Der Verdichtungsprozess

Kältemittel verlässt den Verdampfer entweder im Zustand gesättigten oder überhitzten Dampfes und wird nach dem Eintritt in den Verdichter komprimiert. Die Verdichtung wird in der Regel mit Hilfe von Kolben erreicht und ist daher vergleichbar mit der Betriebsweise des Verbrennungsmotors eines Autos.

Um seine Arbeit verrichten zu können, muss dem Verdichter Energie zugeführt werden. Diese Energie wird beim Verdichtungsprozess wiederum auf das Kältemittel überführt.

Kolbenverdichter

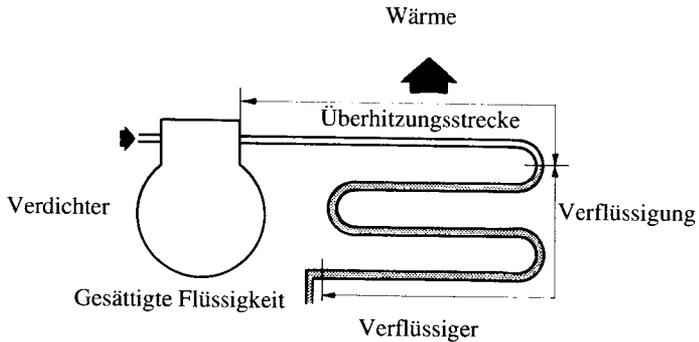


Aufgrund der zugeführten Verdichtungsenergie verlässt das Kältemittelgas den Verdichter bei einem – im Vergleich zum Eintrittszustand – höheren Druck und in einem stark überhitzten Zustand.

Die zugeführte Verdichterenergie ist abhängig von Anlagendruck und -temperatur. Es ist einleuchtend, dass mehr Energie aufgewandt werden muss, um 1 kg Dampf um 10 bar zu komprimieren als um 5 bar.

3.4 Der Verflüssiger

Das Kältemittel gibt im Verflüssiger Wärme ab, die einem anderen Medium niedrigerer Temperatur zugeführt wird. Die abgegebene Wärmemenge setzt sich zusammen aus der im Verdampfer aufgenommenen Energie und der für die Verdichtung benötigten Kompressionsenergie.

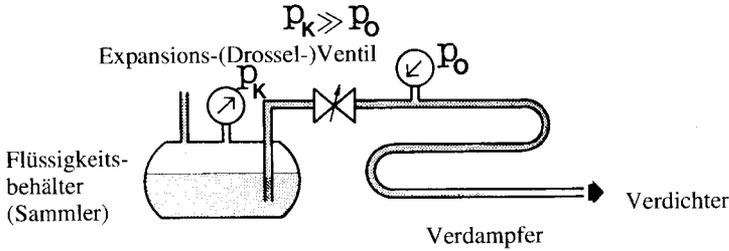


Das Medium, das diese Wärmemenge aufnimmt, kann Wasser oder Luft sein. Bedingung ist, dass die Temperatur des Mediums niedriger ist als die Verflüssigungstemperatur. Der Verflüssigungsprozess ist vergleichbar mit dem Verdampfungsprozess; nur sind die Zustandsänderungen gegenläufig, d.h. von der Dampfphase zum flüssigen Zustand.

3.5 Der Expansionsprozess

Kältemittelflüssigkeit strömt vom Verflüssiger zu einem Sammler, der dem im Abschnitt 3.1 erwähnten Behälter entspricht.

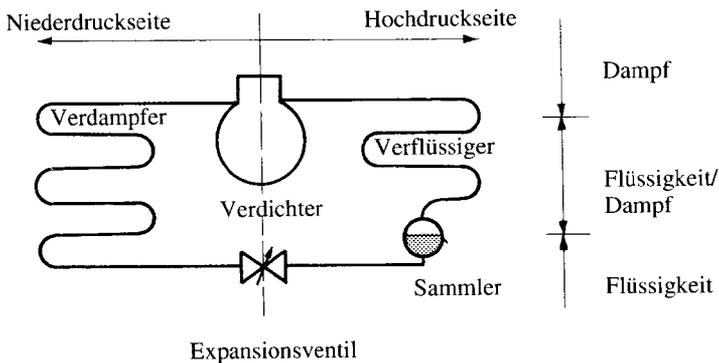
Aufgrund der Druckerhöhung durch den Verdichter ist der Sammlerdruck viel höher als der Verdampfendruck. Um wiederum den Druck auf das Niveau des Verdampfendruckes abzusinken, muss eine Drosselstelle eingebaut werden, in der das Kältemittel expandieren kann. Das entsprechende Bauteil ist in der Regel ein sogenanntes Expansionsventil.



