

turdifferenz mehr Wärmeenergie aufgewandt werden als bei konstantem Volumen.

Die Wärmekapazitäten idealer Gase bei konstantem Volumen sind

$$C_V = \frac{3}{2} nR \quad (\text{einatomiges Gas})$$

und

$$C_V = \frac{5}{2} nR \quad (\text{zweiatomiges Gas}).$$

12. Der Gleichverteilungssatz besagt: Befindet sich ein System im Gleichgewicht, so entfällt auf jeden Freiheitsgrad die mittlere Energie  $\frac{1}{2} k_B T$  pro Teilchen bzw.  $\frac{1}{2} RT$  pro Mol. Einatomige Gase haben drei Freiheitsgrade, und zwar die der kinetischen Energie der Translationsbewegung in den drei Raumrichtungen. Zweiatomige Gase besitzen zwei weitere Freiheitsgrade, nämlich die der Rotation um die beiden Achsen, die senkrecht auf der Kernverbindungsachse stehen.
13. Die molare Wärmekapazität der meisten Festkörper beträgt  $3R$  (Regel von Dulong und Petit). Dieser Wert entspricht dem Gleichverteilungssatz, wenn man den Festkörper als Verbund von  $N_A$  Atomen pro Mol annimmt, die um ihre Gleichgewichtslage schwingen können, und zwar jeweils in den drei Raumrichtungen; dies entspricht sechs Freiheitsgraden (je drei für die kinetische und die potentielle Energie der Schwingung).

## Essay: Der Energiehaushalt der Erde und die globale Erwärmung

Jerrold H. Krenz,  
University of Colorado

Seit Millionen von Jahren leben Menschen auf der Erde. Aber erst seit rund 100 Jahren beeinflussen wir das Klima – vor allem aufgrund der Industrialisierung und des gewaltigen Anstiegs der Bevölkerung. Die weltweit gemittelte Temperatur ist seit 1900 um ca. 0,5 K angestiegen; der Meeresspiegel hob sich, die Gletscher und die polaren Eiskappen zogen sich zurück, und der Dauerfrost in Alaska und Sibirien wurde weniger streng. Die Verbrennung fossiler Materialien und die zunehmende Abholzung von Wäldern erhöhen den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Erdatmosphäre. Dies fördert die globale Erwärmung infolge des „Treibhauseffekts“, an dem auch andere gasförmige Substanzen beteiligt sind, die ständig freigesetzt oder erzeugt werden, darunter Stickstoffoxide, Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Ozon.

Es ist noch nicht zweifelsfrei geklärt, inwieweit die derzeitigen Klima-Modelle beweisen, ob der weltweite Temperaturanstieg bereits stattgefunden hat. Jedoch besteht Einigkeit darüber, daß bei unveränderter industrieller Aktivität und gleichbleibend starkem Straßenverkehr die Temperatur in den nächsten 50 bis 100 Jahren beträchtlich ansteigen wird (um 1,5 K bis 5,5 K). Eine globale Erwärmung in dieser Größenordnung hätte tiefgreifende und lang anhaltende Auswirkungen auf Landwirtschaft und Tierwelt sowie auf uns Menschen.

### Die Temperatur der Erde

Würde die Erde die Sonnenstrahlung lediglich absorbieren, so würde sie ständig wärmer werden. Sie strahlt jedoch auch Energie in den Weltraum ab. Es hat sich ein Gleichgewicht von Absorption und Emission eingestellt; wir sprechen hierbei vom Energiehaushalt der Erde. Eigentlich müßte man ihn Leistungshaushalt nennen, denn entscheidend ist die *Geschwindigkeit*, mit der die Energie absorbiert und emittiert wird.

Um die Prozesse zu verstehen, durch die die Erde erwärmt wird, müssen wir die Mechanismen betrachten, die die Temperatur der Erde (im Prinzip) konstant halten. Bei ihrem mittleren Abstand von der Sonne empfängt die Erde eine Strahlungsleistung von  $1353 \text{ W/m}^2$ . Dies ist die *Solarkonstante*  $S$ . Die Temperatur der Sonnenoberfläche beträgt etwa  $6000 \text{ K}$ ; daher enthält das von ihr emittierte Spektrum relativ kurze Wellenlängen, und das Strahlungsmaximum liegt bei rund  $500 \text{ nm}$ . Das wurde experimentell festgestellt und entspricht auch dem Wienschen Verschiebungsgesetz, wenn man

die Sonne als schwarzen Strahler ansieht (siehe Abschnitt 16.3).

