

2.3 Basisgrößen und Basiseinheiten

Durch das „Gesetz über Einheiten im Messwesen“ und die Ausführungsverordnung sind u. a. folgende, auch für die Kältetechnik maßgebende Basisgrößen mit den Einheiten festgelegt worden:

Tab. 2.1 Basisgrößen und Basiseinheiten. Von diesen Basisgrößen werden weitere gesetzliche Einheiten abgeleitet. Diese werden, soweit sie für die Kältetechnik von Bedeutung sind, erläutert und verwendet.

Basisgröße	Basiseinheit	Kurzzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

2.3.1 Masse

Als Masseneinheit hatte man ursprünglich (1799) die Masse eines Kubikdezimeters (eines Liters) Wasser von 4 °C gewählt und diese als 1 kg bezeichnet. Es wurde ein Platinzylinder hergestellt, dessen Masse derjenigen von einem Liter Wasser möglichst gleichkommen sollte. Die Masse dieses Zylinders, der wie das Urmeter in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird, ist als Masseneinheit international festgesetzt worden und heißt ein Kilogramm. 1 kg = 1.000 g (Gramm). Im Jahre 1889 wurden 40 Kopien dieser Masse aus Platin-Iridium hergestellt und an diejenigen Staaten verteilt, die das metrische Maß eingeführt haben.

Masse kennzeichnet die Eigenschaft eines Körpers, die sich sowohl als Trägheit gegenüber einer Änderung seines Bewegungszustandes (Grundgesetz der Dynamik: Kraft = Masse · Beschleunigung) als auch in der Anziehung zu anderen Körpern äußert (Gravitationsgesetz).

Die Masse wird durch Vergleich mit Körpern bekannter Masse bestimmt. Dabei handelt es sich meist um einen Vergleich mit Hilfe von Masseneinheiten geeichter Wägestücke auf der Balkenwaage (Abb. 2.5).

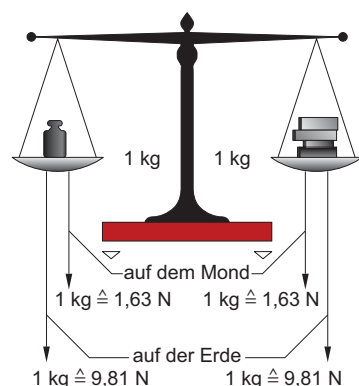


Abb. 2.5 Die Balkenwaage vergleicht Massen unabhängig vom Ort.

Unter der Masse eines Körpers versteht man die in ihm enthaltene Substanzmenge.

Obwohl z. B. eine Schokoladentafel (100 g) auf dem Mond weniger Gewichtskraft ausübt, „leichter“ ist als auf der Erde (festgestellt mit einer Federwaage), stellt sie überall den Hunger

gleich gut. Der Nährwert, d. h., die Substanzmenge und – physikalisch ausgedrückt – die Masse m in Gramm der Tafel, bleiben auf dem Mond erhalten.

Die Masse eines Körpers ist überall gleich, wenn seine Substanzmenge nicht geändert wird.

Basiseinheit der Masse ist also das Kilogramm (kg). Das Symbol (Formelzeichen) ist das kleine m . Das Gramm (g) ist der tausendste Teil des Kilogramms, d. h., 1 Gramm ist gleich $\frac{1}{1.000}$ kg. Besonderer Name für das Megagramm (Mg) ist die Tonne (t), d. h., 1 Tonne ist gleich 1.000 kg. Es sind

$$\begin{aligned}1 \text{ Mg} &= 1 \text{ t} \\1 \text{ t} &= 1.000 \text{ kg} \\1 \text{ kg} &= 1.000 \text{ g} \\1 \text{ g} &= 1.000 \text{ mg}\end{aligned}$$

2.3.2 Kraft

Der englische Physiker Isaac Newton (1643 – 1727) hat das Grundgesetz der Dynamik formuliert und dadurch den Begriff der Kraft im physikalischen Sinn definiert:

Kraft = Masse · Beschleunigung

Die Kraft kann mithin die Ursache einer Beschleunigung eines Körpers der Masse m sein, wenn der Körper nicht an einer Fortbewegung gehindert wird.

Die Einheit der Kraft ist nach Newton benannt und wie folgt definiert:

1 N (Newton) ist diejenige Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s² erteilt.

Die SI-Einheit der Kraft ergibt somit als Produkt der SI-Einheit der Masse in kg und der SI-Einheit der Beschleunigung in m/s² zu kg·m/s².

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

2.3.3 Gewichtskraft

Im Alltag wird für Masse oft der Begriff Gewicht verwendet. Im streng physikalischen Sinn ist das Gewicht aber die Gewichtskraft, die im Schwerfeld der Erde auf einen Körper einwirkt. Ein Körper der Masse m entwickelt die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ (g = Fallbeschleunigung). Es handelt sich hier nicht um eine Substanz- oder Stoffmenge. Die Gewichtskraft ist zum Erdmittelpunkt hin gerichtet und in ihrer Größe vom Standort auf der Erde abhängig, da die Fallbeschleunigung g wegen der Abflachung der Erde nicht konstant ist (Mittelwert $g \approx 9,80665 \approx 9,81 \text{ m/s}^2$). Auch die Höhenlage ist von Einfluss. Waagen, wie sie im Geschäftsverkehr verwendet werden, bestimmen also die Masse meist indirekt über die Gewichtskraft und sind dementsprechend in kg bzw. g skaliert. Nur selten (z. B. auf dem Markt) findet man heute noch Waagen, die mit geeichten Gewichtsstücken Massen vergleichen und so die Masse (das Gewicht in kg) direkt messen.

Ein Stück Eisen entwickelt demnach – mit der Federwaage gewogen (Abb. 2.6) – im Flachland eine größere Gewichtskraft als auf einem Berg. Die Unterschiede sind allerdings auf der Erde sehr gering und nur mit feinsten Geräten feststellbar.