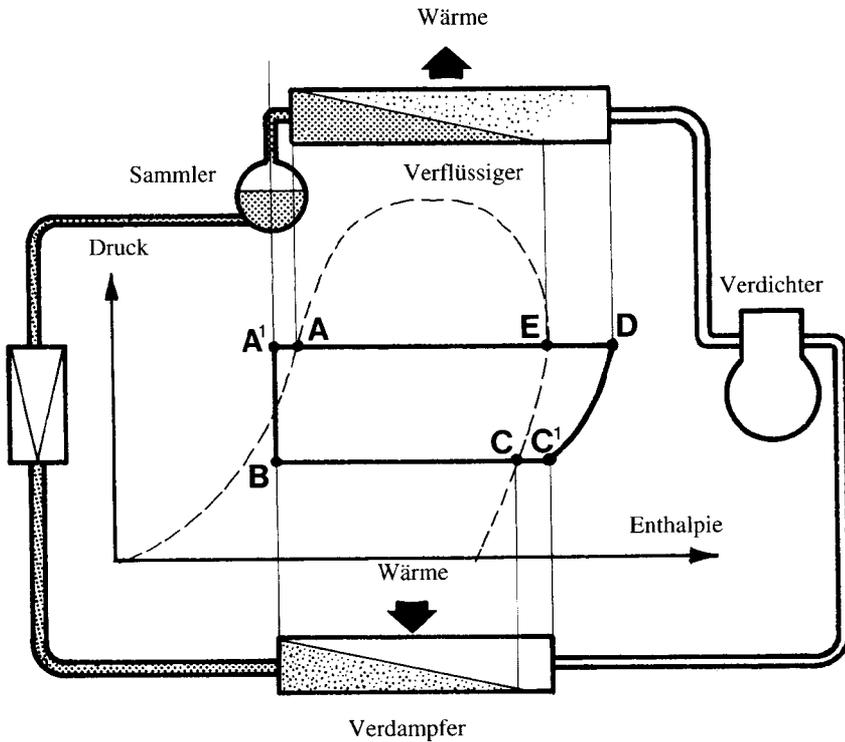
Unmittelbar vor dem Expansionsventil befindet sich das flüssige Kältemittel etwas unterhalb seiner Siedetemperatur. Durch die plötzliche Drucksenkung geschieht eine Zustandsänderung: Das Kältemittel fängt an zu siedeln und verdampft bei einer niedrigeren Temperatur. Diese Verdampfung vollzieht sich im Verdampfer, womit sich der beschriebene Kältekreis schließt.

3.6 Hoch- und Niederdruckseite der Kälteanlage

Es tritt eine Anzahl verschiedener Temperaturen im Kältekreislauf auf, da wir es mit unterkühlter und gesättigter Flüssigkeit sowie mit gesättigtem und überhitztem Dampf zu tun haben. Prinzipiell herrschen aber nur zwei Drücke in der Anlage; nämlich der Verdampfendruck und der Verflüssigungsdruck. Dementsprechend teilt sich der Kältekreislauf in eine Niederdruck- und eine Hochdruckseite auf.



In der Praxis weicht der Prozess im Druck-/Enthalpie-Diagramm etwas von dem umseitig beschriebenen ab. Der Grund ist, dass üblicherweise das Kältemittel beim Austritt aus dem Verdampfer leicht überhitzt und nach Austritt aus dem Verflüssiger durch Wärmeabgabe an die Umgebung (im Sammler) leicht unterkühlt ist.



5. Kältemittel

5.1 Generelle Anforderungen

Während der Untersuchungen des Kälteprozesses wurde auf die Frage nach den Kältemitteln nicht näher eingegangen; das war in bezug auf die Erläuterung der grundlegenden physikalischen Verhältnisse bei Zustandsänderungen von Stoffen nicht nötig.

Bekanntlich kommen aber in der Praxis verschiedene Kältemittel zum Einsatz, abhängig von den jeweils gegebenen Anwendungen und äusseren Bedingungen. Die wichtigsten Anforderungen an ein Kältemittel lauten wie folgt :

- Das Kältemittel sollte ungiftig sein. Wenn möglich, sollte es einen charakteristischen Geruch haben oder mit Hilfe eines geeigneten Spurstoffes bei Leckagen leicht geortet werden können.
- Das Kältemittel sollte weder leicht entzündbar noch explosiv sein. Wo dies nicht der Fall ist, muss es - wie im vorhergehenden Punkt - leicht aufzufassen sein.
- Das Kältemittel sollte im gewünschten Verdampfungstemperaturbereich ein passendes Druckniveau haben, das etwas über dem Atmosphärendruck liegt.
- Um die Grösse der Bauteile der Kälteanlage in Grenzen zu halten, sollte der Druck, welcher der Verflüssigungstemperatur entspricht, nicht zu hoch sein.
- Um den Fluss des Kältemittels in Grenzen zu halten, sollte seine Verdampfungswärme relativ gross sein.
- Das Kältemittel sollte in gasförmigem Zustand kein hohes, spezifisches Volumen aufweisen, damit die Grösse des Verdichters klein gehalten werden kann.
- Das Kältemittel muss bei allen vorkommenden Drücken und Temperaturen in der Kälteanlage chemisch stabil sein.
- Das Kältemittel sollte nicht korrosiv sein und darf in keiner Zustandsform Werkstoffe angreifen, mit denen es in Berührung kommt.
- Das Kältemittel darf das zur Verdichterschmierung benötigte Öl nicht zersetzen.
- Das Kältemittel muss leicht erhältlich und anwendbar sein.
- Das Kältemittel darf nicht zu teuer sein.

