

10. Wärmeprozesse und die durch Wärme geleistete Arbeit

Rainer Hauser

April 2011

1 Einleitung

1.1 Die Energie eines Körpers

Die gesamte Energie eines Körpers setzt sich aus der kinetischen, der potenziellen und der inneren Energie zusammen. Die kinetische Energie ist die Bewegungsenergie in Bezug auf den Beobachter. Der Körper hat potenzielle Energie, weil eine Kraft auf ihn wirkt, was bei der Gravitationskraft zur gravitationellen potenziellen Energie oder Lageenergie führt. Die innere Energie besteht aus der kinetischen und potenziellen Energie der Atome und Moleküle.

1.2 Geordnete und ungeordnete Bewegung

Die kinetische Energie der Atome und Moleküle in Abhängigkeit von der Temperatur ist eine ungeordnete Bewegung. Um Wärme als Energieform für technische Anwendungen auszunutzen, muss man diese ungeordnete Bewegung in eine geordnete Bewegung umwandeln.

2 Reaktion der Materie auf Wärme

2.1 Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Wenn die innere Energie U eines Systems durch Arbeit W und Wärme Q verändert wird, muss nach dem Energieerhaltungssatz

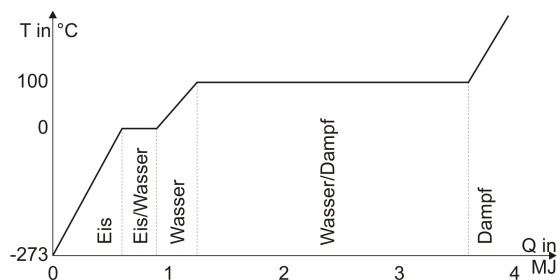
$$\Delta U = W + Q \quad (1)$$

gelten. Rührt man beispielsweise mit einem Löffel im heißen Tee, so nimmt die innere Energie um die Wärme Q ab, die an die Umgebung abgegeben wird, nimmt aber gleichzeitig um die mit dem Löffel am Tee verrichtete Reibungsarbeit W zu.

2.2 Wärmezufuhr mit und ohne Aggregatzustandsänderung

Führt man einem Körper Wärme zu, steigt einerseits die Temperatur und ändert andererseits der Aggregatzustand. Das folgende Temperatur-Wärme-Diagramm zeigt den Zusammenhang für 1 kg H_2O .

Beginnend mit Eis nahe dem absoluten Nullpunkt nimmt die Temperatur bis $0^\circ C$ zu. Jetzt schmilzt das Eis zu Wasser, ohne dass die Temperatur zunimmt. Erst, wenn alles Eis geschmolzen ist, steigt die Temperatur weiter bis zu $100^\circ C$. Während das Wasser verdampft, bleibt die Temperatur konstant. Ist alles Wasser verdampft, nimmt die Temperatur wieder zu.



Entzieht man dem Körper Wärme, läuft der Vorgang rückwärts ab. Es gibt also einerseits Phasen, in denen der Aggregatzustand nicht ändert, in denen sich aber die Temperatur ändert, und es gibt andererseits Phasen, in denen sich die Temperatur nicht ändert, in denen sich jedoch der Aggregatzustand ändert.

Der Aggregatzustand ändert nicht:

Der Zusammenhang zwischen der zugeführten Wärme Q und der Temperaturänderung ΔT lässt sich durch

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (2)$$

mit der *spezifischen Wärmekapazität* c , die sowohl vom Material als auch vom Aggregatzustand abhängt, als Proportionalität darstellen.

Der Aggregatzustand ändert:

Die Wärme Q , die es braucht, um den Aggregatzustand eines Körper zu ändern, lässt sich durch

$$Q = L \cdot m \quad (3)$$

mit der *spezifischen Schmelz- beziehungsweise Verdampfungswärme* L bestimmen. Die spezifische Schmelzwärme L_f und die spezifische Verdampfungswärme L_v hängen vom Material ab.

Wasser hat eine sehr grosse spezifische Wärmekapazität. Zudem gibt das Wasser von Teichen und Seen beim Gefrieren die so genannte Erstarrungswärme ans Wasser unter der entstehenden Eisschicht ab. Deshalb bekommen Seen wie der Zürichsee selten eine tragfähige Eisschicht, und es braucht schon eine Eiszeit, bis sie ganz zufrieren.

2.3 Mischprozesse

Mischt man Materialien mit verschiedenen Temperaturen, und nimmt man an, das Gemisch sei ein geschlossenes System, so lässt sich die Endtemperatur x des Gemischs berechnen. Gibt man beispielsweise 20 g -5°C kaltes Eis in ein Glas mit 2 dl 14°C warmem Wasser, so kühlt das Wasser um $\Delta T_1 = (14 - x)$ K ab, während das Eis erst um $\Delta T_2 = 5$ K auf 0° erwärmt wird, anschliessend schmilzt und zum Schluss nochmals um $\Delta T_3 = x$ K erwärmt wird. Weil das System als geschlossen betrachtet wird, muss die vom Wasser abgegebene Wärme $Q_{ab} = c_{Wasser} \cdot m_{Wasser} \cdot \Delta T_1$ gleich gross sein wie die vom Eis aufgenommene Wärme $Q_{zu} = c_{Eis} \cdot m_{Eis} \cdot \Delta T_2 + L_f \cdot m_{Eis} + c_{Wasser} \cdot m_{Eis} \cdot \Delta T_3$, die man aus (2) und (3) herleiten kann. Kennt man die Materialkonstanten $c_{Eis} = 2100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $c_{Wasser} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ und $L_f = 3.338 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, ist x die einzige unbekannte Grösse in der entstehenden Gleichung. Aufgelöst ergibt das, dass das Gemisch auf fast 5°C abgekühlt wird.

