

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).

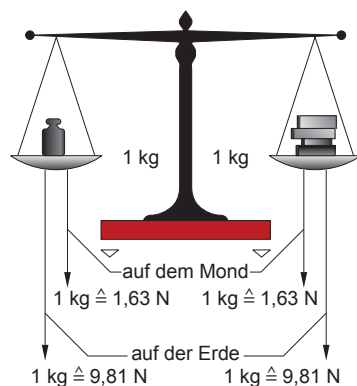


Abb. 2.5 Die Balkenwaage vergleicht Massen unabhängig vom Ort.

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

$$1 \text{ Mg} = 1 \text{ t}$$

$$1 \text{ t} = 1.000 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} = 1.000 \text{ g}$$

$$1 \text{ g} = 1.000 \text{ mg}$$

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.

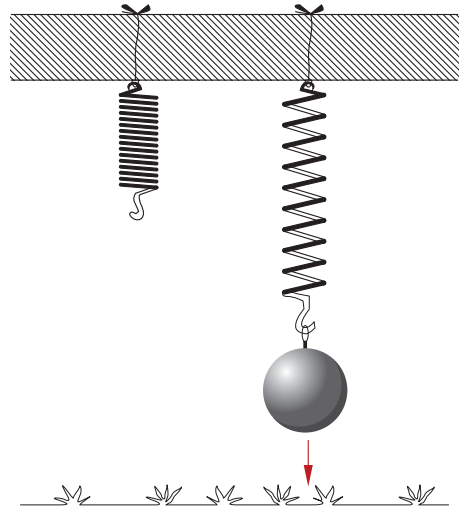


Abb. 2.6 An der Verlängerung der Feder erkennt man, dass eine Kraft wirkt. Diese Gewichtskraft ist proportional zur Masse m und zur Fallbeschleunigung g . Wegen der Erdabflachung würde die Feder sich an den Polen etwa 0,6 % stärker dehnen als am Äquator.

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. Die Änderung der Gewichtskraft interessiert nicht, wenn nach der Masse gefragt ist. Die Stücke,

die gewogen bzw. verglichen werden, brauchen nicht aus dem gleichen Stoff zu sein. Auch anderen Körpern, die die Waage zum Einspielen bringen, schreiben wir die gleiche Masse zu. Abb. 2.5 veranschaulicht den Unterschied zwischen Gewichtskraft und Masse. Die Masse von 1 kg entwickelt auf der Erde eine Gewichtskraft von 9,81 Newton, auf dem Mond nur etwa 1/6 davon, ca. 1,63 Newton.

Zwei Körper haben die gleiche Masse, wenn sie am gleichen Ort die gleiche Gewichtskraft entwickeln (gleich schwer sind). Die Balkenwaage vergleicht Massen.

2.4 Dichte, Masse, Volumen

Körper von gleichem Volumen können verschiedene Massen besitzen. So ist z. B. die Masse eines 1 dm³-Würfels aus Eisen bedeutend größer als die eines gleich großen Würfels aus Wasser (Abb. 2.7). Die beiden Stoffe unterscheiden sich durch ihre Dichte ρ („Rho“), das ist das Verhältnis der Masse des Körpers zu seinem Volumen. Um die Dichte zu berechnen, dividiert man die Masse m eines Körpers durch sein Volumen V .

Unter der Dichte ρ versteht man den Quotienten aus Masse und Volumen.

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}; \quad \rho = \frac{m}{V}$$

Die Dichte eines Stoffs ist wie die Masse m vom Ort unabhängig.

Die SI-Einheit ergibt sich somit zu kg/m³. Für feste und flüssige Stoffe wird meist die Einheit kg/dm³ gewählt, bei Gasen und Dämpfen kg/m³. So ergeben sich jeweils anschauliche Zahlenwerte. Die Dichte von Kupfer beträgt z. B. 8,93 kg/dm³, die von Luft bei Normaldruck und 0 °C beträgt 1,293 kg/m³.

Abgeleitete Einheiten der Dichte sind auch alle anderen Quotienten, die aus einer gesetzlichen Masseneinheit und einer gesetzlichen Volumeneinheit gebildet werden. Wegen des 1.000-er Umrechnungsfaktors sowohl bei Masse- als auch bei Volumeneinheiten ändert sich der Zahlenwert der Dichte eines Stoffs nicht, wenn man auf beiden Seiten des Bruchstrichs zur nächstgrößeren oder -kleineren Einheit wechselt:

$$1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{mm}^3}$$

Je größer die Masse von 1 dm^3 eines Stoffs ist, umso größer ist seine Dichte.

