

Lösungen Kapitel Thermodynamik

1 Atome lieben Wärme, S. 103

Teste dein Wissen 1:

Beschreibe, wodurch sich ein heißer fester Körper von einem kalten unterscheidet.

- a) durch die Stärke der thermischen Bewegung
- b) durch das Volumen
- c) durch den Druck

Antwort:

Antwort a) „durch die Stärke der thermischen Bewegung“ ist richtig.

Die thermische Bewegung der Teilchen eines Körpers bestimmt eine wichtige Eigenschaft des Körpers, die Temperatur. Die Atome und Moleküle aller Stoffe weisen eine ständige, ungeordnete thermische Bewegung auf. Die Temperatur T eines Körpers ist ein Maß für die Stärke der thermischen Bewegung seiner Atome und Moleküle.

Bei höheren Temperaturen bewegen sich die Atome oder Moleküle in einem festen Körper schneller. Diese erhöhte Bewegung wird als stärkere thermische bzw. Brown'sche Bewegung bezeichnet.

Teste dein Wissen 2:

Kreuze die richtige Definition für den Begriff „Brown'sche Bewegung“ an.

- a) Bewegung von Molekülen
- b) Bewegung von Atomen
- c) Bewegung von kleinen Teilchen durch Stöße von Molekülen

Antwort:

Die richtige Definition für den Begriff „Brown'sche Bewegung“ ist:

c) „Bewegung von kleinen Teilchen durch Stöße von Molekülen“

Die Brown'sche Bewegung bezieht sich auf die zufällige Bewegung von kleinen Teilchen in einer Flüssigkeit oder einem Gas, die durch Stöße mit den umgebenden Molekülen verursacht wird. Diese Bewegung wurde nach dem schottischen Botaniker Robert Brown benannt, der sie im Jahr 1827 entdeckt hat und durch Albert Einstein sowie Marian Smoluchowski ausführlicher erklärt und quantitativ ausgearbeitet.

Teste dein Wissen 3:

Welche Phänomene lassen sich durch die Wirkung der Molekular-Kräfte erklären?

- a) Oberflächenspannung
- b) Kapillar-Effekt

Antwort:

Folgende Phänomene lassen sich durch die Wirkung der Molekular-Kräfte erklären:

a) Oberflächenspannung:

Dieses Phänomen wird durch die Kohäsion von Flüssigkeiten verursacht und tritt an der Grenze zwischen Flüssigkeiten und Gasen auf. Sie kommt dadurch zustande, dass die Moleküle an der Oberfläche der Flüssigkeit einseitig von den Molekülen im Inneren der Flüssigkeit angezogen werden, während die Moleküle im Inneren der Flüssigkeit allseitig von Nachbarmolekülen angezogen werden. Die Oberflächenspannung bewirkt beispielsweise, dass Flüssigkeiten Tropfen bilden, Seifenblasen zusammenhalten und kleine Insekten, wie z.B. Wasserläufer, von der Wasseroberfläche getragen werden.

b) Kapillar-Effekt:

In enge Spalten, Risse in Felsgestein und Mauerwerk sowie in enge Röhrchen (Kapillaren, von lat. capillus = Haar) dringt Wasser durch die Adhäsion ein, und zwar umso stärker, je enger die Kapillaren sind. Dieser Effekt heißt Kapillar-Effekt (oder auch als Kapillarität).

Teste dein Wissen 4:

Kreuze die richtigen Aussagen zur Temperaturmessung an.

- a) Die Kelvinskala hat keine negativen Temperaturwerte.
- b) Die Basiseinheit der Temperatur ist das Grad Celsius.
- c) Der Nullpunkt der Celsiusskala liegt bei 273,15K.

Antwort:

Die richtigen Aussagen zur Temperaturmessung sind:

a) Die Kelvinskala hat keine negativen Temperaturwerte.

Die Kelvin-Skala ist eine absolute Temperaturskala, die bei null beginnt, was dem absoluten Nullpunkt entspricht, der als absolut tiefste Temperatur (-273,15 °C) definiert ist.

c) Der Nullpunkt der Celsiusskala liegt bei 273,15K.

Dies ist der Gefrierpunkt von Wasser bzw. der Schmelzpunkt von Eis (Phasenübergang) unter Standardbedingungen.

Teste dein Wissen 5:

Beschreibe, was man unter folgender Aussage versteht: „Das Thermometer misst seine eigene Temperatur“

Antwort:

Das Thermometer wird mit dem Objekt, dessen Temperatur bestimmt werden soll, in Kontakt gebracht. Zwischen Objekt und Thermometer muss sich ein thermisches Gleichgewicht (Equilibrium) einstellen, d.h. ein Temperaturengleich erfolgen. In diesem Gleichgewicht darf sich die Temperatur des Objekts nicht merkbar verändern.

Teste dein Wissen 6:

Kreuze die richtigen Aussagen für den Begriff „Wärme“ an.

- a) Wärme ist die kinetische Energie der Moleküle.
- b) Wärme ist die gesamte Energie der Moleküle.
- c) Wärme ist die Energie, die von einem wärmeren auf einen kälteren Körper von selbst übergeht.

Antwort:

Die richtige Aussage ist c) „Wärme ist die Energie, die von einem wärmeren auf einen kälteren Körper von selbst übergeht.“

Die Wärme Q ist die Energie, die aufgrund von Temperaturdifferenzen von einem wärmeren auf einen kälteren Körper übertragen wird. Dieser Prozess erfolgt spontan, bis ein thermisches Gleichgewicht erreicht ist. Wie alle Energien wird Wärme in der Einheit Joule gemessen.

Teste dein Wissen 7:

Kreuze die richtige Aussage zur Wärmeausdehnung an.

- a) Feste Körper weisen nur eine Ausdehnung in der Länge auf.
- b) Flüssigkeiten dehnen sich nicht aus.
- c) Der Volumenausdehnungskoeffizient ist für alle Gase gleich groß.

Antwort:

Aussage c) ist näherungsweise richtig.

Dies ist als Gesetz von (Charles und) Gay-Lussac bekannt. Es besagt, dass das Volumen eines *idealen Gases* bei konstantem Druck direkt proportional zur Temperatur ist. Daher ist der Volumenausdehnungskoeffizient für alle idealen Gase gleich groß und wird aus praktischen Gründen näherungsweise für alle Gase verwendet.

Teste dein Wissen 8:

Unter der Anomalie des Wassers versteht man:

- a) ein nicht normales Verhalten beim Verdampfen.
- b) ein ungewöhnliches Verhalten beim Gefrieren.
- c) ein von der Norm abweichendes Verhalten bei der Temperatur zwischen 0 °C und 4 °C.

Antwort:

Die Anomalie des Wassers bezieht sich auf das ungewöhnliche Verhalten von Wasser, bei dem das Volumen zwischen 0 °C und 4 °C tatsächlich abnimmt, anstatt sich auszudehnen, wie es bei den meisten anderen Substanzen verlaufen würde. Bei dem Schmelzvorgang wird dem Eis Wärme, die auch als (latente) Schmelzwärme bekannt ist, zugeführt. In diesem (Phasen-) Übergang besteht Wasser gemischt im flüssigen (höhere Dichte) als auch kristallinen (niedrigere Dichte) Zustand. Am Ende des Schmelzvorgangs erreicht Wasser bei etwa 4 °C somit seine größte Dichte und dehnt sich ab dann aufgrund der thermischen Bewegung weiter aus.

Rechenaufgabe 1:

Während einer Unterrichtsstunde steigt die Temperatur im Klassenraum von 18 °C auf 21 °C.

Der Raum ist 12m lang, 5m breit und 4m hoch. Bestimme, wie viel Luft entweicht.

Gib die Antwort in m³ und in Prozenten des Raumvolumens an.

Der Volumenausdehnungskoeffizient γ (Luft) = $1/273 \text{ K}^{-1}$.

Antwort:

Um zu berechnen, wie viel Luft aus dem Raum entweicht, können wir die Formel für die thermische Ausdehnung verwenden:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$$

(ΔV ... Volumen der entweichenden Luft, V_0 ... Anfangsvolumen,
 γ ... Volumenausdehnungskoeffizient der Luft, ΔT ... Temperaturänderung)

Zuerst berechnen wir das ursprüngliche Volumen des Raumes V_0 :

$$V_0 = 12 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} = 240 \text{ m}^3$$

Die Temperaturänderung ΔT beträgt 3 °C bzw. 3 K (Achtung: Es handelt sich um eine relative Änderung, weshalb die Werte übereinstimmen.)

Nun setzen wir die Werte in die obige Formel ein:

$$\Delta V = 240 \text{ m}^3 \cdot \frac{1}{273} \text{ K}^{-1} \cdot 3 \text{ K} \approx 2,64 \text{ m}^3$$

Das entspricht etwa 1,1% des ursprünglichen Raumvolumens, da

$$\frac{\Delta V}{V_0} \cdot 100\% = \frac{2,64 \text{ m}^3}{240 \text{ m}^3} \cdot 100\% \approx 1,1\%$$

Daher entweichen etwa 2.64 Kubikmeter oder 1.1% des ursprünglichen Raumvolumens aufgrund der Temperaturerhöhung.

Bemerkung: Bei der Rechnung mit $\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$ wird die Volumenzunahme geringfügig überschätzt, da hier so gerechnet wird, als würde die gesamte Luft im Zimmer zunächst um 3 °C erwärmt und erst dann entweichen.