Eine genaue Feder würde sich durch das Stück Eisen z. B. an den Polen wegen der Erdabflachung etwas stärker verlängern als am Äquator (etwa um 0,6 %). Erst wenn das Stück Eisen weit von der Erde entfernt wird, wird es spürbar leichter; in 6.370 km über der Erde (doppelte Entfernung vom Erdmittelpunkt) beträgt die Anziehungskraft nur noch 1/4. Auf dem Mond z. B. beträgt die Gewichtskraft nur noch 1/6 von derjenigen, die auf der Erde festgestellt wurde. Da auf unserer Erde die Unterschiede sehr klein sind, können sie im täglichen Leben vernachlässigt werden.

Auch die Druckkraft, die ein Körper auf seine Unterlage ausübt, und die Kraft, mit der er an seiner Aufhängung zieht (z. B. Last am Seil), werden als Gewichtskraft bezeichnet (Hoch- und Tiefbau). Um Verwechslungen zu vermeiden, sollte das Wort „Gewicht“ als Kraftbegriff im technisch-wissenschaftlichen Bereich nicht mehr verwendet werden.

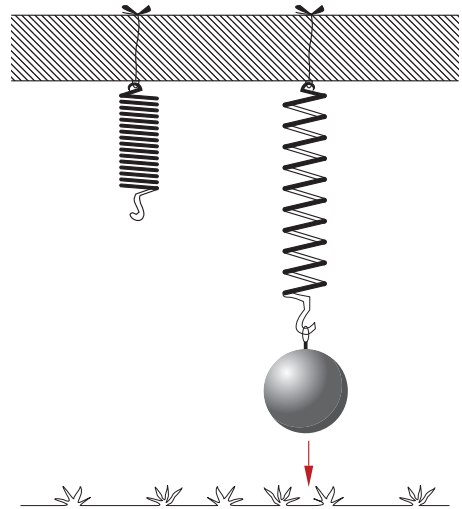


Abb. 2.6 An der Verlängerung der Feder erkennt man, dass eine Kraft wirkt. Diese Gewichtskraft ist proportional zur Masse m und zur Fallbeschleunigung g . Wegen der Erdabflachung würde die Feder sich an den Polen etwa 0,6 % stärker dehnen als am Äquator.

Die Gewichtskraft eines Körpers ist abhängig vom Ort der Messung.

Legt man auf eine Balkenwaage zwei Schokoladentafeln und sie spielt sich ein, so werden beide am gleichen Ort gleich stark von der Erde angezogen; sie entwickeln die gleiche Gewichtskraft, haben also die gleiche Masse. Der gleiche Vorgang könnte auf dem Mond beobachtet werden.

2.6 Aggregatzustand und Siedepunkt

Jeder Stoff kann in drei Formen – fest, flüssig und gasförmig – vorkommen. Wasser wird z. B. im festen Zustand „Eis“ und im gasförmigen „Wasserdampf“ genannt. Wasserdampf, also gasförmiges Wasser, ist ein unsichtbares Gas. Im Alltag wird häufig Dampf gesagt, wo es sich eigentlich um Nebel handelt. Nebel besteht aus feinsten Tröpfchen und ist deswegen auch sichtbar. Wenn Wasser kocht, steigt Wasserdampf auf (unsichtbar) und kondensiert zum Teil sofort an der kühleren Umgebungsluft in Form feinsten Tröpfchen und wir sehen Nebel.

Die einzelnen Zustandsformen bezeichnet man in der Physik mit Aggregatzustand. In allen drei Zuständen bleiben die Moleküle des Wassers unverändert, also in der Zusammensetzung zwei Atome Wasserstoff und ein Atom Sauerstoff (H_2O).

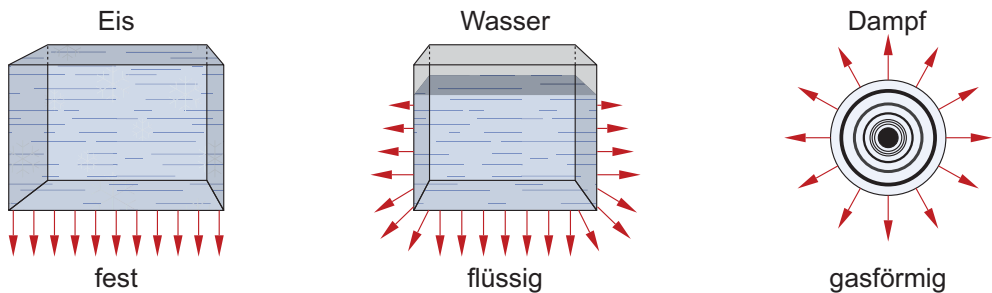


Abb. 2.8 Die drei Aggregatzustände von Wasser mit der Darstellung der Druckrichtungen

Ob sich ein Stoff im festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand befindet, ist von seiner Temperatur und von dem Druck, dem er ausgesetzt ist, abhängig. Die Temperatur, bei der ein fester Stoff flüssig wird, heißt Schmelztemperatur oder, wenn der Vorgang umgekehrt verläuft, Erstarrungstemperatur. Die Temperatur, bei der ein flüssiger Stoff verdampft, heißt Verdampfungs- oder Siedetemperatur und, wenn der Vorgang umgekehrt verläuft, Verflüssigungs- oder Kondensationstemperatur. Der Schmelzpunkt des Eises liegt bei normalem Luftdruck bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, also liegt der Erstarrungspunkt des Wassers auch bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Blei z. B. schmilzt erst bei $327,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Flüssiges Blei wird demnach bei der gleichen Temperatur von $327,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ fest.

Der Schmelzpunkt jedes Stoffs liegt fest und ist gleichzeitig der Erstarrungspunkt. Der Verdampfungspunkt eines jeden Stoffs liegt ebenfalls fest und ist gleichzeitig der Verflüssigungspunkt.