Häufig ist von einem Körper zunächst das Volumen bekannt, da es sich z. B. aus den Maßen berechnen lässt. Für weitere Berechnungen in der Thermodynamik wird aber die Masse benötigt. Diese kann mithilfe der Dichte berechnet werden:

$$\text{Masse} = \text{Dichte} \cdot \text{Volumen}; \quad m = \rho \cdot V \quad (\text{in kg})$$

Beispiel:

2.400 Liter Olivenöl sind zu kühlen. Wie groß ist die Masse des Öls?

Lösung: Die Dichte von Olivenöl beträgt laut Tabelle 2.5 $\rho = 0,92 \text{ kg/dm}^3$. Damit ergibt sich die Masse zu:

$$m = \rho \cdot V = 2.400 \text{ dm}^3 \cdot 0,92 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = \underline{\underline{2.208 \text{ kg}}}$$

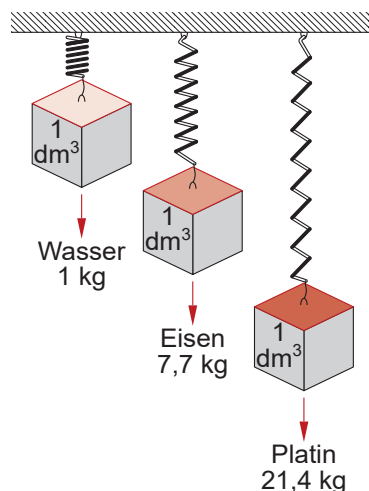


Abb. 2.7 Massen verschiedener Kubikdezimeterwürfel

2.5 Tabellen für Dichten

Tab. 2.2 Dichten von Metallen in kg/dm^3

Metall	Dichte ρ	Metall	Dichte ρ
Aluminium, rein	2,7	Neusilber	8,5
Blei	11,3	Nickel	9,0
Eisen und Stahl	7,7	Platin	21,4
Eisenguss	7,25	Rotguss	8,5
Gold	19,33	Silber	10,5
Kupfer	8,79 bis 8,94	Zink	7,1
Messing	8,6	Zinn	7,4

Tab. 2.3 Dichten von Bau- und anderen Stoffen in kg/dm^3

Bau- und andere Stoffe	Dichte ρ	Bau- und andere Stoffe	Dichte ρ
Beton	1,8 bis 2,5	Holz, Eichen	0,7 bis 1,3
Erde	1,34 bis 2,0	Kalkstein	2,46 bis 2,84
Glas	2,5 bis 3,0	Sandstein	2,2 bis 2,5
Granit	2,5 bis 3,1	Ton	1,8 bis 2,6
Holz, Tannen	0,4 bis 0,8	Ziegelmauerwerk	1,6

Tab.2.4 Dichten von Isolierstoffen in kg/dm³

Isolierstoffe	Dichte ρ	Isolierstoffe	Dichte ρ
Asphalt	1,1 bis 1,5	Kieselgur	0,4 bis 0,5
Bimsstein	0,37 bis 1,6	Korkstein	0,17 bis 0,25
Blätterholzkohle	0,18 bis 0,20	Korkstein, expandiert	0,135 bis 0,175
Heu und Stroh	0,10	Kunstharzschaumstoff	0,015 bis 0,03
Holzkohle, lufterfüllt	0,36 bis 0,4	Mineralfaser	0,05 bis 0,10
Holzkohle, luftfrei	1,3	Papier	0,7 bis 1,2

Tab.2.5 Dichten von Flüssigkeiten in kg/dm³

Flüssigkeiten	bei t in °C	Dichte ρ	Flüssigkeiten	bei t in °C	Dichte ρ
Alkohol	15	0,79	Mineralöle	20	0,85 bis 0,93
Äther	0	0,74	Olivenöl	15	0,92
Benzin	15	0,7	Quecksilber	20	13,55
Glycerin	15	1,27	R 134a	0 °C, 2,93 bar	1,29
Leinöl	15	0,94	Schwefelsäure, konz.		1,85
Malagaweine		1,02	Seewasser	15	1,02
Milch, Mager-	15	1,032	Terpentin		0,87
Milch, Voll-	15	1,028	Wasser	4	1

Tab.2.6 Dichten von gasförmigen Stoffen in g/dm³ oder kg/m³ im Normzustand: t = 0 °C; p = 1.013,25 hPa