Rechenaufgabe 2:

Der Eiffelturm in Paris besteht aus Eisenstäben. Seine Höhe wird mit 330 m angegeben. Ermittle die Veränderung der Höhe zwischen Wintertagen mit 0 °C und Sommertagen, an denen die Eisenteile 60 °C heiß werden. Beurteile, ob eine genauere Angabe der Höhe sinnvoll wäre. Der Längenausdehnungskoeffizient von Eisen beträgt $\alpha = 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Antwort:

Die thermische Längenausdehnung kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

(Δl ... Änderung der Länge, l_0 ... ursprüngliche Länge,
 α ... Längenausdehnungskoeffizient, ΔT ... Temperaturänderung)

In diesem Fall beträgt die ursprüngliche Höhe des Eiffelturms $l_0 = 330 \text{ m}$, der lineare Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und die Temperaturänderung $\Delta T = 60^\circ\text{C}$.

Setzen wir diese Werte in die Formel ein:

$$\Delta l = 330 \text{ m} \cdot 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 60 \text{ K} = \mathbf{0.2772 \text{ m} \approx 28 \text{ cm}}$$

Das bedeutet, dass die Höhe des Eiffelturms an einem heißen Sommertag um etwa 28 Zentimeter zunimmt.

Bezüglich der Frage, ob eine genauere Angabe der Höhe sinnvoll wäre, hängt dies vom Kontext ab. Für allgemeine Zwecke ist eine genauere Angabe nicht sinnvoll. Es ist nämlich zu beachten, dass die tatsächliche Höhe des Turms von vielen Faktoren bzw. Umweltbedingungen abhängt. Wenn sehr genaue Messungen oder Berechnungen erforderlich sind, wie z.B. für wissenschaftliche oder technische Zwecke, könnte eine genauere Angabe der Höhe sinnvoll sein. Daher wäre es schwierig, eine einzige "genaue" Höhe anzugeben.

Rechenaufgabe 3:

In einem Haushalt werden täglich 200 l Warmwasser benötigt. Dieses Wasser muss im Mittel um 30 °C erwärmt werden. Ermittle die Energie, die dazu jährlich erforderlich ist.

Antwort:

Um die jährlich benötigte Energie zu berechnen, können wir die Formel für die Wärmemenge verwenden:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

(m ... Masse des Wassers, c ... spezifische Wärmekapazität
von Wasser (ca. $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), ΔT ... Temperaturdifferenz)

Da 1 l Wasser etwa 1 kg wiegt, beträgt die täglich benötigte Wassermenge 200 kg. Die Temperaturdifferenz beträgt 30 K. Setzen wir diese Werte in die Formel ein:

$$Q_{\text{tägl}} = 200 \text{ kg} \cdot 4,18 \cdot 30 \text{ K} = \mathbf{25\,080 \text{ kJ} \approx 7 \text{ kWh}}$$

Daher beträgt der jährliche Energiebedarf etwa 2 555 kWh.

Rechenaufgabe 4:

Der Golfstrom transportiert in jeder Sekunde rund 15 Mio. m^3 Wasser an die Küsten Nordeuropas. Seine Temperatur ist im Winter um ungefähr 5 °C höher als die Temperatur des übrigen Meerwassers.

- Ermittle, wie viel Energie der Golfstrom pro Sekunde nach Europa transportiert.
- Bestimme, wie viele Großkraftwerke mit jeweils 1 GW erforderlich wären, um die gleiche Leistung zu erbringen.

Antwort:

a) Um die Energie zu berechnen, die der Golfstrom pro Sekunde nach Europa transportiert, können wir die Formel für die Heizleistung verwenden:

$$P = m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

(m ... Masse des Wassers, c ... spezifische Wärmekapazität von Wasser (ca. $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), ΔT ... Temperaturdifferenz, Δt ... Zeitdifferenz)

Da 1 m^3 Wasser etwa 1000 kg wiegt, beträgt die Masse des Wassers, das der Golfstrom pro Sekunde transportiert 15 Milliarden Kilogramm bzw. $15 \cdot 10^9 \text{ kg}$. Die Temperaturdifferenz beträgt 5 K . Setzen wir diese Werte in die Formel ein:

$$P = 15 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 5 \text{ K} \cdot 1 \text{ s}^{-1} = 3,135 \cdot 10^{11} \text{ kJ} = 313\,500 \text{ GW}$$

b) Die Leistung $P = 313\,500 \text{ GW}$ entspricht ca. $300\,000$ Kraftwerken.

Rechenaufgabe 5:

Ein Schwimmbad mit der Grundfläche $4 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}$ und der Tiefe 2 m kühlt in jeder Nacht um $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ab und wird tagsüber wieder aufgeheizt.

a) Ermittle, wie viele Kilowattstunden elektrischer Energie dazu erforderlich sind.

b) Bestimme, wie viel Wasser in einem Wasserkraftwerk eine Höhe $h = 100 \text{ m}$ durchfallen müsste, um die täglich für die Schwimmbadheizung benötigte Energie bereitzustellen.

Antwort:

a) Die benötigte Energie, um das Wasser im Schwimmbad um $1 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. 1 K zu erwärmen, kann mit der Formel für die Wärmemenge berechnet werden:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

(m ... Masse des Wassers, c ... spezifische Wärmekapazität von Wasser (ca. $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), ΔT ... Temperaturdifferenz)

Das Volumen des Schwimmbads beträgt $4 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} = 64 \text{ m}^3$.

Daher beträgt die Masse des Wassers $64 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 64\,000 \text{ kg}$.

Setzen wir diese Werte in die Formel ein, erhalten wir:

$$Q = 64\,000 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1 \text{ K} = 267\,520 \text{ kJ} \approx 74 \text{ kWh}$$

Es sind etwa 74 kWh el. Energie erforderlich, um das Schwimmbad wieder aufzuheizen.

b) Um die Wassermenge zu berechnen, die durch ein Wasserkraftwerk fallen müsste, um die benötigte Energie bereitzustellen, stellen wir die Formel für die potenzielle Energie nach der Masse um:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \rightarrow m = \frac{E_{pot}}{g \cdot h}$$

(m ... Masse des Wassers, g ... Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$), h ... Höhe, durch die das Wasser im Wasserkraftwerk fällt)

Wir haben $Q = E_{pot} = 267\,520 \text{ kJ} \approx 2,68 \cdot 10^8 \text{ J}$

Wir setzen in die obige Formel ein:

$$m = \frac{2,68 \cdot 10^8 \text{ J}}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 100 \text{ m}} \approx 273\,000 \text{ kg} \approx 273 \text{ m}^3$$

Also müssten etwa 273 Tonnen bzw. 273 Kubikmeter Wasser durch 100 Meter fallen, um die benötigte Energie bereitzustellen.

Rechenaufgabe 6:

Ein Eisentopf mit 1 l Inhalt hat eine Masse von 0,5 kg. Der mit Wasser von 20 °C gefüllte Topf wird auf 100 °C erhitzt ($c_{Fe} = 0,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Bestimme den Bruchteil der aufgewendeten Energie, der zur Erwärmung des Topfes bzw. des Wassers erforderlich ist ($c_{Wasser} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Antwort:

Um den Bruchteil der aufgewendeten Energie zu bestimmen, der zur Erwärmung des Topfes bzw. des Wassers erforderlich ist, können wir die spezifische Wärmekapazität verwenden. Die Formel zur Berechnung der benötigten Energie (Q) zum Erhitzen einer Masse (m) um eine bestimmte Temperaturänderung (ΔT) lautet:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

(m ... Topf-/Wassermasse, c ... spezifische Wärmekapazität von Eisen

(ca. $0,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) / von Wasser (ca. $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ΔT ... Temperaturdifferenz)

Die Temperaturänderung beträgt 80 K (von 20 °C auf 100 °C). Daher beträgt die benötigte Energie zum Erhitzen des Topfes:

$$Q_{\text{Topf}} = 0,5 \text{ kg} \cdot 0,45 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 80 \text{ K} = 18 \text{ kJ}$$

Die benötigte Energie für die Erhitzung des Wassers beträgt:

$$Q_{\text{Wasser}} = 1 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 80 \text{ K} = 334,4 \text{ kJ}$$

D. h. es werden insgesamt 352,4 kJ bzw. ca. 0,1 kWh Energie benötigt.

Folgt für den Bruchteil der Energie, der für den Topf aufgewendet wird:

$$\frac{Q_{\text{Topf}}}{Q_{\text{gesamt}}} = \frac{18 \text{ kJ}}{352,4 \text{ kJ}} \approx 0,05$$

Ca. 5% der aufgewandten Energie braucht der Topf. Verluste an die Umgebung wurden nicht berücksichtigt.

2 Phasenübergänge, S. 115

Teste dein Wissen 1:

Erkläre, warum heiße Suppe abkühlt, wenn man über ihre Oberfläche bläst.

Beispielantwort:

Aus der Suppe verdunsten die schnellsten und energiereichsten Moleküle, da sie die anziehenden Molekularkräfte durch genügend hohe kinetische Energien überwinden. Durch Blasen werden sie wegtransportiert, die Suppe wird dadurch schneller abgekühlt, da mehr „Platz“ (der Wind an der Oberfläche der Suppe schafft einen niedrigeren Druck) für neu austretende Moleküle geschaffen wird.

Teste dein Wissen 2:

Begründe, warum Wäsche im Freien bei Wind schneller trocknet als bei Windstille.

Beispielantwort:

Der Wind entfernt die aus der Wäsche verdunstenden Wassermoleküle und beschleunigt so das Trocknen. Der Grund dafür ist, dass durch die bewegenden Luftströme des Windes mehr „Platz“ (der Wind an der Oberfläche der Wäsche schafft einen niedrigeren Druck) für neu austretende Moleküle geschaffen wird. Zusätzlich zieht der Wind auch je nach Kleidungsdicke, Material und Nähetechnik durch die Poren der Textilien.