Die von der Erde insgesamt absorbierte Sonnenstrahlung hängt von ihrem Querschnitt  $\pi R_E^2$  ab (darin ist  $R_E = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$  der Erdradius). Aber nicht die gesamte Strahlung, die auf der „Sonnenseite“ ankommt, wird absorbiert, sondern ein Anteil  $r \approx 30\%$  wird reflektiert. Also ist die von der Erde absorbierte Leistung

$$P_a = (1 - r) \pi R_E^2 S. \quad (1)$$

Einen Teil dieser absorbierten Strahlung emittiert die Erde wieder in den Weltraum. Die Oberflächentemperatur  $T_E$  der Erde beträgt durchschnittlich rund  $13^\circ\text{C}$  ( $\approx 286 \text{ K}$ ), und die Strahlungstemperatur der Atmosphäre liegt im Mittel bei  $-22^\circ\text{C}$  ( $\approx 251 \text{ K}$ ). Dies wird durch einen mittleren Emissionsgrad  $e \approx 0,6$  in der Strahlungsformel berücksichtigt. Die pro Quadratmeter der Erdoberfläche emittierte Leistung ist damit

$$P_e = e\sigma T_E^4. \quad (2)$$

Hierin ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante (Gleichung 16.18). Der größte Teil der Erdoberfläche ist mit Wasser bedeckt, dessen Temperatur sich zwischen Tag und Nacht kaum ändert. Weiterhin wird die Sonnenstrahlung nur von dem Teil der Erdoberfläche absorbiert, der der Sonne zugewandt ist. Dagegen emittiert die ganze Erdoberfläche Strahlung. Daher kann die Erde näherungsweise als kugelförmiger, strahlender Körper mit überall gleicher Oberflächentemperatur  $T_E$  angesehen werden, und die gesamte von der Erde abgegebene Strahlungsleistung ist

$$P_{\text{ges}} = 4\pi R_E^2 e\sigma T_E^4. \quad (3)$$

Wegen des Gleichgewichts von Emission und Absorption gilt

$$(1 - r) \pi R_E^2 S = 4\pi R_E^2 e\sigma T_E^4. \quad (4)$$

Die Gleichung beschreibt, mit den eben erläuterten Näherungen hinsichtlich der Oberflächentemperatur, das Strahlungsenergiegleichgewicht der Erde. Wir dividieren durch die Oberfläche ( $4\pi R_E^2$ ) und erhalten

$$(1 - r) S/4 = e\sigma T_E^4. \quad (5)$$

Dies ist die pro Quadratmeter absorbierte und wieder emittierte Strahlungsleistung; sie beträgt etwa  $237 \text{ W/m}^2$  (das entspricht vier  $60\text{-W}$ -Glühlampen auf einem Quadratmeter der Erdoberfläche).

**Tabelle 1** Mittlerer Beitrag einiger Energieformen, die einen geringeren Anteil als die Strahlung an dem Energiehaushalt der Erdoberfläche haben

Quelle	Beitrag (W/m <sup>2</sup> )
Radioaktiver Zerfall	0,06
Verbrennung von Treibstoffen	0,018
Gezeitenreibung	0,005

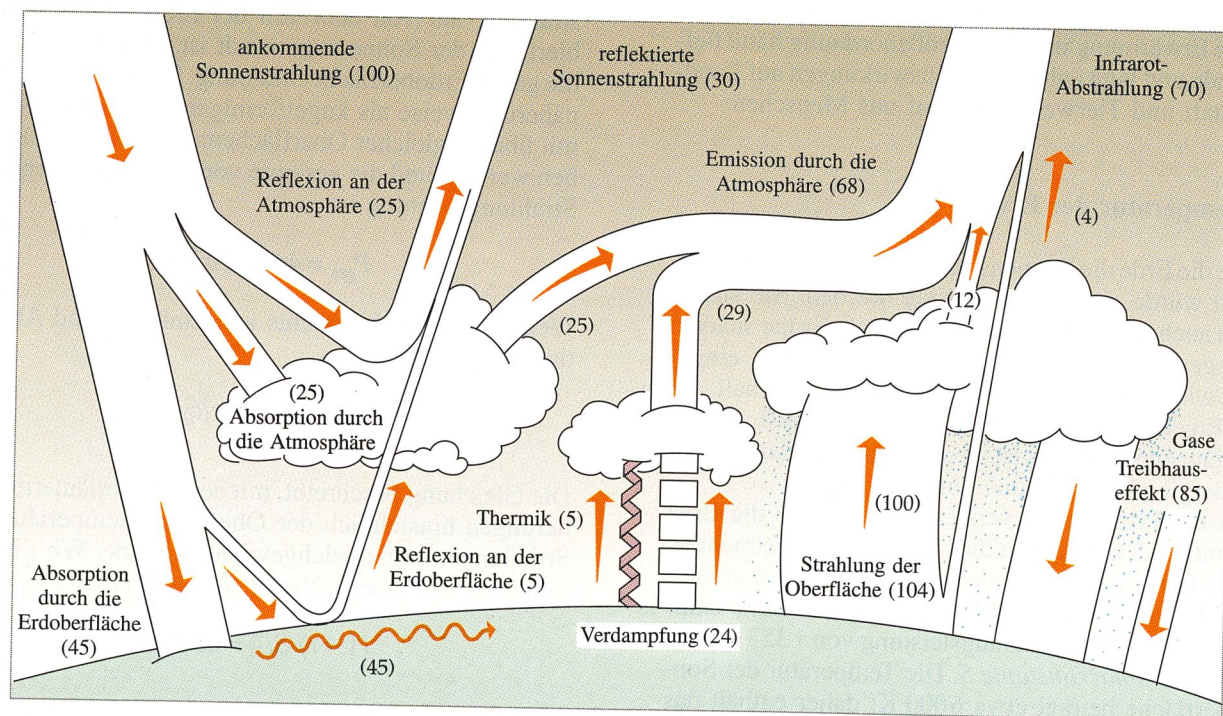
Andere Formen der Energieabgabe (siehe Tabelle 1) spielen eine wesentlich geringere Rolle. Wenn wir sie vernachlässigen, so können wir Gleichung (5) nach der Oberflächentemperatur  $T_E$  auflösen und erhalten