5.2 Fluorierte Kältemittel

Fluorierte Kältemittel tragen immer jeweils den Anfangsbuchstaben „R“, nachgefolgt von einer Ziffer, z.B. R22 und R134a; oft werden sie aber mit ihrem Handelsnamen bezeichnet.

Fluorierte Kältemittel haben folgende Charakteristika :

- In gasförmigem Zustand sind sie geruchsfrei und haben ein sehr niedriges Reizniveau.
- Sie sind ungiftig, geben jedoch während einer eventuellen Verbrennung Säure und Phosgene ab, die äusserst giftig sind.
- Sie sind nicht korrosiv.
- Sie sind unentzündbar und nicht explosiv.

Die bekanntesten Kältemittel sind :

R12, eine chemische Verbindung aus der Methangruppe mit der Formel CCl_2F_2 und einem Normalsiedepunkt von $-30\text{ }^\circ\text{C}$ (Normalsiedepunkt = Siedetemperatur bei 1 bar Druck). Dieses Kältemittel wurde früher fast ausschliesslich in kleineren Kälteanlagen benutzt, da seine spezifische Wärme relativ klein ist. R12 hat ein hohes Ozonzeresetzungspotential und soll zukünftig durch alternative Kältemittel ersetzt werden.

R22 wird bei tieferen Verdampfungstemperaturen eingesetzt. Sein Normalsiedepunkt liegt bei $-41\text{ }^\circ\text{C}$, und seine spezifische Wärme ist etwas höher als die von R12. Die chemische Formel lautet CHClF_2 .

R502 ist ein sogenannte azeotropes Gemisch aus R22 und R115 (CClF_2CF_3). Der Begriff „azeotrop“ gibt an, dass das Kältemittel in jedem Zustand das gleiche Mischungsverhältnis aufweist. Sein Normalsiedepunkt ist $-46\text{ }^\circ\text{C}$.

R134a wird als der aussichtsreichste Kandidat für den Ersatz von R12 angesehen. Seine Eigenschaften sind denen von R12 sehr ähnlich, abgesehen von seinem verschwindend kleinen Ozonzeresetzungspotential. Die chemische Formel lautet $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$.

Ausser den genannten fluorierten Kältemitteln gibt es noch eine ganze Reihe anderer, die aber nicht so häufig verwendet werden: R13, R13b1, R114, R115, R123, R500.

5.3 Ammoniak, NH_3

Ammoniak (NH_3) wird in grossem Umfang in industriellen Kälteanlagen eingesetzt. Sein Normalsiedepunkt liegt bei $-33\text{ }^\circ\text{C}$.

Ammoniak hat noch in kleinen Konzentrationen einen charakteristischen Geruch. Es ist nicht brennbar, aber in der Luft bei einer Konzentration zwischen 13% und 28% explosiv! Auf Grund seiner korrosiven Eigenschaften dürfen Kupfer oder kupferhaltige Legierungen als Werkstoff in Ammoniakanlagen nicht vorkommen.

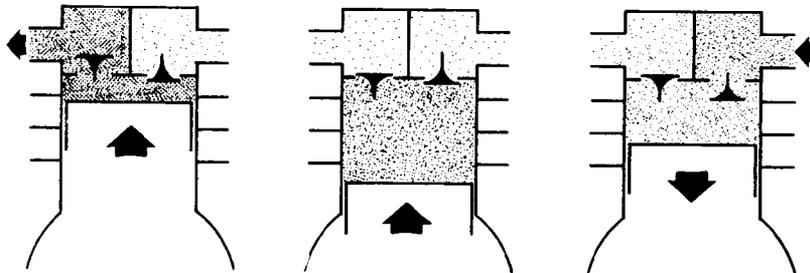
5.4 Sekundäre Kältemittel

Die oben genannten Kältemittel bezeichnet man als „primäre Kältemittel“. Die sogenannten „sekundären“ Kältemittel dienen als Zwischenträger bei der Wärmetransmission von der Umgebung zum Verdampfer. Die gängigen sekundären Kältemittel sind Wasser, Luft und Sole.

6. Hauptkomponenten der Kälteanlage

6.1 Der Verdichter

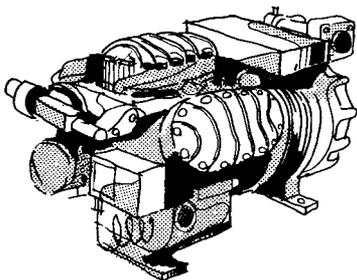
Die Aufgabe des Verdichters ist es, aus dem Verdampfer Dampf zu saugen und diesen in den Verflüssiger hineinzubefördern. Die gängigsten Typen sind Kolben-, Schrauben- und Zentrifugalverdichter.