Teste dein Wissen 3:

Erkläre am Beispiel Wolkenbildung die Bedeutung von Verdampfungs- und Kondensationswärme.

Beispielantwort:

Die Sonne erwärmt die Luft und die Oberfläche der Erde. Diese Erwärmung führt dazu, dass Wasser aus Seen, Flüssen, Ozeanen und sogar Bodenflächen verdunstet. Dabei absorbiert das Wasser die Wärmeenergie aus seiner Umgebung und wandelt sich von einer flüssigen in eine gasförmige Form um. Die für diesen Phasenübergang notwendige Energie nennt man **Verdampfungswärme**. Diese Wärmeenergie wird in den Wassermolekülen gespeichert, während sie in die Gasphase übergehen.

Je höher der Wasserdampf in die Atmosphäre aufsteigt, desto mehr kühlt sich dieser aufgrund der kühleren Temperaturen (kühler, da der Druck niedriger wird und die Luftmassen sich „ausdehnen“) ab. Kühlt sich der Wasserdampf unter die Siedetemperatur, so binden die zwischenmolekularen Kräfte die Moleküle erneut aneinander. Der Wasserdampf kondensiert zu flüssigem Wasser. Dabei gibt er die zuvor aufgenommene Verdampfungswärme als **Kondensationswärme** wieder ab.

Teste dein Wissen 4:

Erkläre die Wirkungsweise eines Kältesprays beim Aufbringen auf die Haut.

Beispielantwort:

Das in der Medizin verwendete Chlorethan hat den Siedepunkt bei 13 °C. Auf der warmen Haut verdunstet die Flüssigkeit des Sprays rasch, kühlt die Haut und macht sie dadurch weniger empfindlich. (Genauer gesagt betäubt die rasche Kühlung die Nerven an den oberen Schichten der Haut.)

Teste dein Wissen 5:

Wie ändert sich der Dampfdruck, wenn die Temperatur steigt? Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Der Dampfdruck steigt.
- b) Der Dampfdruck sinkt.
- c) Der Dampfdruck ändert sich nicht.

Antwort:

Die richtige Antwort ist: **a) Der Dampfdruck steigt.**

Wenn die Temperatur steigt, erhöht sich die kinetische Energie der Moleküle. Dadurch können mehr Moleküle den flüssigen Zustand verlassen und in den gasförmigen Zustand übergehen, was zu einem höheren Dampfdruck führt.

Teste dein Wissen 6:

Wie ändert sich der Dampfdruck, wenn das Dampfvolmen größer wird?

Kreuze die richtige Antwort an.

- a) Der Dampfdruck steigt.
- b) Der Dampfdruck sinkt.
- c) Der Dampfdruck erreicht allmählich den anfänglichen Wert.

Antwort:

Die richtige Antwort ist: **c) Der Dampfdruck erreicht allmählich den anfänglichen Wert.**

Der (Phasen-)Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand, führt dazu, dass die Flüssigkeit Moleküle an den umgebenden Raum abgibt. Ist dieser Raum nun begrenzt und geschlossen (keine Moleküle können ein oder austreten), dann bildet sich bei konstanter Temperatur ein (dynamisches) Gleichgewicht und damit ein konstanter Dampfdruck. Wird das begrenzte Volumen nun vergrößert, dann weichen die Dampfmoleküle in den freigewordenen Raum aus,

wodurch weitere Moleküle aus der Flüssigkeit austreten können und der Dampfdruck (Anzahl der Dampfmoleküle pro Volumeneinheit) allmählich den ursprünglichen Wert annimmt. (Dies ist nur möglich, wenn die Temperatur konstant gehalten wird!)

Teste dein Wissen 7:

Beschreibe am Beispiel Wasser, in welchen Zustandsformen (Phasen) eine reine Substanz bei Temperaturen unterhalb und oberhalb der kritischen Temperatur existiert.

Antwort:

Eine reine Substanz wie Wasser kann in verschiedenen Zustandsformen oder Phasen existieren, abhängig von der Temperatur und dem Druck. Die drei Hauptphasen sind fest, flüssig und gasförmig. Unterhalb der kritischen Temperatur, die für Wasser bei etwa 374,15 Grad Celsius liegt, kann Wasser in allen drei Phasen existieren:

- Fest (Eis): Bei Temperaturen unter 0 °C ist Wasser in der festen Phase, die wir als Eis kennen.
- Flüssig (Wasser): Bei Temperaturen zwischen 0 Grad Celsius und 100 °C (bei Normaldruck) ist Wasser in der flüssigen Phase.
- Gasförmig (Wasserdampf): Bei Temperaturen über 100 °C (bei Normaldruck) verdampft Wasser und geht in die gasförmige Phase über. Die Dampfdruckkurve trennt die flüssige Phase von der gasförmigen.

Am kritischen Punkt verschwindet der Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas. Die thermische Bewegung ist nun so stark, dass die Teilchen auch bei noch größerem Druck nicht an ihre nächsten Nachbarn gebunden bleiben. Über dem kritischen Punkt gibt es nur noch Gas welches so dicht wie eine Flüssigkeit ist. Dies wird auch als überkritisches Fluid bezeichnet.

Teste dein Wissen 8:

Warum verursacht Wasserdampf von 100 °C schwerere Verbrühungen als Wasser von 100 °C?

Antwort:

Beim Kondensieren von Wasserdampf auf der Haut wird zunächst die Verdampfungswärme (2,2 kJ/g) wieder frei. Beim Abkühlen des heißen Wassers auf die Hauttemperatur (30 °C) muss für 1 g dagegen nur die Energie $70\text{K} \cdot 4,18\text{ J/K} = \text{ca. } 0,3\text{ kJ}$ abgeführt werden.

Vereinfacht gesagt bedeutet dies, dass bei Kontakt mit Wasserdampf zunächst eine große Menge an Energie durch die Kondensation freigesetzt wird, gefolgt von zusätzlicher Energie, die beim Abkühlen des Wassers auf die Hauttemperatur freigesetzt wird. Dies erklärt, warum Wasserdampf bei gleicher Temperatur schwerere Verbrennungen verursachen kann als flüssiges Wasser.

Teste dein Wissen 9:

Wovon hängt die Siedetemperatur einer Flüssigkeit ab?

Kreuze die richtige Antwort an.

- a) vom äußeren Luftdruck
- b) vom Dampfdruck
- c) vom Volumen

Antwort:

Die Siedetemperatur einer Flüssigkeit hängt von folgenden Faktoren ab:

a) vom äußeren Luftdruck - Die Siedetemperatur einer Flüssigkeit steigt mit zunehmendem äußerem Druck und sinkt mit abnehmendem äußerem Druck.

b) vom Dampfdruck - Wenn der Dampfdruck einer Flüssigkeit gleich dem äußeren Druck entspricht, beginnt die Flüssigkeit zu sieden.

Teste dein Wissen 10:

Beschreibe die Bedingungen, bei denen sich Wolken bilden und erkläre die Begriffe Luftfeuchtigkeit und Taupunkt.

Antwort:

Luftfeuchtigkeit: Die Luftfeuchtigkeit ist ein Maß für die Menge an Wasserdampf in der Luft. Sie wird oft als Prozentsatz ausgedrückt. Eine Luftfeuchtigkeit von 100% bedeutet, dass die Luft gesättigt ist und kein zusätzliches Wasser mehr aufnehmen kann.

Taupunkt: Wenn z.B. durch Abkühlen die Wasserdampfdichte die jeweilige Sättigungsdichte erreicht, enthält die Luft gesättigten Wasserdampf. Der Dampf beginnt zu kondensieren, er bildet Flüssigkeitströpfchen (Nebel, Wolken, Regen, Tau). Man sagt, dass der Taupunkt erreicht ist.

Wolken entstehen, wenn durch Abkühlung feuchter Luft der Taupunkt unterschritten bzw. die relative Luftfeuchtigkeit 100% erreicht wird. An Kondensationskeimen (auch bekannt als Aerosolpartikel wie Staub oder Salzkristalle) in der Atmosphäre bilden sich erste Tröpfchen. Abkühlung erfolgt durch Aufsteigen warmer Luft oder durch Mischung warmer und kalter Luftmassen.

Teste dein Wissen 11:

Um welche Wolke handelt es sich in dieser Abbildung (115.1)?

Wähle aus den folgenden Antworten aus:

- a) Cumulus
- b) Cumulonimbus
- c) Cirrostratus



(Bild: gogomo - stock.adobe.com)

Beschreibe die speziellen Eigenschaften dieser Wolkenform.

Antwort:

Die Abbildung zeigt eine b) Cumulonimbus-Wolke.

Eine Cumulonimbus-Wolke, auch Amboss-Wolke oder Gewitterwolke genannt, entsteht bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit und hat folgenden spezielle Eigenschaften:

- **Massive Struktur:** Cumulonimbus-Wolken sind groß und massiv, oft mit einer turmartigen Erscheinung.
- **Wetterphänomene:** Sie sind typischerweise mit Gewittern, starken Regenfällen, Schneefällen oder Stürmen verbunden.
- **Große Höhe:** Diese Wolken können sich über eine große Höhe erstrecken und manchmal bis in die Stratosphäre reichen.
- **Anvil- oder Pilzförmige Kappe:** Der obere Teil der Wolke breitet sich aus und bildet eine charakteristische anvil- oder pilzförmige Kappe.