Gas	Dichte ρ	Gas	Dichte ρ
Azetylen	1,171	Propan	2,00
Ammoniak	0,771	Sauerstoff	1,429
Butan	2,7	Schwefeldioxid	2,927
Helium	0,178	Stickstoff	1,250
Kohlenstoffdioxid	1,977	Wasserstoff	0,090
Luft	1,293	R 134a	4,55

Aufgaben 1

1. Was versteht man:
 - a) unter der Masse eines Körpers?
 - b) unter der Gewichtskraft eines Körpers?
2. Welches sind die Einheiten für:
 - a) die Masse?
 - b) die Gewichtskraft?
3. Was versteht man unter der Dichte eines Stoffs?
4. Wann haben zwei Körper gleiche Masse?
5. Wie nennt man die kleinsten Bausteine der Materie?
6. Was ist ein Molekül?
7. Wie viel Atome (Elemente) kennt man heute?
8. a) Welche Masse hat 1 dm^3 , 1 cm^3 , 1 m^3 Wasser bei 4°C ?
b) Welche Dichte hat also Wasser in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$, $\frac{\text{t}}{\text{m}^3}$?
9. 14 Liter Luft haben die Masse 18,1 g.
 - a) Wie groß ist ihre Dichte?
 - b) Welche Masse hat 1 m^3 Luft?
 - c) Welche Masse hat die Luft in einem Raum mit den Abmessungen:
8,75 m lang,
6,85 m breit,
3,40 m hoch?
10. Welches Volumen hat eine Styroporscheibe von 100 g? (Dichte = $0,017 \text{ g/cm}^3$)
11. Welche Masse hat eine Glasscheibe, die 1,16 m hoch, 61 cm breit und 2 mm dick ist? (Dichte = $2,6 \text{ g/cm}^3$)
12. $2,5 \text{ m}^3$ Sand sollen auf einem Lastwagen transportiert werden. (Dichte = $1,7 \text{ kg/dm}^3$)
Wie groß muss die Ladefähigkeit (t) des Lastwagens sein?
13. Ein Eisenklötzchen hat die Form einer quadratischen Säule mit der Grundkante 2,5 cm und der Höhe 10,3 cm. (Dichte = $7,85 \text{ g/cm}^3$)
Wie viel kg wiegt es?
14. Ein Balken hat die Masse 120 kg und die Abmessungen:
3,70 m lang,
25 cm breit,
20 cm dick.

Welche Masse hat ein Balken von derselben Dichte mit den Abmessungen:

4,20 m lang,

20 cm breit,

15 cm dick?

15. Bestimme aus Tabelle 2.7 die Dichte der betreffenden Stoffe:

Tab. 2.7 Masse und Rauminhalt verschiedener Stoffe

Stoff	Blei	Silber	Messing	Sand	Koks	Eis
Masse	34 g	420 g	340 g	9,8 kg	840 kg	45 g
Rauminhalt	3 cm ³	40 cm ³	40 cm ³	5 dm ³	0,6 m ³	50 cm ³

3 Thermodynamik

3.1 Allgemeines

Das Wissensgebiet der Thermodynamik wird oft auch Wärmelehre genannt. In der physikalischen Literatur ist jedoch die Bezeichnung Thermodynamik häufiger anzutreffen. Dieses Wort bezeichnet die Dinge, um die es dabei geht, besser als das Wort Wärmelehre. Bekanntlich kommt das Wort „Thermo“ aus dem Griechischen und bedeutet Wärme. In den Bezeichnungen Thermosflasche, Thermosbehälter usw. ist es ebenfalls zu finden. Dynamik ist die Lehre von den Bewegungen. Die Thermodynamik befasst sich also demnach mit „Wärmebewegungen“. Es handelt sich hierbei um Vorgänge, bei denen aus Bewegungen Wärme entsteht, oder Vorgänge, bei denen durch Wärme Bewegungen verursacht werden. Vielfach wird auch Wärme von einem Platz zu einem anderen bewegt, indem wir z. B. beim Heizen einem Körper Wärmeenergie zuführen oder beim Kühlen einem Körper Wärmeenergie entziehen. In beiden Fällen wechselt Wärmeenergie ihren Ort, wird bewegt. Bewegung ist überhaupt der Schlüsselbegriff für das Verständnis aller thermodynamischen Vorgänge. Im Grunde genommen ist das, was wir als Wärme empfinden, nichts Anderes als Bewegung. Die Moleküle eines Stoffs sind in Bewegung und je schneller diese Bewegung ist, umso höher ist die Temperatur. Das Wort Thermodynamik bezeichnet also den Kern der Dinge besser als das Wort Wärmelehre.