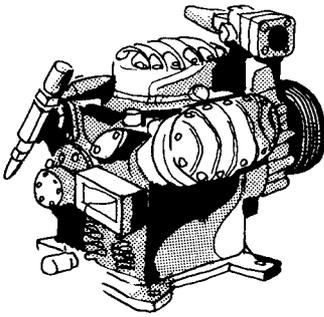
Der Kolbenverdichter deckt einen grossen Leistungsbereich ab: vom kleinen hermetischen Kältschrankkompressor bis zum grossen, 8-10 zylindrigen Verdichter für industrielle Anwendungen.



Beim hermetischen Verdichter für Kleinstleistungen sind Verdichter und Antriebsmotor in einer Einheit zusammengebaut.



In grösseren Anlagen ist der halbhermetische Verdichter oft anzutreffen. Sein Vorteil ist, dass die Achse gegen den Motor nicht abgedichtet werden muss. Tritt nämlich ein Leck in einer solchen Dichtung auf, ist diese nur sehr schwer auszuwechseln. Allerdings kann dieses Prinzip in Ammoniakanlagen nicht angewendet werden, da NH_3 die Motorwindungen angreift.



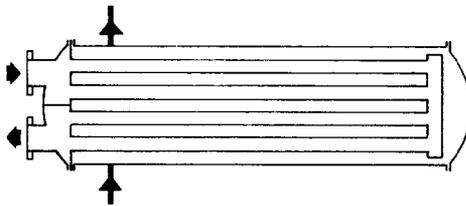
Verdichter grösseren Ausmasses sowie sämtliche Ammoniakverdichter sind als „offene“ Verdichter konstruiert; d.h. mit dem Motor ausserhalb des Kurbelgehäuses. Die Antriebsenergie kann mittels einer Kurbelwelle oder eines Keilriemens übertragen werden.

Für besondere Anwendungen gibt es ölfreie Kompressoren. In der Regel ist das Schmieren von Lagern und Zylinderwänden jedoch unumgänglich. Bei grossen Kälteverdichtern wird das Öl mit Hilfe einer Pumpe umgewälzt.

6.2 Der Verflüssiger

Der Zweck des Verflüssigers ist das Entfernen der Wärmemenge, die sich aus der Verdampfungswärme und der während des Verdichtens zugeführten Energie zusammensetzt. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Verflüssigerausführungen.

Der Bündelrohrverflüssiger. Dieser Verflüssigertyp wird bei genügend vorhandenem Kühlwasser eingesetzt. Er besteht aus einem horizontalen Rohrmantel mit angeschweissten Eintritts- und Umlenkplatten, welche die Innenrohre stützen. Die beiden Enddeckel sind durch Bolzen am Rohrmantel befestigt.



Das Kältemittelkondensat durchströmt den Mantelraum, während das Kühlwasser durch die Innenrohre geführt wird. In den Enddeckel geschieht durch Trennplatten eine Umlenkung des Wassers, das auf diese Weise mehrmals den Verflüssiger durchläuft. In der Regel wird der Verflüssiger für eine Kühlwassererwärmung von 5-10 K bemessen.

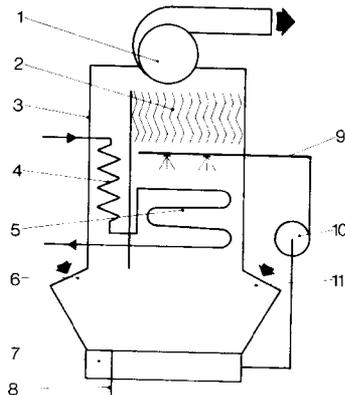
Sofern eine Reduzierung der umgewälzten Wassermenge wünschenswert oder gar notwendig ist, kann ein *Verdunstungsverflüssiger* eingesetzt werden. Dieser Verflüssigertyp besteht aus einem Gehäuse mit eingebauter Verflüssigerrohrschlange, Wasserverteilerrohren, Tropfenabscheider und Lüftern.

Das gasförmige Kältemittel tritt am oberen Ende der Rohrschlange ein und verlässt diese am unteren Ende in flüssigem Zustand.

Aus Verteilrohren, die über der Rohrschlange angebracht sind, wird Wasser durch Düsen auf die Rohrschlange gesprüht, wonach es in die Tropfwanne hinunterfällt.

Lüfter sorgen für einen kräftigen, nach oben gerichteten Luftstrom quer durch die Rohrschlange.

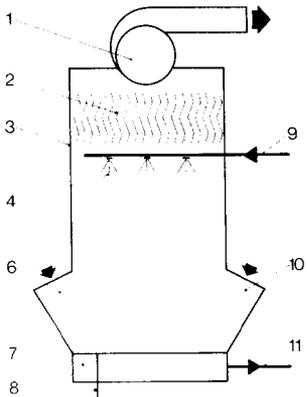
Herunterfallende Wassertropfen verdampfen teilweise in diesem Luftstrom. Die dazu benötigte Verdampfungswärme wird dem Kältemittel entzogen, dass dadurch zu kondensieren anfängt.