3 Wärmetransport

3.1 Wärmetransport durch Leitung

Hält man das eine Ende eines Eisenstabes ins Feuer, beginnen sich die Eisenatome dort stärker zu bewegen. Weil die Atome ständig mit den benachbarten Atomen kollidieren, breitet sich diese Bewegung mit der Zeit auf den ganzen Stab aus. Darauf basiert der Wärmetransport durch Leitung. Die im Zeitintervall Δt transportierte Wärme Q durch einen Körper der Länge d und der Querschnittsfläche A ist

$$\frac{Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (4)$$

in Abhängigkeit von der *Wärmeleitfähigkeit* λ des Materials und der Temperaturdifferenz ΔT .

Metalle leiten Wärme besser als andere Materialien. So ist die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer fast 200-mal grösser als diejenige von Glas. Für den Hausbau ist wichtig, dass Glas schlecht isoliert und Wärme etwa 10-mal besser leitet als Leichtbeton, sowie dass Luft mit normaler Luftfeuchtigkeit gut isoliert.

3.2 Wärmetransport durch Strömung

Wärme wird auch durch Strömung transportiert. An einem heissen Tag beispielsweise wird Land mehr erwärmt als Wasser, sodass die Luft über dem Land aufzusteigen beginnt, was zu einem Seewind führt, während es nachts umgekehrt ist, sodass dann ein Landwind weht. Diese so genannte Thermik kann man mit Segelschiffen und Segelfliegern ausnützen.

3.3 Wärmetransport durch Strahlung

Dass eine Herdplatte heiss ist, spürt man auch ohne sie zu berühren, indem man die Hand darüber hält, weil sie strahlt. Die Sonne wärmt uns ebenfalls durch Strahlung. Im Gegensatz zu Wärmetransport durch Leitung und Strömung ist Wärmetransport durch Strahlung auch durch ein Vakuum möglich.

Die Rate, mit der Wärme transportiert wird, hängt vom Typ Strahlung ab. Körper mit einer Temperatur in der Grössenordnung 10^6 K bis 10^8 K emittieren energiereiche Röntgenstrahlen, während Körper mit einer Temperatur im Bereich kleiner als 10 K energiearme Radiostrahlung aussenden. Weil im Alltag Temperaturen von 10 K bis etwa 1000 K vorherrschen, hat infrarote Strahlung für uns grosse Bedeutung.

Die Wirkung von Strahlung auf einen Körper hängt davon ab, ob der Körper die Strahlung reflektiert, durchlässt oder absorbiert. Schwarze Körper absorbieren mehr Licht als weisse, und Fensterglas lässt sichtbares Licht durch, absorbiert aber infrarote Strahlung, was bei Treibhäusern ausgenützt wird.

3.4 Isolation am Beispiel Thermosflasche

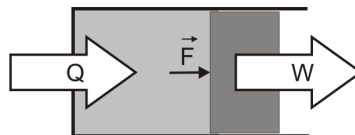
Die Thermosflasche ist so konstruiert, dass ein heisses Getränk möglichst lange heiss bleibt. Die Verluste durch Wärmetransport müssen also so klein wie möglich gehalten werden. Weil Wärme durch Leitung oder Strömung verloren geht, wird ein Vakuum um das Gefäss mit dem Getränk erzeugt. Die wenigen Berührungsstellen, die trotz allem nötig sind, werden durch eine Korksicht isoliert, die gemäss (4) kaum Wärme leitet. Das Gefäss für das Getränk ist innen mit einer reflektierenden Metallschicht versehen, damit auch möglichst wenig Wärme durch Strahlung verloren geht.

4 Technische Anwendungen

4.1 Umwandlung von Wärme in Arbeit

Zugeführte Wärme zeigt sich in der stärkeren thermischen Bewegung der Atome und Moleküle, falls sich der Aggregatzustand nicht ändert. Das ist eine ungeordnete Bewegung. Möchte man diese Form von Energie für Arbeit ausnützen, muss daraus eine geordnete Bewegung werden. Das ist möglich, wenn ein Teil der Wärme Q in Expansionsarbeit W umgewandelt wird.

Fügt man in der nebenstehenden Abbildung dem Gas im Zylinder die Wärme Q zu, dehnt es sich aus und drückt den beweglichen Kolben nach rechts.



Für die geleistete Expansionsarbeit W gilt $W = F \cdot s = p \cdot A \cdot s$, wobei F die Kraft, p der Druck, s die Verschiebung des Kolbens und A die Kolbenfläche ist.