Cumulonimbus-Wolken sind beeindruckend und ein Indikator für potenziell stürmisches Wetter.

Rechenaufgabe 1:

Abb. 115.2 zeigt den Temperaturverlauf beim Erwärmen eines Stücks Eis bis zum Verdampfen des Wassers.

Beschreibe die physikalischen Vorgänge für jedes Teilstück der Temperaturkurve.



Illustration:
Bernd Pavlik, Neusiedl am See

Antwort:

Der Kurvenverlauf besteht aus 5 Teilstücken, die 5 unterschiedlichen Vorgängen entsprechen:

- **Abschnitt 1:** Temperaturanstieg von -10 °C auf 0 °C . In dieser Phase erwärmt sich das Eis.
- **Abschnitt 2:** Die Temperatur bleibt bei 0 °C . Hier schmilzt das Eis zu Wasser; (latente) Schmelzwärme wird aufgenommen, ohne dass sich die Temperatur ändert.
- **Abschnitt 3:** Die Temperatur des Wassers steigt bei konstanter Wärmezufuhr gleichmäßig von 0 °C auf etwa 100 °C .
- **Abschnitt 4:** Die Temperatur bleibt konstant bei etwa 100 °C , was darauf hinweist, dass das Wasser anfängt zu sieden und zu verdampfen; (latente) Verdampfungswärme wird aufgenommen, ohne dass sich die Temperatur ändert.
- **Abschnitt 5:** Nach dem Verdampfungsprozess steigt die Temperatur weiter an, da der Dampf weiterhin Wärme aufnimmt.

Diese Phasen repräsentieren die physikalischen Prozesse des Erwärmens, Schmelzens, Erhitzens, Verdampfens und weiteren Erwärmens von Dampf.

Rechenaufgabe 2:

Eine 10 cm dicke Eisschicht auf einem See wird durch Sonnenstrahlung geschmolzen. Die einfallende Sonnenenergie beträgt an einem sonnigen Wintertag 4 kWh/m^2 . Davon werden 20% absorbiert, der Rest wird zurückgestrahlt. Berechne, nach wie vielen Sonnentagen der See eisfrei wird (Dichte von Eis 900 kg/m^3).

Antwort:

Zunächst bestimmen wir die Masse einer 1 m^2 großen und 1 cm tiefen Eisschicht.

Dazu multiplizieren wir die Dichte von Eis mit dem Volumen:

$$m_{\text{Eis}} = \rho_{\text{Eis}} \cdot V = 900\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (1\text{ m}^2 \cdot 0,1\text{ m}) = 90\text{ kg}$$

Die absorbierte Sonnenenergie pro Tag beträgt 20% von 4 kWh/m^2 , also $0,8\text{ kWh/m}^2$.

Nun berechnen wir die benötigte Energie zum Schmelzen des 90 kg schweren Eises.

Dazu benötigen wir die spezifische Schmelzwärme von Eis, die etwa 334 kJ/kg beträgt.

$$E_{\text{schmelz}} = 90\text{ kg} \cdot 334\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 30\,060\text{ kJ} = 8,35\text{ kWh}$$

Teile die benötigte Energie durch die täglich absorbierte Energie, um die Anzahl der Tage zu erhalten:

$$\frac{E_{\text{schmelz}}}{E_{\text{abs/d}}} = \frac{8,35\text{ kWh}}{0,8\text{ kWh/Tag}} \approx \mathbf{10,44\text{ Tage}}$$

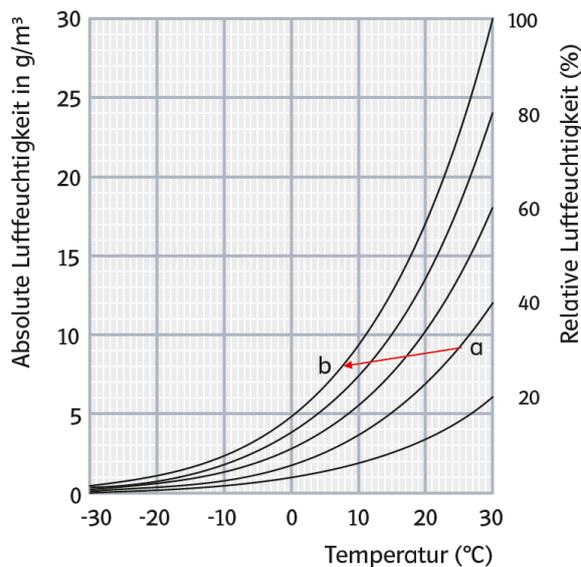
Daher würde es etwa 10-11 Tage dauern, bis der See eisfrei ist.

Beachte, dass dies eine Vereinfachung ist und in der Realität andere Faktoren wie Wind, Lufttemperatur/-feuchtigkeit und mehr berücksichtigt werden müssten.

Rechenaufgabe 3:

An einem Wintertag wird im Freien bei 0 °C Lufttemperatur eine relative Luftfeuchtigkeit von 50% gemessen.

- Entnimm dem Diagramm (115.3) die Sättigungsmenge und berechne die absolute Luftfeuchtigkeit.
- Bestimme die relative Luftfeuchtigkeit, die in einem Zimmer bei 20 °C herrscht, wenn nach langem Lüften die absolute Feuchtigkeit nur 2,5 g/m³ beträgt.
- Ermittle, wie viel Wasser in dem geheizten Raum mit dem Volumen 60 m³ verdunsten muss, um die relative Feuchtigkeit wieder auf 50% anzuheben.



(Bild: Achim Christoph / Wikimedia Commons – public domain)

Antwort:

a) Sättigungsmenge (0 °C): 5 g/m³,

Absolute Luftfeuchtigkeit ρ_W bei 0 °C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit:

$$\rho_{W,0} = 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,5 = 2,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

b) Sättigungsmenge (20 °C): 17 g/m³,

Relative Luftfeuchtigkeit φ bei 20 °C:

$$\varphi = \frac{2,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}}{17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}} \approx 14,7 \%$$

c) Wenn die Sättigungsmenge bei 20 °C etwa 17 g/m³ ist und die relative Luftfeuchtigkeit auf 50% ansteigen soll, dann beträgt die absolute Luftfeuchtigkeit:

$$\rho_{W,20} = 17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,5 = 8,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Die Differenz zwischen der aktuellen absoluten Luftfeuchtigkeit (2,5 g/m³) und der gewünschten absoluten Luftfeuchtigkeit gibt an, wie viel Wasser verdunsten muss:

$$(8,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} - 2,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 60 \text{ g} = 360 \text{ g}$$

Für eine relative Feuchtigkeit von 50% müssen 6 g/m³ bzw. für den ganzen Raum 360g Wasser verdunsten.

3 Das ideale Gas, S. 127

Teste dein Wissen 1:

Kreuze die richtigen Aussagen über ideale Gase an.

Begründe deine Entscheidung mit jeweils einem Satz.

- a) Die Teilchen idealer Gase haben keine Ausdehnung.
- b) Die Summe der Bewegungsenergien aller Teilchen ist unabhängig von der Temperatur.
- c) Das ideale Gas besteht aus vielen Teilchen, die nur bei Zusammenstößen Kräfte aufeinander ausüben.

Antwort:

Aussage „a) Die Teilchen idealer Gase haben keine Ausdehnung.“ ist richtig: Alle Teilchen (auch für Moleküle wie H₂, O₂, ...) haben Masse und werden als punktförmig angenommen.

Aussage „b) Die Summe der Bewegungsenergien aller Teilchen ist unabhängig von der Temperatur.“ ist falsch: Die Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen.

Aussage „c) Das ideale Gas besteht aus vielen Teilchen, die nur bei Zusammenstößen Kräfte aufeinander ausüben.“ ist richtig: Teilchen eines idealen Gases üben nur während elastischer Stöße Kräfte aufeinander und auf die Gefäßwände aus.

Teste dein Wissen 2:

Wenn man den Druck des idealen Gases bei konstanter Temperatur halbiert, dann gilt:

- a) Das Volumen verdoppelt sich.
- b) Das Volumen halbiert sich.
- c) Das Volumen vervierfacht sich.

Begründe deine Antwort!

Antwort:

Die richtige Antwort ist a) Das Volumen verdoppelt sich.

$$p \cdot V = \text{const.} = (p/2) \cdot (2 \cdot V)$$

Wenn also der Druck halbiert wird, muss das Volumen sich verdoppeln, um das Produkt konstant zu halten.

Teste dein Wissen 3:

Welche Aussage zur allgemeinen Zustandsgleichung idealer Gase ist falsch? Korrigiere sie!

- a) $p \cdot V$ ist proportional zur Temperatur in °C.
- b) p ist proportional zu T , wenn $V = \text{const.}$
- c) $p \cdot V$ ist proportional zur Stoffmenge bei $T = \text{const.}$

Antwort:

Aussage a) ist falsch, weil statt der Celsiusskala die Kelvinskala verwendet werden muss.

Teste dein Wissen 4:

Was ist die Ursache für den Gasdruck in einem geschlossenen Gefäß?

Kreuze die richtige Aussage an und begründe deine Wahl.

- a) Die Kraft eines Kolbens.
- b) Die Stöße der Gasmoleküle mit anderen Gasmolekülen.
- c) Stöße der Gasmoleküle gegen die Gefäßwand.

Antwort:

Aussage c) ist richtig. Bei elastischen Stößen wird die Bewegungsrichtung verändert. Dabei wirkt zwischen den Teilchen und der Gefäßwand eine abstoßende Kraft. Wegen der riesigen Anzahl von Teilchen ergibt sich eine messbare Kraft und daher auch der Druck auf die Gefäßwand.