3.2 Die beiden Hauptsätze der Thermodynamik

3.2.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Zwei wichtige Gesetze der Thermodynamik werden als Erster und Zweiter Hauptsatz bezeichnet. Sie sind elementare Grundpfeiler des ganzen Wissensgebietes. Der Erste Hauptsatz besagt, dass man Arbeit in Wärme umwandeln kann und umgekehrt. Reibt man sich z. B. die Hände, dann wird die mechanische Arbeit der Muskeln in Wärme umgewandelt. Will man ein Fuhrwerk, welches bergab fährt, aufhalten, dann presst man einen Holzklotz (die Bremse) gegen das Rad. Dabei erwärmt sich der Bremsklotz, er kann sogar anfangen zu verkohlen. Die Bewegungsenergie des Fuhrwerks wird also durch Reibungsvorgänge in Wärme umgewandelt. Das Gleiche gilt bei den Bremsen moderner Kraftfahrzeuge. Bei längeren Bergabstrecken können die Bremsen sogar so heiß werden, dass sie in ihrer Wirkung nachlassen (Fading). Den gleichen Effekt, nämlich durch Reibung Wärme zu erzeugen, verwenden Naturvölker zum Anzünden eines Feuers.

Wärme ist eine Energieart. Aus einer Wärmemenge Q kann mechanische Arbeit W erzeugt werden, das zeigt z. B. die Dampfmaschine, bei der die durch Verbrennung gewonnene Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt wird. Arbeit kann aber auch in Wärme umgewandelt werden, und zwar durch Reibung.

Zu der Umwandlung mechanischer Energie in Wärme hat James Prescott Joule (1818 – 1889) ab 1843 seinen berühmten Jouleschen Versuch (Abb. 3.1) gemacht: Ein Fallgewicht überträgt seine Energie über eine Seilrolle auf ein Rührwerk in einem wärmeisolierten Behälter, der mit Wasser gefüllt ist. Das Fallgewicht hat durch seine Anfangsposition eine bestimmte Lageenergie und

verrichtet beim Absinken im Rührwerk Arbeit, die wiederum durch Reibung in Wärme umgewandelt wird. Durch die Temperaturerhöhung des Wassers konnte Joule die aus der Rührwerksarbeit (Reibarbeit) entstandene Wärmemenge Q berechnen und so das damals wichtige mechanische Wärmeäquivalent bestimmen. Dieser Umrechnungsfaktor von Arbeit in Wärme hat heute keine Bedeutung mehr, da, wie schon weiter oben erwähnt, durch das SI-System alle Energieformen die gleiche Einheit haben. Mit seinem Versuch lieferte Joule jedoch einen wichtigen Beitrag zum Energieerhaltungssatz, indem er zeigte, dass auch Wärme als eine Form von Energie aufzufassen ist. Damit erweiterte er den Energieerhaltungssatz über das Gebiet der Mechanik (Arbeit = Kraft · Weg) hinaus auf das Gebiet der Wärmelehre. Das zugrunde liegende Prinzip wird als Erster Hauptsatz der Wärmelehre bezeichnet:

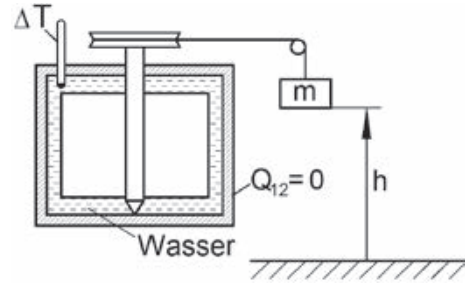


Abb. 3.1 Beim Jouleschen Versuch (Prinzip) wird die Lageenergie (Höhe h) eines Fallgewichts der Masse m über eine Seilrolle in Rührwerksarbeit umgewandelt, aus der durch Reibung Wärme entsteht. Diese führt zu einer Temperaturerhöhung ΔT des Wassers. $Q_{12} = 0$ bedeutet, dass von Zustand 1 zu Zustand 2, also während des Versuchs, keine Wärme durch die Behälterwandung strömt (Wärmedämmung).

Wärme und Arbeit sind gleichwertig (äquivalent): $Q = W$

Diese Erkenntnis wurde etwa zur gleichen Zeit vom deutschen Arzt Julius Robert Mayer (1814 – 1878) gewonnen. Er stellte keine Versuche an, sondern berechnete schon 1842 allein aufgrund vorliegender Messergebnisse anderer Forscher das mechanische Wärmeäquivalent. Seine Veröffentlichungen fanden aber kaum Beachtung.