Setzt man das Vorzeichen so, dass die Kompressionsarbeit positiv und die Expansionsarbeit negativ wird, bekommt man

$$W = -p \cdot \Delta V \quad (5)$$

mit der bewirkte Volumenänderung $\Delta V = A \cdot s$.

4.2 Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Bei einer Dampfmaschine beispielsweise wird nur der Teil Q_1 in Arbeit umgewandelt, während Q_2 als Wärme abgeführt wird. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre (1) besagt, dass $W = Q_1 - Q_2$ gilt, sodass der Wirkungsgrad $\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1$ ist. Gemäss dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre ist

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_k}{T_w} \quad (6)$$

der maximal mögliche Wirkungsgrad, wobei T_w die höhere Temperatur des Gases vor und T_k die tiefere Temperatur nach der Arbeit ist. Dass der maximale Wirkungsgrad kleiner als 100% ist, hat nichts mit unausgeiferter Technik zu tun, sondern ist eine fundamentale Beschränkung.

4.3 Der spezifische Heizwert eines Brennstoffs

Nicht jeder Brennstoff liefert gleich viel Wärme Q pro Kilogramm beim Verbrennen. Deshalb definiert man den *spezifischen Heizwert* H eines Brennstoffs durch

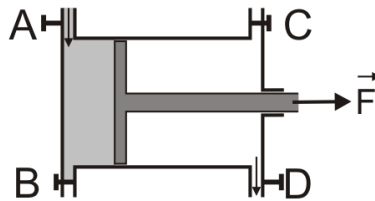
$$Q = H \cdot m$$

als abgegebene Wärme pro Masse m beim Verbrennen. Für Benzin ist $H = 4.4 \cdot 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4.4 Dampfmaschinen und Benzinmotoren

Die Dampfmaschine nützt aus, dass man mit Wärme Arbeit verrichten kann. In einem Wassertank wird Wasser erhitzt, und der entstehende Dampf wird durch eines der zwei Ventile A und C in der Abbildung unten in den Zylinder eingelassen. Die beiden Ventile werden abwechslungsweise geöffnet, weswegen man von einem Zweitaktmotor spricht.

Ist das Ventil A geöffnet, ist auch das Ventil D geöffnet. Durch das Ventil A strömt heisser Dampf unter Druck in den Zylinder und drückt den Kolben nach rechts und den Dampf vom vorhergehenden Takt durch das Ventil D nach draussen.



Ist das Ventil B geöffnet, ist auch das Ventil C geöffnet. Durch das Ventil B strömt heisser Dampf unter Druck in den Zylinder und drückt den Kolben nach links und den Dampf vom vorhergehenden Takt durch das Ventil C nach draussen.

Gemäss dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre (6) kann eine Dampfmaschine, der Wasserdampf mit $T_w = 800 \text{ K}$ zugeführt wird, und die nach der Expansionsarbeit Wasserdampf mit $T_k = 300 \text{ K}$ ablässt, nie mehr als einen Wirkungsgrad von 62.5% erzielen. Die riesige innere Energie im abgelassenen Wasserdampf kann nicht weiter genutzt werden.

Der Viertakt-Benzinmotor funktioniert ähnlich, aber in vier Takten. Im ersten Takt wird gasförmiges Benzin aus dem Vergaser in den Zylinder gefüllt. Im zweiten Takt wird das Gas komprimiert. Im dritten Takt wird das Gas durch die Zündkerze zur Explosion gebracht. Im vierten Schritt wird das übrig gebliebene Gas (also das Abgas) über den Auspuff abgeleitet.

4.5 Wärmepumpen und Kühlschränke

Wärme bewegt sich von selbst vom wärmeren zum kälteren Ort. Der Kühlschrank scheint dieser Tatsache zu widersprechen. Die folgenden vier Schritte beschreiben, wie Wärme vom kälteren Ort mit etwa -5° C (dem Innern des Kühlschranks) zum wärmeren Ort mit etwa 20° C (der Rückseite des Kühlschranks, wo sich die Kühlrippen befinden) transportiert werden kann.

1. Propan, das bei 1 bar Druck eine Siedetemperatur von -40° C hat, verdampft am kälteren Ort und nimmt dabei die Wärme Q_2 auf.
2. Das gasförmige Propan wird zum wärmeren Ort gepumpt und dort komprimiert, wodurch es etwa 60° C warm wird.
3. Das komprimierte Gas, das bei 9 bar Druck eine Kondensationstemperatur von 20° C hat, wird durch die Kühlrippen abgekühlt, bis es flüssig ist, wobei es die Wärme Q_1 abgibt.
4. Das flüssige Propan wird zum kälteren Ort zurückgepumpt, wobei die Temperatur durch die Expansion stark sinkt.

Dadurch, dass erstens Materie beim Kondensieren Wärme abgibt und beim Verdampfen Wärme aufnimmt, und dass zweitens die Siede- beziehungsweise Kondensationstemperatur vom Druck abhängt, lässt sich Wärme vom kälteren zum wärmeren Ort transportieren.