1. Lüfter
2. Tropfenabscheider
3. Gehäuse
4. Überhitzungsentferner
5. Verflüssigerrohr
6. Lufteintritt
7. Tropfwanne
8. Überlaufrohr
9. Wasserverteilerrohr
10. Wasserumwälzpumpe
11. Lufteintritt

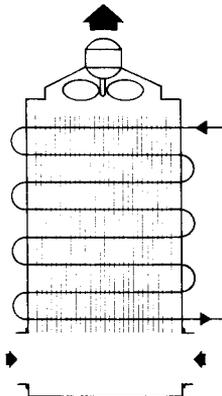
Das Prinzip der Wasserverdunstung wird auch in den sogenannten „Kühltürmen“ angewendet. Sie werden in Verbindung mit Bündelrohrverflüssigern eingesetzt. Das Kühlwasser zirkuliert dann zwischen diesen beiden Einheiten.

Der Kühlturm ist im Prinzip wie ein Verdunstungsverflüssiger aufgebaut; jedoch ist anstelle des Verflüssigungs-Wärmetauschers ein Register zur Tropfenabscheidung eingebaut. Luft erwärmt sich während ihrer Strömung durch den Kühlturm im Gegenstrom zum herabfallenden Wasser. Die Wärmeaufnahme geschieht in erster Linie durch Verdunstung eines Teils des umgewälzten Wassers. Das verdunstete Wasser steht dem Kühlkreislauf nicht mehr zur Verfügung und muss durch Zusatzwasser ersetzt werden.



- 1. Lüfter
- 2. Tropfenabscheider
- 3. Gehäuse
- 4. Düse
- 6. Lufteintritt
- 7. Sammelbecken
- 8. Überströmrohr
- 9. Kühlwasser vom Verflüssiger
- 10. Lufteintritt
- 11. Kühlwasserrücklauf zum Verflüssiger

Es ist möglich, 90-95 % des Wasserverbrauchs durch den Einsatz eines Kühlturmes zu sparen, verglichen mit Verbrauch eines Bündelrohrverflüssigers.



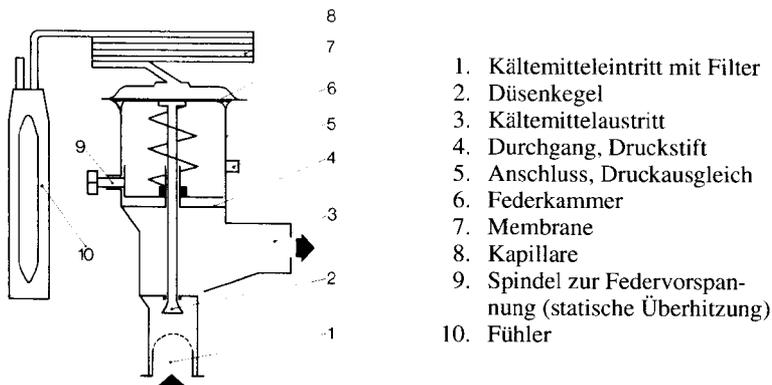
In gewissen Fällen steht für die Abführung der Verflüssigerwärme kein Wasser zur Verfügung. Dann bietet sich der Einsatz eines *luftgekühlten* Verflüssigers an. Aufgrund der schlechteren Wärmeübertragungseigenschaften von Luft im Vergleich zu Wasser ist hier eine grosse, äussere Wärmeübertragungsfläche notwendig. Durch die Anwendung von Lamellen oder Rippen, die auf den Verflüssigerrohren montiert sind, sowie durch einen genügend grossen, durch Lüfter zustandegebrachten, Luftdurchsatz erreicht man entsprechende Leistungen wie beim Kühlturmbetrieb.

6.3 Das Expansionsventil

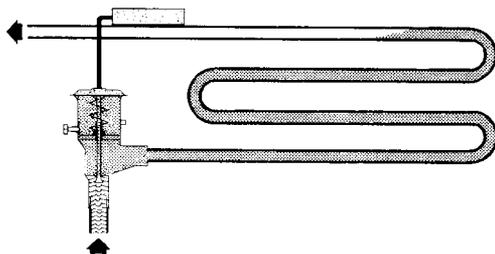
Das Expansionsventil hat die Aufgabe, den Verdampfer mit einer passenden Menge Kältemittel zu versorgen. Die Kältemittelzufuhr geschieht durch den Druckunterschied zwischen Verflüssiger- und Verdampferseite.

Die einfachste Lösung dieser Aufgabe erreicht man mit Hilfe eines Kapillarrohres, das zwischen Verflüssiger und Verdampfer eingebaut wird.

Ein Kapillarrohr findet jedoch nur Anwendung in kleineren, einfachen Anlagen wie Kühl- und Gefrierschränken, da es keine Regeleigenschaften besitzt. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, muss ein Expansionsventil verwendet werden. Es besteht aus einem Gehäuse, einer Kapillare und einem Fühler. Das Gehäuse wird in die Flüssigkeitsleitung eingebaut und der Fühler am Verdampferaustritt angebracht.