$$T_E = \left[ \frac{(1-r)S}{4e\sigma} \right]^{1/4}$$

Eine Abnahme des Reflexionsgrades  $r$  oder des Emissionsgrades  $e$  würde zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur führen. Beide Größen hängen hauptsächlich von den Eigenschaften der Gase ab, die sich in der Atmosphäre befinden.

### Einige Gase in der Atmosphäre absorbieren Wärmestrahlung

Die Erdatmosphäre ist für die ankommende Sonnenstrahlung ziemlich durchlässig, und ihre Hauptbestand-



**Abbildung 1** Der Energie- bzw. Leistungshaushalt der Erde, unter Berücksichtigung der Vorgänge in der Atmosphäre. Die angegebenen Werte sind Vielfache der über die gesamte Erdoberfläche gemittelten Solarkonstanten  $S/4$ ; siehe Gleichung (5). Die

teile (Stickstoff und Sauerstoff) lassen auch die langwellige Wärmestrahlung durch, die von der Erdoberfläche abgegeben wird. (Das trifft aber nicht für alle Gase zu.) Somit gelangt nahezu die gesamte eingestrahlte Energie bis zur Erdoberfläche. Diese emittiert längerwellige Wärmestrahlung, von der ein Teil durch die Atmosphäre absorbiert wird, was zur Erwärmung führt (Abbildung 1).

Der Begriff *Treibhauseffekt* für die Erwärmung der Erdatmosphäre ist inzwischen geläufig, ebenso die Bezeichnung *Treibhausgase* für die Substanzen, die diese Aufheizung infolge Absorption von Wärmestrahlung bewirken. Die beiden Wörter sind allerdings nicht ganz zutreffend gewählt, weil die Wirkungsweise eines Treibhauses auch auf einem anderen Mechanismus beruht, nämlich auf der Verminderung der Abkühlung durch Konvektion (siehe Abschnitt 16.3).

In der Atmosphäre sind es vor allem Wasserdampf und Kohlendioxid, die Wärmestrahlung absorbieren. Ohne diesen Vorgang wäre die Temperatur auf der Erde deutlich niedriger, und die meisten Lebensformen hätten sich nicht entwickeln können. Uns interessieren hier jedoch die nachteiligen Eigenschaften dieser Gase.

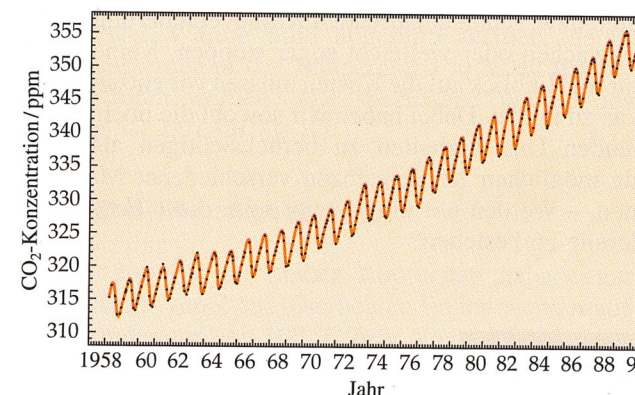
Die Effekte im Zusammenhang mit den Treibhausgasen sind sehr komplex. Wenn ihr Anteil an der Atmosphäre steigt und die Atmosphäre wärmer wird, verdunstet das Meerwasser schneller. Dadurch wird der Anteil des Wasserdampfes in der Atmosphäre höher,

Abbildung wurde entnommen aus Stephen H. Schneider, *The Greenhouse Effect: Science and Policy*, in *Science* 243, 771-781. (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung der American Association for the Advancement of Science)

was wiederum zu einem stärkeren Temperaturanstieg führt. Es besteht also eine positive Rückkopplung (eine gegenseitige Verstärkung) beider Effekte. Durch den höheren Wasserdampfgehalt der Atmosphäre wird die Wolkendecke dichter. Deren genauer Einfluß ist noch nicht vollständig geklärt. Sie erhöht einerseits den Reflexionsgrad und bremst damit die globale Erwärmung; andererseits vermindert sie die Wärmeabstrahlung und fördert dadurch die Erwärmung. Außerdem treten jahreszeitliche Schwankungen auf.