Wasser verdampft z. B. bei normalem Luftdruck, also bei $1.013(,25)\text{ hPa}$, bei einer Temperatur von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das bedeutet, das Wasser entwickelt bei dieser Temperatur einen Dampfdruck, der dem atmosphärischen Normluftdruck von 1.013 hPa entspricht. Wasserdampf, der unter einem Druck von 1.013 hPa steht, kondensiert auch wieder bei $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es gibt Stoffe, die erst bei sehr hohen Temperaturen verdampfen; Glycerin z. B. verdampft erst bei $290\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das bedeutet, dass diese Stoffe erst bei diesen hohen Temperaturen den Dampfdruck von 1.013 hPa entwickeln.

Es gibt jedoch Stoffe, die schon bei sehr niedrigen Temperaturen verdampfen. Sauerstoff z. B., den wir uns flüssig kaum vorstellen können, verdampft schon bei $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ammoniak bei

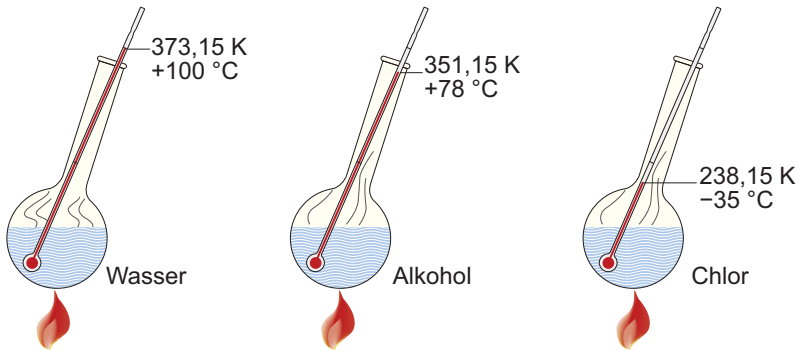


Abb. 2.9
Verdampfungs-
bzw. Verflüssi-
gungstemperatu-
ren verschiedener
Stoffe

–33,4 °C, Kohlenstoffdioxid bei –78,5 °C, Chlor bei –35 °C und das Kältemittel R 134a bei –26,2 °C. Das bedeutet, dass diese Stoffe schon bei Temperaturen weit im Minusbereich einen Dampfdruck von 1.013 hPa entwickeln. Umso höher ist ihr Dampfdruck dann bei Raumtemperatur.

Diese Stoffe „kochen“ also bei Temperaturen, die weit unter dem Gefrierpunkt liegen. Wie bereits gesagt, beziehen sich die vorgenannten Verdampfungspunkte auf einen Druck von 1.013 hPa. Ändert sich der Druck, der auf einer Flüssigkeit lastet, dann verschiebt sich der Verdampfungspunkt auf der Temperaturskala.

Wasser verdampft bei Normaldruck bei einer Temperatur von +100 °C. Erwärmt man jedoch einen offenen Topf voll Wasser auf dem Gipfel eines 3.000 m hohen Berges, dann stellt man fest, dass das Wasser schon bei +89 °C kocht, also verdampft. Bekanntlich ist die Luft in höheren Lagen dünner, der auf der Wasseroberfläche lastende Druck ist also niedriger. Daraus erklärt sich die Tatsache, dass das Wasser schon bei niedrigerer Temperatur siedet. Es muss nämlich nicht einen so großen Dampfdruck aufbauen.

Interessante Ergebnisse zu dieser Problematik erhält man aus folgendem Versuch (Abb. 2.10 und 2.11):

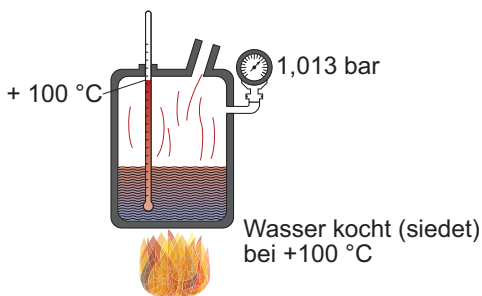


Abb. 2.10 Bei einem absoluten Druck von 1,013 bar siedet Wasser bei +100 °C.

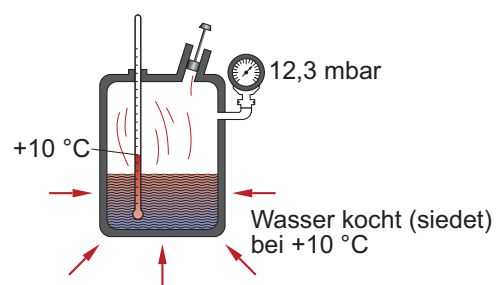


Abb. 2.11 Bei einem absoluten Druck von 12,3 hPa siedet Wasser bei +10 °C.

Ein druckfestes Glasgefäß wird mit Wasser gefüllt. Mit einer Pumpe im Deckel kann man den Luftdruck im Gefäß beliebig verändern. Ein Manometer zeigt den absoluten Druck im Gefäß und ein Thermometer die Temperatur des Wassers an. Mit einer Flamme wird nun das Wasser

erwärmt. Vorher wurde der Luftdruck auf die Wassersäule durch Abpumpen auf 73,15 hPa abgesenkt. Dies ist gegenüber dem normalen Luftdruck von 1.013 hPa schon ein sehr niedriger Druck. Beobachtet man nun das Wasser im Behälter, so stellt man fest, dass es schon bei einer Erwärmung auf +40 °C zu kochen beginnt. Die Verdampfungstemperatur bei 73,15 hPa liegt also bei +40 °C. Wohlgemerkt ist nur der Druck, der direkt auf der Flüssigkeit lastet – also der Druck im Gefäß – wichtig; der Außendruck spielt keine Rolle. Je nachdem, wie man nun mit Hilfe der Pumpe den Luftdruck einstellt, erhält man verschiedene Verdampfungstemperaturen. Bei einem Druck von nur 12,3 hPa (das ist ein außerordentlich niedriger Druck und mit einer einfachen Pumpe gar nicht herzustellen) kocht das Wasser schon bei +10 °C, man braucht dazu gar keine Heizflamme mehr, denn das Wasser nimmt seine Wärme aus der Umgebungsluft, wenn diese wärmer als +10 °C ist (Abb. 2.11).