Rechenaufgabe 1:

Ein Schlauchboot wird bis zu einem Überdruck von 0,2 bar aufgepumpt. Die Sonne erwärmt danach das Boot von 20 °C auf 50 °C. Berechne den Überdruck in den erwärmten Luftkammern des Boots. Annahme: Die Hülle dehnt sich nicht aus, das Volumen bleibt gleich.

Antwort:

Um diese Frage zu beantworten, können wir das ideale Gasgesetz verwenden, das besagt, dass bei konstantem Volumen der Druck eines idealen Gases direkt proportional zur Temperatur ist. Dies kann mathematisch wie folgt ausgedrückt werden:

$$p = \text{const.} \cdot T$$

Wenn wir die Anfangsbedingungen (Druck und Temperatur) mit den Endbedingungen vergleichen, erhalten wir:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

(p_1, p_2 ... Anfangs-/Enddruck, T_1, T_2 ... Anfangs-/Endtemperatur)

Der Anfangsdruck p_1 setzt sich aus dem atmosphärischen Druck (Druck im Freien) von 1 bar und dem Überdruck von 0,2 bar zusammen: $p_1 = 1 \text{ bar} + 0,2 \text{ bar} = 1,2 \text{ bar}$

Wir wandeln die Temperaturen in Kelvin um:

$$T_1 = (20 + 273,15) \text{ K} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_2 = (50 + 273,15) \text{ K} = 323,15 \text{ K}$$

Nun müssen wir die obige Formel nur noch nach p_2 umstellen, um den Enddruck zu berechnen:

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 1,2 \text{ bar} \cdot \frac{323,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} \approx 1,323 \text{ bar}$$

Der Überdruck in den erwärmten Luftkammern des Bootes beträgt somit etwa 1,323 bar, was eine Steigerung von etwa 10 % bedeutet.

Rechenaufgabe 2:

1m³ Luft wird isobar von 25 °C auf 625 °C erwärmt.

- Bestimme das Volumen nach dieser Erwärmung.
- Berechne den Ausdehnungskoeffizienten γ !

Antwort:

Um diese Fragen zu beantworten, können wir das Gesetz von Gay-Lussac für isobare Prozesse verwenden, das besagt, dass das Volumen eines idealen Gases bei konstantem Druck direkt proportional zu seiner absoluten Temperatur ist:

$$V = \text{const.} \cdot T$$

Wenn wir die Anfangsbedingungen (Volumen und Temperatur) mit den Endbedingungen vergleichen, erhalten wir:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

(V_1, V_2 ... Anfangs-/Endvolumen, T_1, T_2 ... Anfangs-/Endtemperatur)

Wir wandeln die Temperaturen in Kelvin um:

$$T_1 = (25 + 273,15) \text{ K} = 298,15 \text{ K}$$
$$T_2 = (625 + 273,15) \text{ K} = 898,15 \text{ K}$$

a) Das Volumen V_2 nach der Erwärmung kann somit wie folgt berechnet werden:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

Setzen wir die gegebenen Werte in die Formel ein, erhalten wir:

$$V_2 = 1 \text{ m}^3 \cdot \frac{898,15 \text{ K}}{298,15 \text{ K}} \approx 3 \text{ m}^3$$

Das Volumen nach dieser Erwärmung beträgt somit 3 m³.

b) Der Ausdehnungskoeffizient γ gibt das Verhältnis zwischen der relativen Volumenzunahme $\Delta V/V_1$ und der Temperaturänderung ΔT an und kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_1} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} = \frac{2 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{1}{600 \text{ K}} \approx 0,0033 \text{ K}^{-1}$$

Der Ausdehnungskoeffizient beträgt somit etwa 0,0033 1/K.

Rechenaufgabe 3:

Ermittle, wie viele Moleküle 1 m³ Luft bei $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ und $p = 1,013 \text{ bar}$ enthält.

Antwort:

Um die Anzahl der Moleküle in einem Kubikmeter Luft zu berechnen, können wir das Ideale Gasgesetz verwenden, das wie folgt lautet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

(p ... Druck, V ... Volumen, n ... Anzahl der Mole, R ... allgemeine Gaskonstante, T ... Temperatur)

In diesem Fall beträgt der Druck $p = 1,013 \text{ bar} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Und die Temperatur in Kelvin: $T = (0 + 273,15) \text{ K} = 273,15 \text{ K}$

Wir lösen die Gleichung nach n auf und setzen die gegebenen Werte ein:

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{101\,300 \text{ Pa} \cdot 1 \text{ m}^3}{8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 273,15 \text{ K}} \approx 44,6 \text{ mol}$$

Dies gibt uns die Anzahl der Mole in 1 m³ Luft. Um die Anzahl der Moleküle zu erhalten, multiplizieren wir die Anzahl der Mole mit der Avogadro-Konstante N_A :

$$N = n \cdot N_A = 44,6 \text{ mol} \cdot (6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ Moleküle}$$

1 m³ Luft enthält somit etwa 2,7 · 10²⁵ Moleküle.

Rechenaufgabe 4:

Eine Stahlflasche für Sauerstoff wird bei 10 °C bis zu einem Druck von 150 bar gefüllt.

Sie fasst 40 l. Bestimme, wie viel Liter Gas man bei Zimmertemperatur (25 °C) bei einem Druck von 1,5 bar entnehmen kann.

Antwort:

Wir verwenden das ideale Gasgesetz, das besagt, dass das Produkt aus Druck und Volumen proportional zur Temperatur ist. Wenn wir die Anfangsbedingungen (Druck, Volumen und Temperatur) mit den Endbedingungen vergleichen, erhalten wir:

$$p_1 \cdot \frac{V_1}{T_1} = p_2 \cdot \frac{V_2}{T_2}$$

(p_1, p_2 ... Anfangs-/Enddruck, V_1, V_2 ... Anfangs-/Endvolumen,
 T_1, T_2 ... Anfangs-/Endtemperatur)

Die Temperatur- und Volumenangaben müssen wir zuerst in die richtigen Einheiten umrechnen:

$$T_1 = (10 + 273,15) \text{ K} = 283,15 \text{ K}$$

$$T_2 = (25 + 273,15) \text{ K} = 298,15 \text{ K}$$

$$V_1 = 40 \text{ l} = 0,04 \text{ m}^3$$

Wir lösen diese Gleichung nach dem Endvolumen V_2 auf und setzen die gegebenen Werte ein:

$$V_2 = p_1 \cdot V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1 \cdot p_2} = 150 \text{ bar} \cdot 0,04 \text{ m}^3 \cdot \frac{298,15 \text{ K}}{283,15 \text{ K} \cdot 1,5 \text{ bar}} \approx 4,21 \text{ m}^3 = 4\,210 \text{ l}$$

Davon bleiben 40 Liter in der Stahlflasche. **Man kann daher bei einem Druck von 1,5 bar und einer Temperatur von 25 °C etwa 4 170 Liter Gas entnehmen.**

Rechenaufgabe 5:

Durch eine schnelle Autofahrt wird die Luft in den Reifen auf 50 °C erwärmt. Das Volumen nimmt nicht wesentlich zu, aber der Druck in den Reifen steigt. Beim Start war der Druck 2,2 bar bei einer Temperatur von 20 °C. Bestimme den aktuellen Reifendruck. Beachte, dass der Überdruck gegenüber dem äußeren Luftdruck von ca. 1 bar als Reifendruck bezeichnet wird.

Antwort:

Wir verwenden das ideale Gasgesetz, das besagt, dass das Produkt aus Druck und Temperatur konstant ist, wenn das Volumen konstant bleibt. Wenn wir die Anfangsbedingungen (Druck und Temperatur) mit den Endbedingungen vergleichen, erhalten wir:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

(p_1, p_2 ... Anfangs-/Enddruck, T_1, T_2 ... Anfangs-/Endtemperatur)

Der Anfangsdruck p_1 setzt sich aus dem atmosphärischen Druck (Druck im Freien) von 1 bar und dem Überdruck von 2,2 bar im Reifen zusammen: $p_1 = 1 \text{ bar} + 2,2 \text{ bar} = 3,2 \text{ bar}$

Der Reifendruck p_2 nach der Erwärmung kann somit wie folgt berechnet werden:

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 3,2 \text{ bar} \cdot \frac{323,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} \approx 3,5 \text{ bar}$$

Der Druck im Reifen nimmt von (2,2 + 1) bar auf 3,5 bar zu. Der gemessene Reifendruck ist daher 2,5 bar.

Rechenaufgabe 6:

Die Reifen eines PKW weisen einen Überdruck (gegenüber dem äußeren Luftdruck) von 2 bar auf. Die Auflagefläche der vier Reifen auf der Straßenoberfläche ist 0,05 m². Ermittle die Masse, die das von diesen Reifen getragene Auto haben darf.

Antwort:

Um diese Frage zu beantworten, können wir das Prinzip verwenden, dass der Druck gleich der Kraft geteilt durch die Fläche ist. In diesem Fall ist die Kraft das Gewicht des Autos, das durch die Schwerkraft auf die Reifen ausgeübt wird. Wir können die Gleichung so umstellen, dass sie die Masse (m) des Autos ergibt:

$$m = p \cdot \frac{A}{g}$$

(p ... Gesamtdruck (2+1) bar, A ... Gesamtauflagefläche der Reifen, g ... Schwerkraft (9,81 m/s²))

Der Gesamtdruck muss zuerst in $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ (Pa) umgerechnet werden: $p = 3 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
Wenn wir die gegebenen Werte einsetzen, können wir die Masse des Autos berechnen:

$$m = p \cdot \frac{A}{g} = 3 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \frac{0,05 \text{ m}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \approx \mathbf{1\ 529 \text{ kg}}$$

Das Auto darf bei einem Überdruck von 2 bar somit eine Masse von etwa 1 529 kg haben.