Dass Wärme und mechanische Arbeit gleichwertig sind, wird also als Erster Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet. Es besteht danach keine Möglichkeit, eine Maschine zu bauen, die dauernd Arbeit verrichtet, ohne dass ein äquivalenter Betrag an gleicher oder anderer Energie verbraucht wird. Energie (Wärme, mechanische Arbeit) kann nur von der einen in eine andere Form umgewandelt werden, geht aber nicht verloren (siehe Gesetz von der Erhaltung der Energie, Kapitel 2.10.3). Umgekehrt kann keine Energie aus dem Nichts gewonnen werden.

3.2.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt eine allgemeine Erfahrungstatsache und klingt in seiner Allgemeinform sehr einfach und selbstverständlich. Dennoch ist er von außerordentlicher Bedeutung und in seiner mathematischen Formulierung ein Schlüssel zur Lösung vieler Probleme. Er behandelt die aus dem Alltag bekannte Tatsache, dass Wärme immer nur vom Warmen zum Kalten fließt, und zwar so lange, wie es einen Temperaturunterschied gibt. Denn bei diesem Vorgang kühlt sich der wärmere Körper ab, wenn ihm nicht weitere Energie zugeführt wird, während sich der kältere erwärmt. Dadurch wird die Temperaturdifferenz immer kleiner, bis der Wärmestrom zum Erliegen kommt (Temperaturgleichgewicht).

In einer einfachen Formulierung lautet der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik:

Wärme fließt von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur.

Dieser Satz sagt etwas über die Richtung natürlicher Vorgänge: Kein natürlicher Prozess, z. B. ein Abkühlprozess, kann rückgängig gemacht werden, ohne dass Veränderungen in der Umgebung zurückbleiben. Wenn ein Körper, der zunächst wärmer war, sich auf Umgebungstemperatur abgekühlt hat, wird er nicht von selbst wieder warm. Man müsste ihm Wärme zuführen und dazu Veränderungen in der Umgebung bewirken, z. B. eine Gasflamme benutzen, Gas verbrauchen usw.

Für die Richtung des Wärmeflusses ist immer nur die Richtung des Temperaturgefälles maßgebend. Ohne Temperaturgefälle gibt es keinen Wärmefluss. Aber immer, wenn ein Temperaturgefälle (und Wärmekontakt) vorhanden ist, findet automatisch ein Wärmefluss statt. Wärme tritt überhaupt nur in Erscheinung, wenn sie den Platz wechselt (fließt, strömt). Masse, Größe, Materialbeschaffenheit usw. der beteiligten Stoffe wirken sich nicht auf die Richtung des Wärmeflusses aus. Wenn sich irgendwo zwei Medien mit verschiedenen Temperaturen nähern, fließt immer Wärme vom wärmeren zum kälteren Medium. Stellt man beispielsweise eine Flasche Milch mit $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in die Nähe von Eis mit $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abb. 3.2), dann fließt Wärme von der Milch zum Eis, die Milch gibt Wärme ab und wird also dadurch gekühlt.

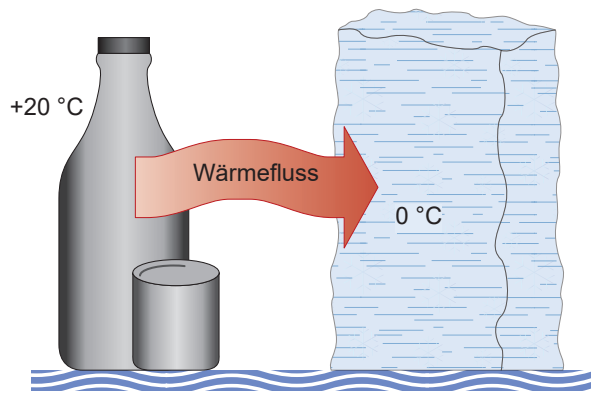


Abb. 3.2 Stellt man warme Milch in die Nähe von Eis, dann fließt die Wärme über zum Eis. Die Milch wird abgekühlt.

Wärme fließt immer zur kältesten Stelle. Kein Stoff kann Kälte ausstrahlen oder abgeben. Der Wärmefluss hört erst auf, wenn die beteiligten Stoffe die gleiche Temperatur haben.