Stellt man im Gefäß hingegen einen starken Überdruck her, beispielsweise 4,78 bar, dann fängt das Wasser erst bei einer Temperatur über +100 °C, in diesem Fall bei +150 °C an zu verdampfen. Man sieht also, dass der Verdampfungspunkt des Wassers vom Druck, der auf dem Wasser lastet, abhängig ist.

Die Verdampfungs- oder Kondensationstemperatur jedes Stoffs ist vom Druck abhängig. Für jede Verdampfungstemperatur gibt es nur einen zugehörigen Verdampfungsdruck und für jeden Verdampfungsdruck gibt es nur eine zugehörige Verdampfungstemperatur. Mit zunehmendem Druck steigt die Verdampfungstemperatur. Der Normsiedepunkt wird für 1,01325 bar = 1.013,25 hPa bestimmt.

Tab. 2.8 Siedepunkt von Wasser bei verschiedenen Drücken

Temperatur °C	Druck in	
	bar	mbar (hPa)
–20	0,00103	1,03
–10	0,0026	2,60
0	0,00611	6,11
10	0,01227	12,27
15	0,01704	17,04
20	0,02337	23,37
50	0,12335	123,35
100	1,01325	1.013,25
120	1,99	1.990,0
150	4,78	4.780,0
200	15,58	15.580,0
320	109,83	109.830,0
374	221,2	221.200,0

4 Kälteanlagen

4.1 Die Hauptteile einer Kälteanlage

Mithilfe einer Kälteanlage wird Wärme von einer Stelle mit niedrigem Temperaturniveau (Kühlstelle) zu einer Stelle mit höherem Temperaturniveau (Umgebung) transportiert. Die Wärme muss also entgegen der natürlichen Flussrichtung (siehe Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik) bewegt werden. Die Kälteanlage nach dem Kaltdampfkomppressionsprinzip benötigt dazu bekanntlich vier Hauptteile:

1. Verdampfer: Wärme aufnehmender Apparat, Wärmeübertrager. Hier nimmt das Kältemittel bei niedrigem Druck (Verdampfungsdruck p_0) und niedriger Temperatur (Verdampfungstemperatur t_0) Wärme durch Verdampfen auf.
2. Verdichter: Druck erhöhende Maschine. Nach der Druckerhöhung liegt der Verflüssigungspunkt oberhalb der Temperatur der Umgebung, an die die aufgenommene Wärme wieder abgegeben werden soll.
3. Verflüssiger: Wärme abgebender Apparat, Wärmeübertrager. Hier gibt das Kältemittel bei hohem Druck (Verflüssigungsdruck p_c) und hoher Temperatur (Verflüssigungstemperatur t_c) Wärme durch Verflüssigen ab.
4. Drosselorgan: Druck absenkendes Bauteil. Der Druck wird wieder auf Verdampfungsdruck p_0 gesenkt. Dabei verdampft schon ein Teil der vorher warmen Flüssigkeit und das Gemisch aus Flüssigkeit und Dampf kühlt sich dadurch auf Verdampfungstemperatur t_0 ab.

Die Aufgabe einer Kälteanlage kann man auch mit der Aufgabe einer Pumpstation vergleichen. Verbindet man z. B. zwei Gewässer mit verschiedenem Höhenniveau, dann fließt das Wasser des höheren Beckens von selbst in das tiefere. Soll jedoch Wasser aus dem tieferen Becken zurück in das höhere gebracht werden, dann ist dazu Energie erforderlich, z. B. für eine Pumpe. Ähnlich ist es bei einer Kälteanlage. Am Verdampfer herrscht die niedrigste Temperatur, sodass er Wärme von der Kühlstelle (z. B. Kühlraum) aufnehmen kann. Ständig fließt aber Wärme aus der Umgebung in den Kühlraum nach. Um die tiefe Temperatur der Kühlstelle konstant zu halten, muss also dort dauernd Wärme aufgenommen und zum Verflüssiger transportiert werden. Am Verflüssiger wird die aufgenommene Wärme wieder freigegeben. Da die Verflüssigung aber oberhalb der Umgebungstemperatur stattfinden muss, damit ein Wärmestrom vom kondensierenden Kältemittel an das Kühlmittel (Luft, Wasser) fließen kann, muss der Verflüssigungsdruck (und damit die Verflüssigungstemperatur) so weit angehoben werden, bis eine auskömmliche Temperaturdifferenz herrscht. Insofern transportiert die Kälteanlage Wärme entgegen ihrer natürlichen Fließrichtung, nämlich vom Kalten zum Warmen. Aber das ist kein Widerspruch zum Zweiten Hauptsatz, weil es ja nicht von selbst geschieht, sondern nur unter Zufuhr von Hilfsenergie, nämlich der Verdichtungsarbeit. Der Verdichter schiebt also ähnlich wie die Pumpe, die Wasser gegen das natürliche Gefälle befördert, Wärme gegen ihr natürliches Gefälle dahin zurück, wo sie hergekommen ist, nämlich an die Umgebung.

Eine Kälteanlage hat also die Aufgabe, Wärme an einer Stelle wegzunehmen und an einer anderen wieder freizugeben. Dazu benötigt sie vier Hauptteile, in denen die notwendigen Zustands-

änderungen für den Kreisprozess ablaufen, sowie die nötigen Rohre. Meist ist auch ein Kältemittelsammler vorhanden (Abb. 4.1):

1. Verdichter (mit Antrieb)
2. Verflüssiger
3. Drosselorgan
4. Verdampfer
5. Rohrleitungen
6. Flüssigkeitssammler

Dazu kommt noch das im System zirkulierende Kältemittel.