4 Energie und Entropie, S. 137

Teste dein Wissen 1:

Wodurch unterscheidet sich ein isoliertes System von einem offenen System? Wähle die richtigen Aussagen aus.

- a) Es gibt keinen Energie- und Teilchenaustausch mit der Umgebung.
- b) Das isolierte System besitzt innere Energie im Gegensatz zum offenen System.
- c) Es ist von der Umgebung isoliert.

Antwort:

Aussage „a) Es gibt keinen Energie- und Teilchenaustausch mit der Umgebung.“ ist richtig.

Ein abgeschlossenes System tauscht weder Energie noch Materie mit der Umgebung aus, es wird auch als isoliertes System bezeichnet. Die Gesamtenergie E bleibt nach dem Energieerhaltungssatz somit konstant, wobei sich die einzelnen Energieformen ineinander umwandeln können. Ein offenes System kann mit der Umgebung Energie (und evtl. auch Materie) austauschen.

Aussage „c) Es ist von der Umgebung isoliert.“ ist richtig. Ein isoliertes System ist in der Tat von seiner Umgebung isoliert, was bedeutet, dass es keinen Austausch von Energie oder Materie mit seiner Umgebung gibt. Ein offenes System hingegen ist nicht von seiner Umgebung isoliert und kann Energie und Teilchen Energie (und evtl. auch Materie) austauschen.

Teste dein Wissen 2:

In einer Druckrohrleitung fließt Wasser aus einem Speichersee zum Kraftwerk. Welche Energieform gehört nicht zur inneren Energie? Kreuze die richtige Aussage an.

- a) die kinetische Energie des strömenden Wassers
- b) die kinetische Energie der Wärmebewegung der Wassermoleküle
- c) die zwischenmolekularen Kräfte

Antwort:

Aussagen „a) Die kinetische Energie des strömenden Wassers“ ist richtig.

Die innere Energie eines Systems umfasst die kinetische Energie der Wärmebewegung der Moleküle und die potenzielle Energie, die sich aus den zwischenmolekularen Anziehungskräften ergibt. Die kinetische Energie des strömenden Wassers ist jedoch eine Form der mechanischen Energie und gehört nicht zur inneren Energie.

Teste dein Wissen 3:

In welcher Weise kann man die innere Energie eines Körpers erhöhen?
Kreuze die richtigen Antworten an.

- a) durch Wärmeleitung
- b) durch Wärmestrahlung
- c) durch Beschleunigungsarbeit

Antwort:

Antwort „a) durch Wärmeleitung“ ist richtig: Wärmeleitung ist der Prozess, bei dem thermische Energie in Form von Teilchenstößen vom heißeren Teil des Körpers zum kälteren Teil übertragen wird. Dies erhöht die innere Energie des Körpers.

Antwort „b) durch Wärmestrahlung“ ist richtig: Wärmestrahlung ist der Prozess, bei dem ein Körper Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung (wie das Licht) absorbiert oder abgibt. Wenn ein Körper Wärmestrahlung absorbiert, erhöht sich seine innere Energie.

Teste dein Wissen 4:

Wodurch unterscheidet sich der erste Hauptsatz vom allgemeinen Erhaltungssatz der Energie?

Antwort:

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre besagt, dass die innere Energie eines Körpers durch Arbeit W und durch Wärme Q geändert werden kann. Somit betrifft dieser lediglich die innere Energie.

Der allgemeine Erhaltungssatz der Energie ist ein umfassenderes Prinzip, das besagt, dass die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems immer konstant bleibt, unabhängig von den Prozessen, die innerhalb des Systems stattfinden. Dies schließt alle Formen von Energien ein.

Der Hauptunterschied zwischen den beiden besteht somit darin, dass der Erste Hauptsatz spezifisch für die Änderungen der inneren Energie in thermodynamischen Systemen gilt, während der allgemeine Erhaltungssatz der Energie für alle Arten von Energie in allen physikalischen Systemen gilt.

Teste dein Wissen 5:

Erkläre, warum beim Mischen von heißem Wasser (Temperatur T_1) und kaltem Wasser (Temperatur T_2 , $T_2 < T_1$) die Entropie der gesamten Wassermenge zunimmt.

Antwort:

Eine Erhöhung der Temperatur T resultiert aus der Zufuhr einer entsprechenden Wärmemenge Q . Bei einer irreversiblen Temperaturänderung wird beispielsweise Wärme von einem heißen Körper zu einem kälteren Körper übertragen. Dieser Prozess erhöht die Entropie $\Delta S = Q/T$ und kann nicht umgekehrt werden, ohne zusätzliche Energie in das System einzuführen.

Teste dein Wissen 6:

Beschreibe, wodurch sich reversible von irreversiblen Vorgängen unterscheiden.

Beispielantwort:

Reversible und irreversible Prozesse unterscheiden sich hauptsächlich in der Art und Weise, wie sie auf Änderungen reagieren und ob sie in ihren ursprünglichen Zustand zurückkehren können oder nicht.

Reversible Prozesse sind idealisierte Prozesse, die so langsam ablaufen, dass das System zu jedem Zeitpunkt nahezu im thermodynamischen Gleichgewicht bleibt. Sie können in umgekehrter Richtung genauso ablaufen, wie sie vorwärts ablaufen, ohne dass dabei eine Änderung der Gesamtenergie und Entropie eintritt.

Irreversible Prozesse hingegen sind Prozesse, die nur mit zusätzlichem Aufwand an Energie rückgängig gemacht werden können. Sie führen zu einer dauerhaften Änderung im System und erhöhen die Entropie. Irreversible Prozesse treten in der Realität häufiger auf als reversible Prozesse.

Teste dein Wissen 7:

Diskutiere, ob in einem Teil eines Systems die Entropie abnehmen kann.

Beispielantwort:

Ja, in einem Teil eines Systems kann die Entropie abnehmen. Es ist wichtig zu beachten, dass die Entropie eine Zustandsgröße ist, die für das gesamte System definiert ist und nicht für Teile davon. Die Gesamtentropie eines isolierten Systems kann nicht abnehmen, sondern strebt immer einem Maximum an. Wenn wir jedoch ein System in offene Teile unterteilen und die Entropie jedes Teils betrachten, kann die Entropie eines Teils abnehmen, solange die Entropie eines anderen Teils des Systems um einen mindestens gleich großen Betrag zunimmt.

Rechenaufgabe 1:

Ist der Mischungsvorgang von 2 l Wasser von 45 °C und 1 l Wasser von 15 °C irreversibel oder reversibel? Berechne die Entropieänderung ($c_{\text{Wasser}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Antwort:

Die Änderung der Entropie eines Systems beträgt:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

(Q ... übertragene Wärme, T ... entsprechende Temperatur)

Da die Dichte von Wasser etwa 1 kg/l beträgt, haben wir 2 kg Wasser bei $T_{\text{warm}} = 45 \text{ °C}$ und 1 kg Wasser bei $T_{\text{kalt}} = 15 \text{ °C}$. Wenn diese Mengen Wasser gemischt werden, wird die Endtemperatur T_{end} irgendwo zwischen 15 °C (288,15 K) und 45 °C (318,15 K) liegen. Da die Menge an Wasser bei 45 °C doppelt so groß ist wie die Menge bei 15 °C, wird die Endtemperatur näher an 45 °C liegen müssen. Wir können die Endtemperatur T_{end} berechnen, indem wir die Wärmemengen gleichsetzen, die von dem wärmeren Wasser abgegeben und von dem kälteren Wasser aufgenommen werden:

$$Q = c_{\text{Wasser}} \cdot m_{\text{warm}} \cdot (T_{\text{warm}} - T_{\text{end}}) = c_{\text{Wasser}} \cdot m_{\text{kalt}} \cdot (T_{\text{end}} - T_{\text{kalt}})$$

Lösen wir diese Gleichung nach T_{end} auf, erhalten wir:

$$T_{\text{end}} = \frac{m_{\text{warm}} \cdot T_{\text{warm}} + m_{\text{kalt}} \cdot T_{\text{kalt}}}{m_{\text{warm}} + m_{\text{kalt}}}$$

Setzen wir die gegebenen Werte ein, erhalten wir:

$$T_{\text{end}} = \frac{2 \text{ kg} \cdot 318,15 \text{ K} + 1 \text{ kg} \cdot 288,15 \text{ K}}{(2 \text{ kg} + 1 \text{ kg})} = 308,15 \text{ K} = 35 \text{ °C}$$

Folgt für die übertragene Wärmemenge Q :

$$Q = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 2 \text{ kg} \cdot (318,15 - 308,15 \text{ K}) = 83600 \text{ J}$$

Jetzt können wir die Entropieänderung für jedes Wasservolumen berechnen und dann addieren, um die Gesamtentropieänderung zu erhalten:

(Achtung! Da das warme Wasser die entsprechende Wärmemenge Q abgibt, wird dessen Entropiebeitrag negativ gerechnet.)

$$\Delta S = -\frac{Q}{T_{\text{warm}}} + \frac{Q}{T_{\text{kalt}}} = Q \cdot \frac{(T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}})}{(T_{\text{warm}} \cdot T_{\text{kalt}})} \approx 83600 \text{ J} \cdot \frac{30 \text{ K}}{91675 \text{ K}^2} \approx 27,4 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Da die Entropieänderung $\Delta S = 27,4 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} > 0$ folgt, dass der Mischungsvorgang irreversibel ist.