Die nachfolgende Abbildung zeigt die Flüssigkeitseinspritzung eines Expansionsventils in einen Verdampfer. Im Fühler befindet sich eine kleine Menge Flüssigkeit (ebf. ein Kältemittel). Im restlichen Teil des Fühlers, der Kapillare und des Raumes über der Membrane befindet sich gesättigter Dampf bei einem Druck, welcher der Temperatur des Fühlers entspricht. Der Raum unter der Membrane steht in unmittelbarer Verbindung mit dem Verdampfer, so dass der dort herrschende Druck dem Verdampfungsdruck entspricht.



Der Öffnungsgrad des Ventils wird bestimmt durch :

- den Füllungsdruck über der Membrane
- den Verdampfungsdruck unter der Membrane
- den Federdruck unter der Membrane

Während des normalen Betriebes ist kurz vor dem Verdampferaustritt das eingespritzte Kältemittel gänzlich verdampft. Im letzten Teil des Verdampfers wird der gesättigte Dampf überhitzt. Die vom Fühler erfasste Temperatur entspricht somit der Verdampfungstemperatur plus der Überhitzung; z.B. :

Verdampfungstemperatur	= -10 °C
Überhitzung	= 12 K (Temperaturerhöhung)
<hr/>	
Fühlertemperatur	= +2 °C
<hr/>	

Wird zu wenig Kältemittel eingespritzt, erhitzt sich der Kältemitteldampf noch mehr, was einen Temperatur- und Druckanstieg im Fühler mit sich führt. Demzufolge biegt sich die Membrane nach unten durch und öffnet über den Druckstift das Ventil entsprechend mehr. Im umgekehrten Fall verkleinert sich die Ventilöffnung bei fallender Fühlertemperatur.

Expansionsventile der beschriebenen Art nennt man „Thermostatische Expansionsventile“. Sie öffnen „modulierend“, d.h. in einem stetigen Mass. Bei gewissen elektronischen Expansionsventilen erfolgt die Öffnung taktweise; d.h. während eines Teiles einer festen Periodenzeit sind sie ganz offen und während der restlichen Periodenzeit ganz geschlossen. In diesem Zusammenhang spricht man auch von einer „digitalen“ Funktionsweise. Der Öffnungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Öffnungs- und Periodenzeit; z.B.:

Periodenzeit	= 6 sec.
Öffnungszeit	= 4 sec.
<hr/>	
Öffnungsgrad	= $4/6 \times 100 \% = 67 \%$
<hr/>	

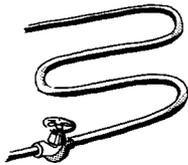
6.4 Der Verdampfer

Abhängig von der Anwendung werden verschiedene Anforderungen an den Verdampfer gestellt. Demgemäss gibt es eine Vielzahl von Verdampferbauarten.

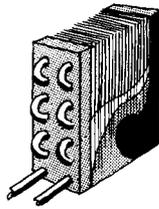
Verdampfer für natürliche Konvektion oder „stille Kühlung“ werden wegen ihrer schlechten Wärmeübertragungseigenschaften verhältnismässig selten eingesetzt. Sie bestehen aus berippten Rohren.

Sofern ein Luftstrom mittels eines *Lüfters* durch den Verdampfer geleitet wird, erhöht sich seine Kälteleistung erheblich. Durch die erhöhte Luftgeschwindigkeit verbessert sich die Wärmeübertragung von der Luft zum Verdampferrohr in einem solchen Masse, dass für gleiche Leistungen kleinere Verdampfer eingesetzt werden können.

Zur Flüssigkeitskühlung werden verschiedenartige Verdampfer angewendet. Die einfachste Ausführung besteht in einer Rohrschlange, die in einem offenen Wassertank versenkt wird. Geschlossene Systeme in Form von *Bündelrohrverdampfern* („Shell-and-Tube“ Ausführungen) sind jedoch am häufigsten anzutreffen.



Glattrohrverdampfer



Beripptes Verdampferregister



Rippenrohrverdampfer

7. Der praktische Aufbau einer Kälteanlage

Abbildung A zeigt das Prinzip einer Kälteanlage für einen einfachen Kühlraum, wie er häufig in Metzgereien oder in Supermärkten anzutreffen ist.

Die Verdichtereinheit kann beispielsweise in einem anliegenden, belüfteten Raum installiert werden. Sie besteht typisch aus einem Verdichter, der von einem Elektromotor über einen Keilriemen angetrieben wird. Auf dem Grundrahmen ist zusätzlich noch ein luftgekühlter Verflüssiger sowie ein Sammler montiert. Auf der Motorachse montiert sorgt ein Lüfterflügel für den Luftdurchsatz durch den Verflüssiger sowie für die Verdichterkühlung. Die Leitung zwischen Verdichter und Verflüssiger nennt man Heissgasleitung.