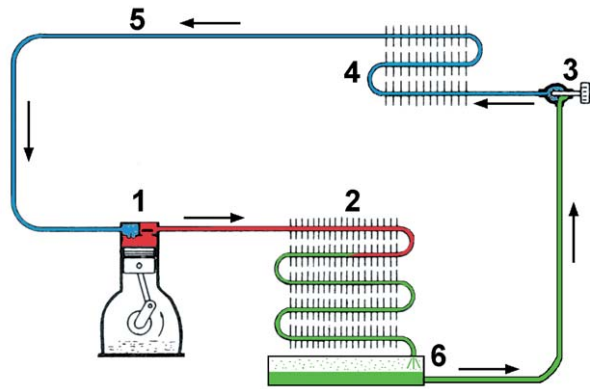


Abb. 4.1 Die Bestandteile einer Kälteanlage

4.2 Der Verdichter

Im Verdichter wird das dampfförmige Kältemittel mit niedrigem Druck angesaugt und auf einen höheren Druck verdichtet. Es gibt Verdichter mit hin- und hergehenden Kolben (Hubkolbenverdichter) und solche mit rotierenden Kolben. Letztere werden auch Rotationskolben- oder Umlaufverdichter genannt. In jedem Fall wird das Kältemittelgas durch einen festen Körper aus dem Verdichtungsraum verdrängt. Anders als bei diesen Verdrängungsverdichtern erfolgt bei den Strömungsverdichtern die Druckerhöhung durch Beschleunigen in einem Laufrad (Turbo) und anschließendes Umwandeln dieser Bewegungsenergie in Druckerhöhung. Die folgende Grafik bietet einen Überblick über die Bauarten:

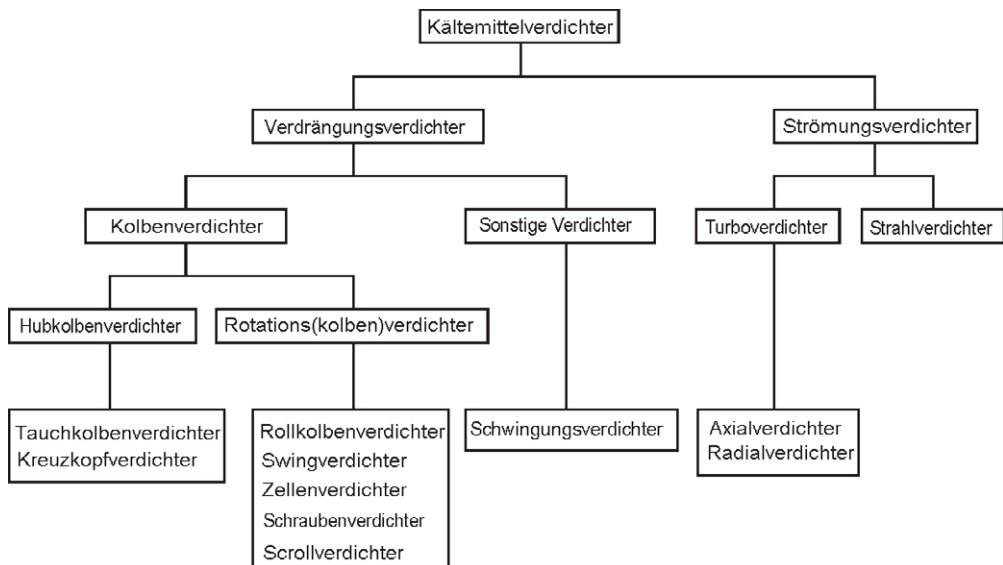


Abb. 4.2 Übersicht über Verdichterbauarten

In der gewerblichen Anwendung wird der Hubkolbenverdichter mit hin- und hergehenden Kolben am häufigsten verwendet. Kleine hermetische Hubkolbenverdichter finden wir auch in Haushaltskühlgeräten und kleinen Verflüssigungssätzen, sehr große offene Verdichter in Industrieanwendungen. Rollkolbenverdichter findet man in der Klimatechnik, Scrollverdichter sowohl in der Gewerbekälte als auch im Klimabereich. Schraubenverdichter findet man ebenfalls in beiden Bereichen. Für die ganz großen Wasserkühlsätze kommt der Turboverdichter zum Einsatz. Einen Überblick über die Leistungsbereiche gibt die folgende Tabelle.

Tab. 4.1 Überblick über Verdichtergrößen

Bauart	Hubvolumenstrom in m ³ /h, ca.
Scrollverdichter	bis 100
Hubkolbenverdichter	bis 1.500
Schraubenverdichter	50 bis 10.000
Turboverdichter	500 bis über 10.000

Die Unterscheidung in offene, halbhermetische und hermetische Verdichter hat mit der Bauart des Verdichters nichts zu tun. Diese Bezeichnung der Bauform bezieht sich nur auf das Verhältnis von Verdichter und Antriebsmotor:

Tab. 4.2 Überblick über Verdichterbauformen

offene Verdichter	halbhermetische Verdichter	(voll)hermetische Verdichter
Der Antrieb des Verdichters erfolgt mit separatem Motor. Deswegen wird das Kurbelgehäuse des Verdichters von der Kurbelwelle durchstoßen (= offen). Sie ragt an einem Ende heraus. Dort muss der Antrieb angeschlossen werden.	Auch Motorverdichter genannt. Antriebsmotor (Elektromotor) und Verdichter sind in einem Gehäuse, das jedoch geöffnet werden kann. Dadurch sind Reparaturen am Verdichter und am Elektromotor möglich.	Verdichter und Elektromotor befinden sich in einem verschweißten Gehäuse (Kapsel), das nicht geöffnet werden kann. Die Kapsel kann nur als Ganzes ausgetauscht werden.



Abb. 4.3 Offener Verdichter (GEA Grasso)



Abb. 4.4 Halbhermetischer Verdichter (GEA Bock)



Abb. 4.5 Hermetischer Verdichter (Bristol)

4.2.1 Kenngrößen des Verdichtungsprozesses

4.2.1.1 Wirkungsweise eines Hubkolbenverdichters

Die Skizzen a bis f in Abb. 4.6 zeigen die Wirkungsweise eines Hubkolbenverdichters.