Rechenaufgabe 2:

Die Temperatur eines Bügeleisens beträgt 250 °C. Das Gerät hat eine Leistung von 1000 W. Ermittle, wie stark sich die Entropie an der Unterseite des Bügeleisens pro Sekunde ändert.

Antwort:

Um die Änderung der Entropie pro Sekunde zu berechnen, können wir die Formel für die Entropieänderung verwenden, die wie folgt lautet:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

(Q ... übertragene Wärme, T ... Temperatur des Bügeleisens)

In diesem Fall ist die zugeführte Wärmeenergie gleich der Leistung des Bügeleisens multipliziert mit der Zeit. Da die Leistung des Bügeleisens 1000 Watt (1 Kilowatt) beträgt und 1 Kilowatt gleich 1000 Joule pro Sekunde ist, beträgt die zugeführte Wärmeenergie pro Sekunde 1000 Joule. Die Temperatur des Bügeleisens beträgt 250 °C (523,15 K).

Setzen wir diese Werte in die Formel ein, erhalten wir:

$$\Delta S = \frac{1000 \text{ J}}{523,15 \text{ K}} \approx 1,91 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Die Entropie an der Unterseite des Bügeleisens ändert sich daher pro Sekunde um etwa $1,91 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Rechenaufgabe 3:

Ein Haus wird mit einer Leistung von 25 kW beheizt. Die Innentemperatur ist 21 °C, die Außentemperatur -10 °C. Bestimme, um wie viel sich die Entropie pro Sekunde an der Innenwand des Hauses ändert. Wie stark ändert sie sich pro Sekunde an der Außenwand?

Antwort:

Um die Änderung der Entropie pro Sekunde zu berechnen, können wir die Formel für die Entropieänderung verwenden, die wie folgt lautet:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

(Q ... übertragene Wärme, T ... entsprechende Temperatur)

In diesem Fall ist die zugeführte Wärmeenergie gleich der Leistung des Heizsystems multipliziert mit der Zeit. Da die Leistung des Heizsystems 25 Kilowatt beträgt und 1 Kilowatt gleich 1000 Joule pro Sekunde ist, beträgt die zugeführte Wärmeenergie pro Sekunde 25 000 Joule. Die Innentemperatur beträgt 21 °C (294,15 K) und die Außentemperatur -10 °C (263,15 K).

Setzen wir diese Werte in die Formel ein, erhalten wir:

Für die Innenwand: (Negatives Vorzeichen, da Energie aus dem Haus fließt.)

$$\Delta S_{\text{innen}} = -\frac{25000 \text{ J}}{294,15 \text{ K}} \approx -85 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Für die Außenwand:

$$\Delta S_{\text{außen}} = -\frac{25000 \text{ J}}{263,15 \text{ K}} \approx 95 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Daher ändert sich die Entropie an der Innenwand des Hauses pro Sekunde um etwa $85 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ und an der Außenwand um etwa $95 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Rechenaufgabe 4:

Die Entropie des Universums nimmt zu. Die Sonne strahlt bei einer Temperatur von ca. 6 000 K Energie ab. Auf die Erde trifft eine Strahlungsleistung von ca. $1,7 \cdot 10^{17} \text{ W}$, die auch wieder abgestrahlt wird. Die mittlere Temperatur der Erde beträgt 15 °C = 288 K. Ermittle, um welchen Faktor dabei die Entropie zunimmt.

Antwort:

Die Erde erhält von der Sonne hochwertige Energie mit niedriger Entropie und strahlt denselben Energiebetrag mit hoher Entropie in den Weltraum ab:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

(Q ... übertragene Wärme, T ... entsprechende Temperatur)

Der Faktor, um den die Entropie zunimmt, ist das Verhältnis von ΔS_{Erde} zu ΔS_{Sonne} .
Dadurch löscht sich der Betrag der Wärmemenge (Strahlungsleistung mal Sekunde) in der Berechnung aus und wir erhalten:

$$\mathbf{Faktor} = \frac{\Delta S_{Erde}}{\Delta S_{Sonne}} = \frac{T_{Erde}}{T_{Sonne}} = \frac{6\,000\text{ K}}{288\text{ K}} \approx \mathbf{20,8}$$

Die Entropie nimmt daher um einen Faktor von etwa 20,8 zu.

5 Wärme- und Kältetechnik, S. 148

Teste dein Wissen 1:

Was ist der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors?

Kreuze die richtige Aussage an und begründe deine Entscheidung.

- a) Verhältnis von thermischer zu mechanischer Energie
- b) Verhältnis von mechanischer zu chemischer Energie
- c) Verhältnis von chemischer zu mechanischer Energie

Antwort:

Aussage „b) Verhältnis von mechanischer zu chemischer Energie.“ ist richtig.

Der Wirkungsgrad η einer Wärmekraftmaschine ist allgemein das Verhältnis der gewonnenen mechanischen Nutzarbeit W zur aufgewendeten Wärme Q .

In einem Verbrennungsmotor ist die zugeführte Wärmeenergie Q (im Idealfall) gleich der chemischen Energie des Brennstoffs, und die Nutzenergie ist die mechanische Energie, die der Motor erzeugt. Der Motor soll die chemische Energie, welche durch Verbrennung als thermische Energie zur Verfügung steht, mit möglichst wenig Wärmeverlust und geringem Schadstoffausstoß in mechanische Energie (Zylindertakt) umwandeln. Daher ist der Wirkungsgrad das Verhältnis von mechanischer zu chemischer Energie.

Beachte, dass der Wirkungsgrad eines realen Verbrennungsmotors aufgrund von Wärmeverlusten und anderen Faktoren oft deutlich unter 100% liegt.

Teste dein Wissen 2:

Wodurch unterscheidet sich ein reversibler Vorgang von einem irreversiblen?

Kreuze die richtige Aussage an.

- a) Er verläuft langsam.
- b) Er verläuft ohne Reibung.
- c) Er kann in umgekehrter Richtung ablaufen.

Antwort:

Reversible Prozesse sind idealisierte Prozesse, die so langsam ablaufen, dass das System zu jedem Zeitpunkt nahezu im thermodynamischen Gleichgewicht bleibt. Sie können in umgekehrter Richtung genauso ablaufen, wie sie vorwärts ablaufen, ohne dass dabei eine Änderung der Gesamtenergie und Entropie eintritt.

Daher ist Aussage „c) Er kann in umgekehrter Richtung ablaufen.“ richtig.

Teste dein Wissen 3:

Wenn man die Kühlschranktür offen lässt, wird es im Raum

- a) kühler
- b) wärmer
- c) weder wärmer noch kühler

Antwort:

Ein Kühlschrank entfernt Wärme aus seinem Inneren und gibt diese Wärme an die Umgebung ab, um das Innere kühl zu halten. Wenn die Tür offen ist, muss der Kompressor durchgehend arbeiten, um die Temperatur im Inneren niedrig zu halten, da ständig warme Luft aus dem Raum einströmt. Dabei verbraucht der Kühlschrank mehr Strom (elektrische Energie) und wandelt diesen in überschüssige thermische Energie um, welche wiederum als Wärme an den Raum abgegeben wird.

Antwort b) ist somit richtig. Wenn man den Kühlschrank offen lässt, wird es im Raum wärmer.

Teste dein Wissen 4:

Welche der folgenden Anlagen hat den größten Wirkungsgrad?

Kreuze die richtige Aussage an und begründe deine Entscheidung.

- a) Dampfmaschine
- b) Ottomotor
- c) Generator

Antwort:

Aussage „c) Generator“ ist richtig.

Generatoren für die Stromerzeugung arbeiten nahezu verlustfrei ($\eta \approx 98\%$).

Daher hat der Generator den größten Wirkungsgrad unter den genannten Anlagen. Dies liegt daran, dass Generatoren sehr effizient mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln können.

Teste dein Wissen 5:

Wähle die Maschine aus, bei der man Arbeit zuführen muss.

Begründe deine Entscheidung.

- a) Verbrennungsmotor
- b) Kühlschrank

Antwort:

b) Kühlschrank ist richtig.

Bei einem Kühlschrank entnimmt der Kompressor elektrische Energie aus dem Stromnetz die er dann für den Kühlprozess in mechanische Arbeit umwandelt. Der Kompressor pumpt das gasförmige Kältemittel in den Verflüssiger an der Rückwand des Kühlschranks und komprimiert es. Diese Arbeit wird somit dem Kühlschrank für die Kühlung zugeführt.

Teste dein Wissen 6:

Der Wirkungsgrad einer Dampfturbine ist umso größer,

- a) je mehr Brennstoff verbraucht wird
- b) je weniger Wasser gebraucht wird
- c) je heißer der eintretende Dampf ist

Antwort:

Antwort c) ist richtig. Der Wirkungsgrad einer Dampfturbine ist umso größer, je heißer der eintretende Dampf ist.

Der Wirkungsgrad einer Dampfturbine steigt tendenziell mit zunehmender Durchschnittstemperatur, bei der durch Wärmeübertragung Energie zugeführt wird. Höhere Wirkungsgrade können durch Erhöhung der Dampftemperatur erreicht werden.

Dampfturbinen haben im Vergleich zur Kolbendampfmaschine zwei wesentliche Vorteile:

- Statt der pulsierenden Kolbenbewegung rotiert die Turbine gleichmäßig.
- Es gibt innerhalb der Turbine nur einen thermodynamischen Vorgang, die Druck und Temperaturabnahme des Dampfes, sodass die Maschine in thermodynamischer Hinsicht leichter optimiert werden kann.