Vom Sammler führt eine unisolierte Flüssigkeitsleitung zum Expansionsventil, das sich im Kühlraum unmittelbar am Verdampferintritt befindet. Der Verdampfer enthält ein dicht beripptes Rohrregister und ist noch mit einem Lüfter und einer Tropfwanne ausgestattet. Vom Verdampferaustritt führt die sog. Saugleitung zurück zum Verdichter. Ihr Durchmesser ist etwas grösser als der der Flüssigkeitsleitung, da sie grossvolumigen Dampf leiten muss. Wegen der möglichen Tropfen- oder Reifbildung am Aussenrohr ist diese Leitung normalerweise isoliert.

Abbildung B zeigt die momentanen Druck- und Temperaturverhältnisse in einer solchen Anlage (hier mit dem Kältemittel **R22**). Die angegebenen Drücke sind absolute Drücke, d.h. auf den absoluten Nullpunkt bezogen. Am Verdichteraustritt herrscht ein Druck von 13,2 bar und eine Temperatur von 60 °C (stark überhitztes Gas). Im oberen Teil des Verflüssigers fällt die Temperatur schnell auf den Sättigungspunkt, der bei dem genannten Druck +34 °C entspricht. Bei dieser Temperatur geschieht die Verflüssigung.

Der Druck am Sammleraustritt ist in etwa der gleiche, aber aufgrund der entstandenen Unterkühlung ist die Temperatur um 2 K auf +32 °C gefallen.

Eine weitere Druck- und Temperatursenkung ereignet sich zwischen Sammler und Expansionsventil.

Durch die Expansion des Kältemittels im Expansionsventil fallen Druck und Temperatur von 12,7 bar und +24 °C auf jeweils 3,6 bar und -10 °C im Verdampfer. Im Überhitzungsteil des Verdampfers erhöht sich die Temperatur bei gleichbleibendem Druck, so dass die Fühlertemperatur +2 °C beträgt.

Die Überhitzung ist folglich: $+2\text{ °C} - (-10\text{ °C}) = 12\text{ K}$.

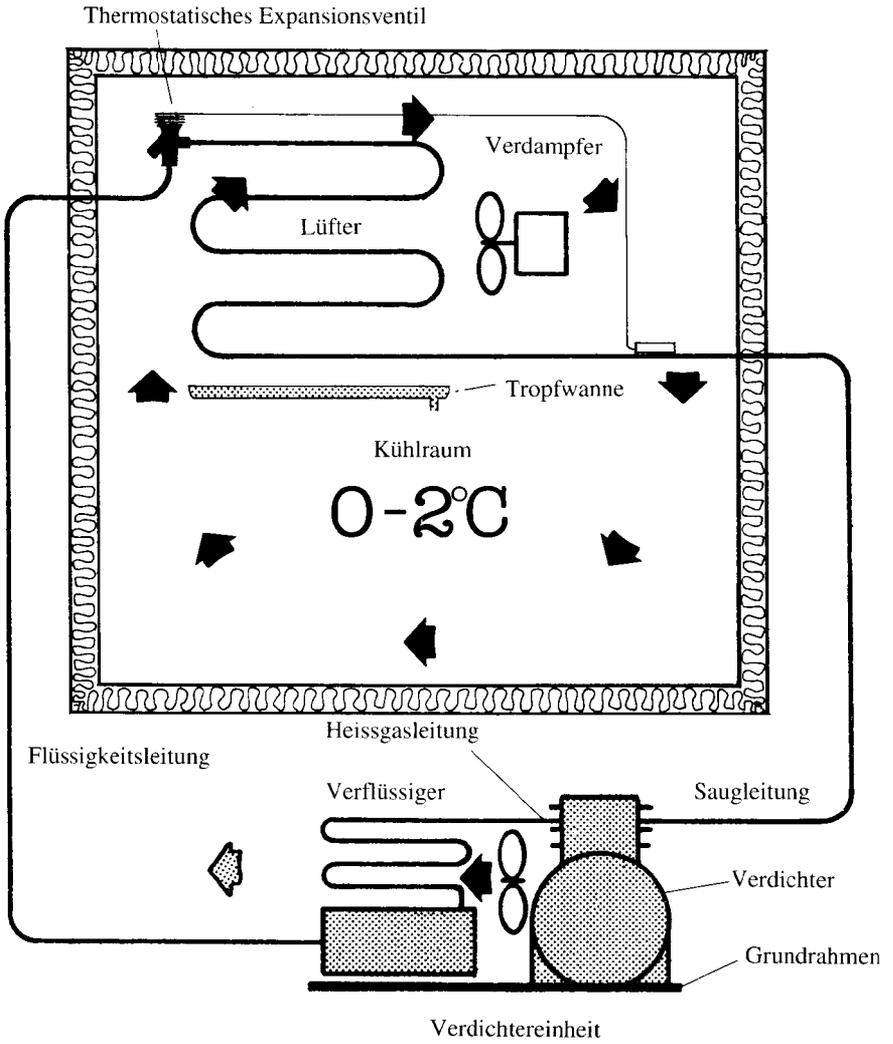
Wie gezeigt ändern sich die Lufttemperaturen durch die Wärmeaufnahme von den eingelagerten Waren, den Wänden, der Beleuchtung usw. während der Strömung durch den Raum. Die Temperatur der durch den Verflüssiger strömenden Aussenluft ändert sich auch, und zwar je nach Jahreszeit.