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 (a).

Hat der Kolben seinen unteren Totpunkt (den unteren Punkt, an dem er seine Bewegungsrichtung ändert) überschritten, beginnt der Zylinderdruck durch Verdichtung des Kältemittels

wieder anzusteigen. Das Einlassventil schließt sich; es wird also kein Kältemittel mehr angesaugt. Das Auslassventil bleibt aber auch noch geschlossen, da der Druck der Hochdruckseite (Verflüssigungsdruck) noch erheblich höher ist als der Zylinderdruck (b).

Der nun folgende Vorgang wird Verdichtung bzw. Kompression genannt. Das Kältemittel wird hierbei in dem völlig geschlossenen Zylinderraum vom Niederdruck (Verdampfungsdruck p_0) auf den Hochdruck (Verflüssigungsdruck p_c) komprimiert (c).

Wenn der Zylinderdruck den Verflüssigungsdruck leicht überschritten hat (um den Ventillfederdruck), öffnet sich das Auslassventil und die hochgespannten Gase im Zylinder werden ausgestoßen (d). Sowohl Einlass- als auch Auslassventil (Saugventil und Druckventil) werden also durch die anliegende Druckdifferenz gesteuert, sie sind nicht zwangsgesteuert. Das nennt man Flatterventil.

Da die Saugventile unterhalb der Ventilplatte einen gewissen Raum beanspruchen, also der Kolben einen gewissen Sicherheitsabstand von der Ventilplatte halten muss und zusätzlich etwas Druckgas im Druckventilschacht der Ventilplatte verbleibt, kann der Kolben nicht das gesamte hochgespannte Gas hinausdrücken. Ein Teil bleibt in diesem sogenannten **schädlichen Raum** zurück (e). Diese Restgasmenge entspannt sich nun wieder, wenn der Kolben seinen oberen Totpunkt überschritten hat und sich nach unten bewegt (f). Diese sogenannte **Rückexpansion** verringert das effektive Zylindervolumen und damit den tatsächlichen Hubvolumenstrom, der also kleiner ist als der aus der Geometrie des Zylinderraums zu berechnende Hubvolumenstrom¹⁾. Erst wenn der Zylinderdruck wieder unter den Druck der Saugleitung gefallen ist, beginnt der Ansaugvorgang von Neuem.

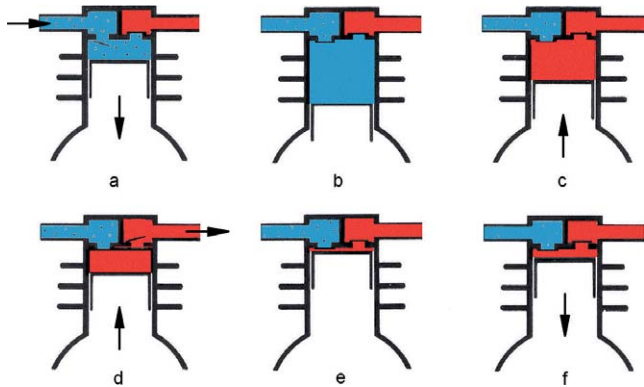


Abb. 4.6 Wirkungsweise eines Hubkolbenverdichters: Saughub (a), unterer Totpunkt (b), Verdichtungshub (c), Ausschleiben (d), oberer Totpunkt (e), Rückexpansion (f)

¹⁾ Dieses Verhältnis von tatsächlichem zu theoretischem Fördervolumenstrom wird als Liefergrad λ („Lambda“) bezeichnet.

4.3 Der Verflüssiger

Mit einer Kälteanlage wird Wärme von einem Ort, an dem sie unerwünscht ist, zu einem Ort transportiert, wo sie nicht stört. Jenes Bauelement im Kältesystem, an dem die im Verdampfer aufgenommene Wärme einschließlich des Wärmewertes der Verdichterarbeit abgegeben wird, nennt man Verflüssiger. Im Verflüssiger wird das gasförmige, überhitzte Kältemittel auf die Verflüssigungstemperatur gekühlt und dann verflüssigt. Da dem Kältemittel wie jedem anderen Stoff beim Verflüssigen Wärme entzogen wird, muss der Verflüssiger diese Wärme an ein ihn umgebendes Kühlmedium (Luft oder Wasser) abgeben. Das Kältemittel durchströmt dabei drei Zonen (Abb. 4.38):

1. In der ersten Zone wird das überhitzte gasförmige Kältemittel durch Abfuhr der Überhitzungswärme auf die Verflüssigungstemperatur abgekühlt (sensible Wärme) – Enthitzungszone.
2. In der zweiten Zone wird es durch Abfuhr der Verflüssigungswärme bei konstanter Temperatur (latente Wärme) in den flüssigen Zustand überführt – Verflüssigungszone.
3. In der dritten Zone wird das flüssige Kältemittel unter die Verflüssigungstemperatur abgekühlt (sensible Wärme); es wird unterkühlt – Unterkühlungszone.

In allen drei Zonen ist der Druck konstant (Verflüssigungsdruck p_c). Er ändert sich erst wieder am Drosselorgan. Das Kältemittel verlässt den Verflüssiger im flüssigen Zustand und steht nach Druckabsenkung innerhalb des Kreisprozesses somit wieder zur Kälteerzeugung durch Verdampfen zur Verfügung. Man unterscheidet nach dem Kühlmedium im Allgemeinen drei Verflüssigerarten (Abb. 4.39).