Rechenaufgabe 1:

Mit Sonnenenergie kann man Wasser in Flachkollektoren auf 80 °C erwärmen. Jemand schlägt vor, dieses Warmwasser zum Betrieb einer Wärmekraftmaschine zu verwenden. Bestimme den Wirkungsgrad, den man bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C bestenfalls erreichen könnte.

Antwort:

Der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine kann mit dem Carnot-Wirkungsgrad bzw. thermodynamischen Wirkungsgrad berechnet werden:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{kalt}}}{T_{\text{heiß}}}$$

In diesem Fall sind die entsprechenden Temperaturen:

$$T_{\text{heiß}} = 80 \text{ °C} = 353,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{kalt}} = 20 \text{ °C} = 293,15 \text{ K}$$

Setzen wir diese Werte in die Formel ein:

$$\eta = 1 - \frac{293,15 \text{ K}}{353,15 \text{ K}} \approx 0,17$$

Der (maximale) Wirkungsgrad, den man bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C bestenfalls erreichen könnte, beträgt etwa 17 %.

Rechenaufgabe 2:

Ein Wärmekraftwerk benützt Dampfturbinen zur Erzeugung elektrischer Energie.

Die Arbeitstemperatur beträgt 500 °C, die Abgastemperatur 30 °C. Bestimme den thermodynamischen Wirkungsgrad für dieses Kraftwerk. Berechne, wie sich der Wirkungsgrad ändert, wenn die Abgastemperatur auf 70 °C hinaufgesetzt wird.

Antwort:

Der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine wie z.B. einer Dampfturbine kann mit dem Carnot-Wirkungsgrad bzw. thermodynamischen Wirkungsgrad berechnet werden:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{kalt}}}{T_{\text{heiß}}}$$

In diesem Fall sind die entsprechenden Temperaturen:

$$T_{\text{Arbeit}} = 500 \text{ °C} = 773,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{Abgas1}} = 30 \text{ °C} = 303,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{Abgas2}} = 70 \text{ °C} = 343,15 \text{ K}$$

Setzen wir diese Werte in die Formel ein:

$$\eta_{30} = 1 - \frac{303,15\text{K}}{773,15\text{K}} \approx 0,61$$

sowie für die höhere Abgastemperatur:

$$\eta_{70} = 1 - \frac{343,15\text{K}}{773,15\text{K}} \approx 0,56$$

Der thermodynamische Wirkungsgrad des Kraftwerks sinkt von etwa 61 % auf etwa 56%, also um 5 %, wenn die Abgastemperatur von 30 °C auf 70 °C hinaufgesetzt wird.

Rechenaufgabe 3:

Ein Wärmekraftwerk hat einen Wirkungsgrad von 40 % und eine Nutzleistung von 1 GW. Ermittle, wie viel Abwärme als Kühlleistung an die Umwelt abgegeben wird. Die Abwärme soll von einem Fluss aufgenommen werden, dessen Wasser um nicht mehr als 2 °C erwärmt werden darf. Überprüfe, welche Wasserführung (in m³/s) der Fluss zumindest aufweisen muss.

Antwort:

Um die Abwärme zu berechnen, die als Kühlleistung an die Umwelt abgegeben wird, müssen wir zuerst die Gesamtleistung des Kraftwerks berechnen. Da der Wirkungsgrad 40 % beträgt, ist die Gesamtleistung des Kraftwerks gleich der Nutzleistung geteilt durch den Wirkungsgrad:

$$P_{\text{gesamt}} = \frac{P_{\text{nutz}}}{\eta} = \frac{1\text{ GW}}{0,4} = 2,5\text{ GW}$$

Die Abwärme ist dann die Differenz zwischen der Gesamtleistung und der Nutzleistung:

$$P_{\text{abwärme}} = P_{\text{gesamt}} - P_{\text{nutz}} = 2,5\text{ GW} - 1\text{ GW} = 1,5\text{ GW}$$

Um die erforderliche Wasserführung des Flusses zu berechnen, verwenden wir die Formel für die Wärmemenge, die ein Stoff aufnimmt oder abgibt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

(*m* ... Masse des Wassers, *c* ... spezifische Wärmekapazität des Wassers (ca. 4,18 kJ · kg⁻¹ · K⁻¹), *ΔT*... Temperaturänderung)

Wir lösen diese Gleichung nach Masse *m* auf und setzen $Q = P_{\text{abwärme}} \cdot t$ ein:

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{P_{\text{abwärme}} \cdot t}{c \cdot \Delta T}$$

Da wir die Masse pro Sekunde (also die Wasserführung) berechnen wollen, setzen wir $t = 1\text{ s}$ ein:

$$m = \frac{1,5 \cdot 10^9\text{ W} \cdot 1\text{ s}}{(4\,180\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 2\text{ K})} \approx 1,79 \cdot 10^5\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Das bedeutet, der Fluss muss eine Wasserführung von mindestens 179 Kubikmetern pro Sekunde aufweisen, um die Abwärme aufzunehmen und das Wasser nicht um mehr als 2 °C zu erwärmen.

Rechenaufgabe 4:

Im Kessel einer Dampflokomotive herrscht bei einer Temperatur von 300 °C ein Druck von 15 bar. Die Lokomotive hat zwei Zylinder mit Kolben, die mittels der Schiebersteuerung nach Watt (142.3) durch den Dampf hin und her bewegt werden. Bei jedem Arbeitstakt werden die Kolben mit einer Fläche von je 0,2 m² durch die Wirkung des Dampfdruckes um 0,4 m verschoben.

- Bestimme, wie groß die bei einem Arbeitstakt verrichtete Arbeit ist.
- Ermittle die Leistung der Dampflokomotive, wenn pro Minute (nicht pro Sekunde!) 600 Arbeitstakte erfolgen.

Antwort:

a) Die Arbeit, die während eines Arbeitstakts verrichtet wird, kann mit der Formel für die Arbeit in einem Druck-Volumen-Prozess berechnet werden:

$$W = p \cdot \Delta V$$

(p ... Druck, ΔV ... Volumenänderung)

Der Druck p muss in Pascal umgerechnet werden: $16 \text{ bar} = 15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Die Volumenänderung ist das Produkt aus der Fläche A des Kolbens und der Verschiebung d :

$$\Delta V = A \cdot d = 0,2 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \text{ m} = 0,08 \text{ m}^3$$

Setzen wir diese Werte in die Formel ein, erhalten wir:

$$W = 15 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,08 \text{ m}^3 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ J} = \mathbf{120 \text{ kJ}}$$

Bei einem Arbeitstakt wird somit eine Arbeit von 120 kJ verrichtet.

b) Die Leistung P ist definiert als die Arbeit W geteilt durch die Zeit t . Da pro Minute 600

Arbeitstakte erfolgen, ist die Zeit für einen Arbeitstakt $t = 1 \text{ min} / 600 = 1/10 \text{ s}$.

Setzen wir diese Werte in die Formel ein, erhalten wir:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1,2 \cdot 10^5 \text{ J}}{1/10 \text{ s}} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ W} = \mathbf{1,2 \text{ MW}}$$

Das bedeutet, die Dampflokomotive hat eine Leistung von 1,2 MW, wenn pro Minute 600 Arbeitstakte erfolgen.

Rechenaufgabe 5:

Bei einem Viertakt-Benzin-Motor mit einem Hubraum von 1400 cm^3 ist während des Arbeitstakts der mittlere Druck im Zylinder 15 bar .

a) Bestimme, wie viel Arbeit der Motor bei einem Arbeitstakt verrichtet.

b) Ermittle die Leistung des Motors (in Kilowatt) bei 6 000 Umdrehungen pro Minute.

Antwort:

a) Die Arbeit, die während eines Arbeitstakts verrichtet wird, kann mit der Formel für die Arbeit in einem Druck-Volumen-Prozess berechnet werden:

$$W = p \cdot \Delta V$$

(p ... Druck, ΔV ... Volumenänderung)

In diesem Fall ist der Druck $p = 15 \text{ bar} = 15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ und das Volumen

$$\Delta V = 1400 \text{ cm}^3 = 1400 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3.$$

Wir setzen die Werte in die Formel ein und erhalten:

$$W = 15 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 1400 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = \mathbf{2100 \text{ J} = 2,1 \text{ kJ}}$$

Der Motor verrichtet bei einem Arbeitstakt somit eine Arbeit von 2,1 kJ.

b) Die Leistung des Motors kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$P = W/t$$

(W ... verrichtete Arbeit, t ... Zeit pro Arbeitstakt)

Die Arbeitstaktzeit t kann aus der gegebenen Drehzahl berechnet werden:

Bei 6000 Umdrehungen pro Minute hat man 6000/2 Arbeitstakte pro Minute (da nur bei jeder zweiten Umdrehung Arbeit verrichtet wird), also 3000 Arbeitstakte pro Minute oder 3000/60 Arbeitstakte pro Sekunde, also $t = 1/(3000/60) \text{ s} = 0,02 \text{ s}$.

Setzen wir diese Werte in die Formel ein:

$$P = \frac{2100 \text{ J}}{0,02 \text{ s}} = 105\,000 \text{ W} = \mathbf{105 \text{ kW}}$$

Also hat der Motor bei 6 000 Umdrehungen pro Minute eine Leistung von 105 kW.

Beachte, dass diese Berechnungen idealisierte Werte liefern und in der Praxis durch verschiedene Faktoren wie Reibung und Wärmeverluste beeinflusst werden können.