Wenn man z. B. mit der Hand einen kalten Gegenstand berührt und die Hand sich abkühlt, also kalt empfindet, dann kommt das daher, dass Wärme von der Hand (höheres Temperaturniveau) abfließt und diese dadurch kalt wird. Die Richtung des Wärmeflusses geht aber – und das ist wichtig – von der Hand zum kälteren Gegenstand.

Der Zweite Hauptsatz hat unmittelbar Auswirkungen auf Prinzipien der Kälteerzeugung. Will man einem Raum Wärme entziehen, muss man ihn in Wärmekontakt mit einem kälteren Kör-

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.

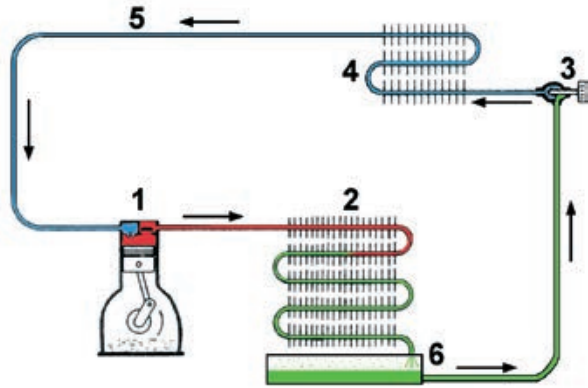


Abb. 4.1 Die Bestandteile einer Kälteanlage

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:

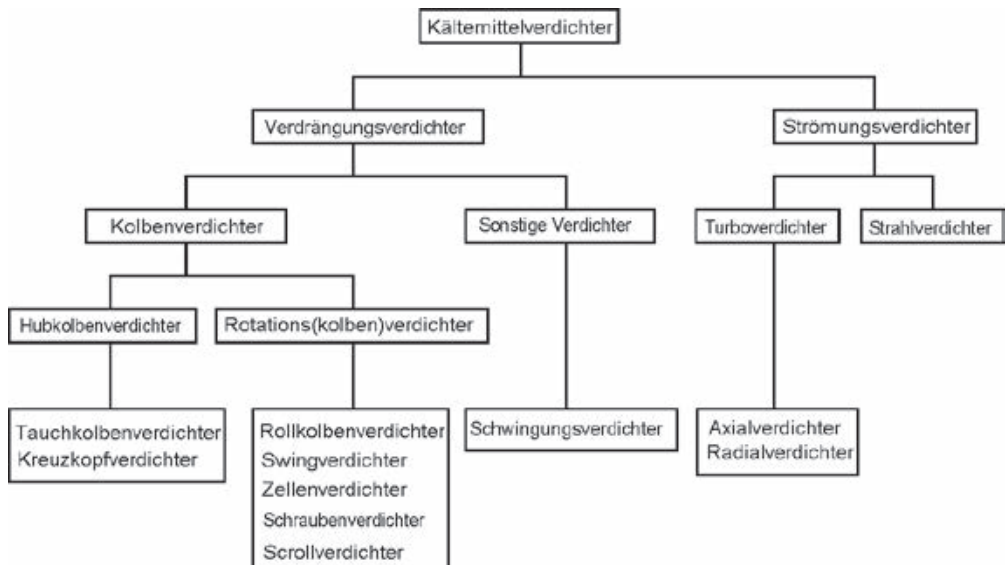


Abb. 4.2 Übersicht über Verdichterbauarten

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 Ventildruck), 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.

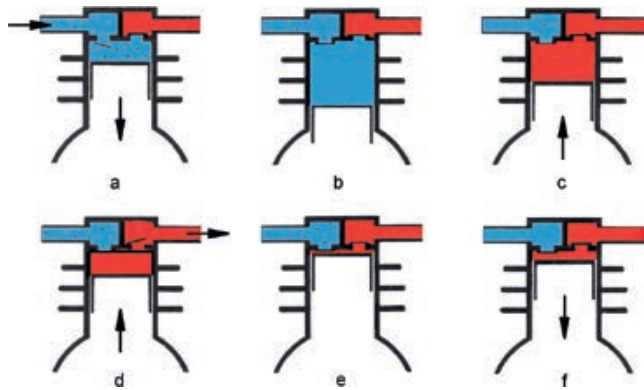


Abb. 4.6 Wirkungsweise eines Hubkolbenverdichters: Saughub (a), unterer Totpunkt (b), Verdichtungshub (c), Ausschleiben (d), oberer Totpunkt (e), Rückexpansion (f)

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