Eine Zwitterform bildet der in den letzten Jahren im Zuge der Renaissance von CO_2 als Kältemittel

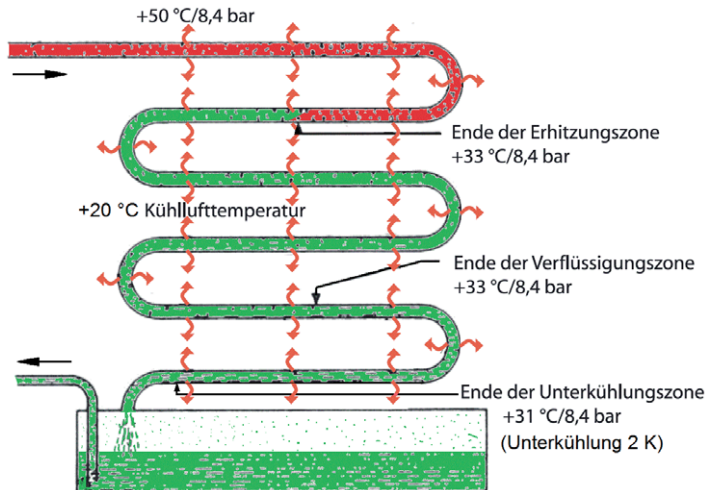


Abb. 4.38 Wirkungsweise eines luftgekühlten Verflüssigers (Werte für R 134a)

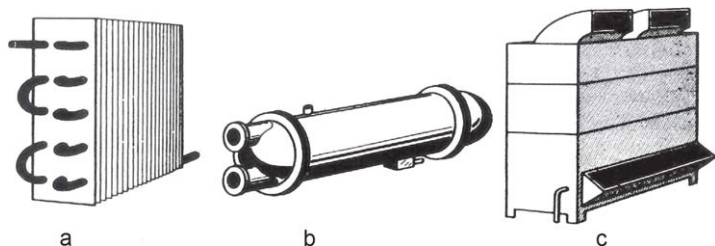


Abb. 4.39 Allgemeine Verflüssigerarten: luftgekühlte Verflüssiger (a), wassergekühlte Verflüssiger (b), Verdunstungs-Verflüssiger (c)

entwickelte Hybrid-Verflüssiger. Dabei handelt es sich um einen luftgekühlten Verflüssiger, der mit einem Wasser-Sprühsystem ausgestattet ist, das nur bei hohen Außentemperaturen zum Einsatz kommt, um ein übermäßiges Ansteigen der Verflüssigungstemperatur zu verhindern. Das über die Lamellen gesprühte Wasser kühlt dadurch, dass es verdunstet (adiabate Verdunstungskühlung) (Abb. 4.40). Das macht allerdings eine Wasseraufbereitung erforderlich, weil sonst je nach Wasserhärte die Leistung des Verflüssigers durch Verkalkung mit der Zeit erheblich nachlässt.



Abb. 4.40 Hybrid-Verflüssiger (LU-VE) in V-Form für große Leistungen im Megawatt-Bereich. 14 Ventilatoren sorgen für kräftige Konvektion. Bei hohen Außentemperaturen kann Wasser über das außen angebrachte Rohrsystem versprüht werden, sodass durch die Verdunstung ein übermäßiges Ansteigen der Verflüssigungstemperatur verhindert wird.

4.3.1 Luftgekühlte Verflüssiger

4.3.1.1 Verflüssigungstemperatur und Umgebungstemperatur

Im luftgekühlten Verflüssiger wird die Verflüssigungswärme des Kältemittels an die Umgebungsluft abgegeben (Abb. 4.38). Der Verflüssigungsdruck – und damit auch die Verflüssigungstemperatur – ergibt sich aus dem Zusammenwirken verschiedener Faktoren. Immer muss jedoch der Verflüssigungsdruck so hoch sein, dass die Verflüssigungstemperatur über der Umgebungstemperatur der Luft liegt, da sonst keine Wärme vom Verflüssiger an die Umgebungsluft abfließen kann. Ist die Umgebungstemperatur der Luft z. B. 25 °C, dann muss die Verflüssigungstemperatur höher sein als 25 °C. Aus der Kältemitteltabelle für R 134a kann man ablesen, dass der Verflüssigungsdruck bei diesen Bedingungen oberhalb 6,65 bar liegen muss, denn 6,65 bar ist der Verflüssigungsdruck, der zu einer Temperatur von +25 °C gehört.

Um sich diese Verhältnisse bei der Wärmeabgabe vor Augen zu führen, lohnt es sich, einmal einen Anfahrvorgang zu betrachten: Dazu gehen wir davon aus, dass die Kälteanlage nach längerer Stillstandsphase völligen Druckausgleich hat. Damit herrscht in ihr überall ein Druck, der dem Sättigungsdruck des Kältemittels bei der Temperatur des kältesten Teils der Anlage entspricht. Wenn die Anlage in einem Maschinenraum steht, der 20 °C hat, herrscht also bei R 134a ein Druck von 5,7 bar (lt. Dampftafel) in der gesamten Anlage, obwohl der Verflüssiger draußen in einer Umgebung von 25 °C steht. Der Verdichter läuft an und schiebt von nun an fortlaufend Kältemitteldampf in Richtung Verflüssiger, wodurch dort der Druck steigt. Bis der Druck von

6,65 bar erreicht ist, kann es noch nicht zur Verflüssigung kommen. Das heiße Druckgas wird bestenfalls bis auf 25 °C abgekühlt, kann aber unterhalb 6,65 bar nicht den Aggregatzustand ändern. Erst wenn dieser Druck überschritten wird, fließt latente Wärme ab und die Verflüssigung setzt ein. Bei einem Druck von 6,85 bar (zu 26 °C gehörend), also bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin, verflüssigt ein bisschen Kältemittel, aber der abfließende Wärmestrom $\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T$ (Wärmestrom beim Wärmeübergang, siehe Kapitel 2.11) ist aufgrund der geringen Temperaturdifferenz ΔT noch sehr klein. Er ist viel kleiner als der in Form frisch vom Verdichter gelieferten heißen Druckgases zufließende Wärmestrom. Der Druck steigt also weiter, und zwar so lange, bis ein Gleichgewicht herrscht zwischen dem zufließenden und dem abfließenden Wärmestrom. Dann schiebt der Verdichter genau so viel Masse an Kältemittel-Druckgas nach, wie verflüssigt und als Kältemittel-Flüssigkeit abfließt – der Druck bleibt konstant. Die zugehörige Temperaturdifferenz erhalten wir durch Umstellen der Gleichung für den Wärmeübergang $\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T$ nach ΔT