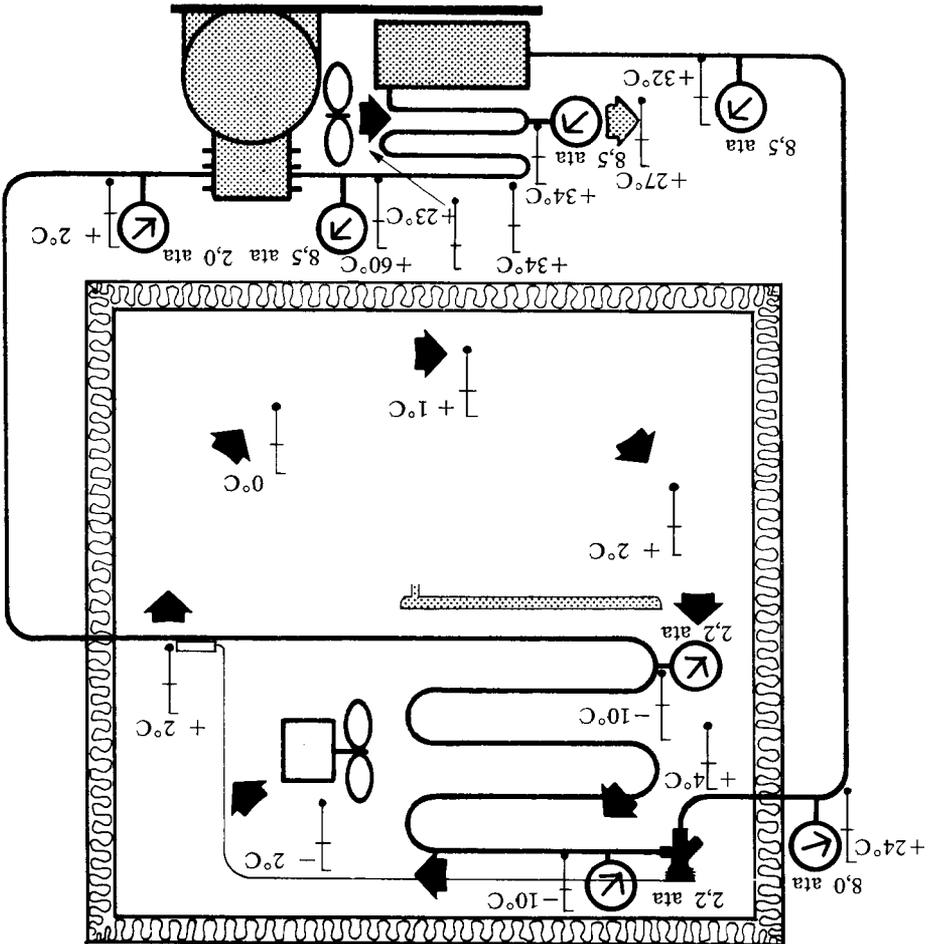
Eine Kälteanlage muss auf der Grundlage ihrer grössten Belastung ausgelegt werden.

Um auch im Teillastbereich gut funktionieren zu können, sind gewisse Hilfsmittel notwendig. Die Anpassung an Teillastverhältnisse wird durch den Begriff Regelung abgedeckt. Diese Aufgabe wird durch das Danfoss-Automatik Programm gelöst, das sämtliche benötigten Komponenten im Kältekreislauf umfasst.

Eine Beschreibung dieser Apparate und ihrer Funktionen würde den Rahmen dieser Schrift sprengen. Zum näheren Studium wird auf die entsprechenden Danfoss-Publikationen verwiesen.

A





Die in Katalogen, Prospekten und anderen Werbematerialien und Anwendung zu prüfen. Der Käufer ist für die Richtigkeit dieser Angaben verantwortlich und haftet für die Richtigkeit dieser Angaben an ihren Produkten – auch an bereits hergestellten Produkten. Danfoss-Logo sind Warenzeichen der Danfoss A/S.



Neue Adresse

Danfoss GmbH
Abteilung Kältetechnik
Postfach 10 04 53, 63004 Offenbach
Carl-Legien-Str. 8, 63073 Offenbach
Telefon (0 69) 4 78 68-500
Telefax (0 69) 4 78 68-529

www.danfoss.de/kaelte
e-mail Kältetechnik: info@danfoss-sc.de

Die in Katalogen, Prospekten und anderen Werbematerialien und Anwendung zu prüfen. Der Käufer ist für die Richtigkeit dieser Angaben verantwortlich und haftet für die Richtigkeit dieser Angaben an ihren Produkten – auch an bereits hergestellten Produkten. Danfoss-Logo sind Warenzeichen der Danfoss A/S.