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{A \cdot U}$$

Welche Temperaturdifferenz sich einstellt, hängt also von mehreren Faktoren ab, von

1. dem abzuführenden Wärmestrom $\dot{Q}$ (abhängig von der Kühlaufgabe und den Rahmenbedingungen)
2. der Wärmeübertragungsfläche A des Verflüssigers
3. dem U -Wert des Verflüssigers

Man erkennt, dass eine größere Verflüssigeroberfläche A zu einer kleineren Temperaturdifferenz ΔT führt. Mit einer großen Fläche liegt die Verflüssigungstemperatur also nur wenig über der Umgebungstemperatur und der Verflüssigungsdruck bleibt relativ niedrig. Je niedriger aber der Verflüssigungsdruck ist, umso energieeffizienter (große Kälteleistungszahl) und somit wirtschaftlicher (geringere Betriebskosten) arbeitet die gesamte Kälteanlage.

Eine große Verflüssigeroberfläche hält den Verflüssigungsdruck und damit die Betriebskosten niedrig.

Nun kann man allerdings die Verflüssigungsoberfläche nicht unbegrenzt vergrößern, denn das würde die Anlage sehr verteuern, ohne dass noch erheblich an Leistung gewonnen wird. Man wählt deshalb in der Praxis die Verflüssigungsoberfläche so, dass sich eine Verflüssigungstemperatur ergibt, die ca. 12–15 K über der Temperatur der Umgebungsluft liegt.

Wählt man die Oberfläche kleiner, dann wird diese Temperaturdifferenz größer; die Verflüssigungstemperatur wird höher liegen und der Verdichter gegen einen höheren Gegendruck arbeiten. Dadurch wird er mehr Antriebsleistung benötigen (Kosten).

Eine ungenügend große Verflüssigungsoberfläche erhöht die erforderliche Verdichterantriebsleistung, da der Verdichter gegen einen sehr hohen Druck arbeiten muss.

Da Wärme bekanntlich nur von einem Körper höherer Temperatur zu einem mit niedrigerer Temperatur fließen kann, muss, wie schon angeführt, die Verflüssigungstemperatur immer hö-

her sein als die Temperatur der Umgebungsluft. Da man aber die Verflüssigungstemperatur wegen der Betriebskosten der Gesamtanlage möglichst niedrig halten will, muss man dafür sorgen, dass die Temperatur der Verflüssigerkühlluft möglichst niedrig ist.

Der luftgekühlte Verflüssiger muss an einem Platz aufgestellt werden, an dem die Kühlluft möglichst niedrige Temperatur hat und wo die sich am Verflüssiger erwärmende Luft gut abströmen kann.

Es ist also ungünstig, luftgekühlte Verflüssiger in sehr warmen Räumen oder in der Sonne aufzustellen. Es ist ferner falsch, sie in niedrigen Ecken und Nischen, unter Treppen oder in sehr kleinen Räumen ohne ausreichende Lüftungsmöglichkeiten zu installieren. Keller sind oftmals zum Aufstellen luftgekühlter Verflüssiger ungeeignet, da nicht genügend Kühlluft vorhanden ist. Falls jedoch keine günstigeren Räume vorhanden sind, kann man durch zusätzliche Ventilatoren, die den Aufstellungsraum mit Kühlluft versorgen, abhelfen.

4.3.1.2 Störungen beim luftgekühlten Verflüssiger

Bei einem luftgekühlten Verflüssiger ist es wichtig, dass ein guter Wärmeübergang vom Kältemittel zur Luft gewährleistet ist. Dabei können verschiedene Störungen auftreten:

Verflüssigerverschmutzung

Sie verschlechtert den U-Wert. Dieser Wert wird kleiner, weil der Wärmeübergang außen am Rohr bzw. an der Lamelle behindert wird. In der Folge steigt die den Wärmestrom treibende Temperaturdifferenz ΔT , die Verflüssigungstemperatur und der Verflüssigungsdruck steigen ebenfalls. Durch den höheren Druck sinkt die Kälteleistungszahl, also steigen die Betriebskosten (um ca. 2,5 %, wenn die Verflüssigungstemperatur um 1 Kelvin steigt, s. Kapitel 4.2.1.3). Durch die nun höhere Temperatur des flüssigen Kältemittels vor dem Drosselorgan sinkt die Kälteleistung. Da die Anlage jetzt weniger Kälteleistung hat, benötigt sie mehr Zeit, um die erforderliche Wärmemenge abzuführen. Dadurch erhöht sich die Laufzeit der Anlage. Zwei Extremfälle können auftreten: Die Laufzeit steigert sich bis zum Dauerlauf und trotzdem wird der Kühlraum nicht richtig kalt. Im zweiten Extremfall kommt es zur Abschaltung der Anlage durch den Hochdrucksicherheitsschalter (Hochdruckstörung), weil der Verflüssigungsdruck zulässige Höchstwerte überschreitet.

Der luftgekühlte Verflüssiger muss stets sauber gehalten werden, um die wirtschaftliche Betriebsweise der Anlage zu gewährleisten. Ein verschmutzter Verflüssiger verursacht höhere Betriebskosten.

Lüfterschaden

Ein luftgekühlter Verflüssiger mit Ventilator hat einen wesentlich größeren U-Wert als ein Verflüssiger ohne Lüfter. Fällt der Lüfter aus, sinkt der U-Wert, weil der Wärmeübergang außen α_a (siehe Kapitel 2.11) zwischen dem Kühlmittel Luft und dem Rohr bzw. den Lamellen viel kleiner wird. Der abzuführende Wärmestrom ändert sich aber nicht, denn der Verdichter schiebt weiterhin Druckgas zum Verflüssiger. Also steigt der Verflüssigungsdruck und somit die Temperaturdifferenz ΔT . Die möglichen Folgen sind oben unter Verflüssigerverschmutzung beschrieben.