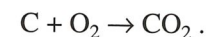
### Kohlendioxid

Der derzeitige Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre wird vor allem durch zwei Faktoren beeinflusst: die Verbrennung meist fossiler Brennstoffe sowie die weltweite Abnahme der Vegetation. Seit 1958 werden in Mauna Loa (Hawaii) genaue Messungen des Kohlendioxidgehalts durchgeführt. In Abbildung 2 sind die jahreszeitlichen Schwankungen des  $CO_2$ -Gehalts zu erkennen, die vor allem von den Unterschieden der Vegetation und damit der Photosyntheseaktivität herrühren. Abgesehen davon ist ein kontinuierlicher Anstieg zu verzeichnen. Zur Zeit beträgt der  $CO_2$ -Anteil der Atmosphäre rund 350 Volumen-ppm (Millionstel Volumenanteile). Analysen von Lufteinschlüssen in Gletschern ergaben, daß um das Jahr 1750 der  $CO_2$ -Gehalt bei etwa 280 Volumen-ppm lag. Seit Beginn der Industrialisierung hat der Kohlendioxidgehalt also innerhalb von rund 240 Jahren um ein Viertel zugenommen.



**Abbildung 2** Die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre in Volumen-ppm (Millionstel Volumenanteile), gemessen seit 1958 in Mauna Loa, Hawaii. (Mit freundlicher Genehmigung von John Chin)

Kohlendioxidemissionen sind vor allem eine Folge der Verbrennung des Kohlenstoffs der fossilen Energieträger, beispielsweise der Kohle:



Bei der Verbrennung der Kohlenwasserstoffe von Erdöl und Erdgas entstehen außerdem (durch die Oxidation des Wasserstoffs) beträchtliche Mengen des zweiten wichtigen Treibhausgases Wasserdampf.

Pro Jahr gelangen weltweit rund  $18 \cdot 10^{12}$  kg Kohlendioxid aus Verbrennungsvorgängen in die Atmosphäre. Der Verbrauch an fossilen Brennstoffen betrug beispielsweise im Jahre 1988 in den USA pro Kopf ungefähr 3,6 t Kohle, 2200 m<sup>3</sup> Erdgas und 4000 L Benzin. Damit haben die USA (mit nur rund 5 Prozent der Weltbevölkerung) einen Anteil von etwa 33 Prozent am weltweiten Verbrauch fossiler Energieträger. Die große Mehrheit der Weltbevölkerung verbraucht zwar im Durchschnitt pro Kopf weniger Brennstoffe, versucht aber ihren Lebensstandard zu heben, und steigert dabei ihren Energieverbrauch. So erscheint insgesamt eine enorme Steigerung der Verbrennung fossiler Materialien (und damit des  $CO_2$ -Ausstoßes) als nahezu unausweichlich. Zwar können höhere Wirkungsgrade und die Ausnutzung alternativer Energiequellen den Anstieg etwas verlangsamen, aber für das Jahr 2010 wird ein  $CO_2$ -Gehalt von 450 bis 550 Volumen-ppm erwartet. Es gibt zwei natürliche  $CO_2$ -Senken (Prozesse, durch die  $CO_2$  aus der Atmosphäre entfernt wird): Absorption im Meerwasser und Photosynthese der Pflanzen (hier sind besonders die tropischen Regenwälder und die Algen in den Meeren von Bedeutung). Da aber die Menge des im Meerwasser gelösten  $CO_2$  zunimmt (irgendwann also Sättigung erreicht wird) und immer mehr Wälder abgeholzt werden oder dem Waldsterben zum Opfer fallen, wird die Kapazität der Erde insgesamt,  $CO_2$  aus der Atmosphäre aufzunehmen, immer kleiner.

### Andere Treibhausgase

Verschiedene Gase – darunter Methan, Ozon, Stickstoffoxide und Fluorchlorkohlenwasserstoffe – sind in der Atmosphäre nur in Spuren vorhanden; sie absorbieren ebenfalls die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Wärmestrahlung und tragen damit zur Erwärmung bei. Die Konzentration des Methans ist 100mal geringer als die des Kohlendioxids, aber ein  $CH_4$ -Molekül kann 20mal mehr Strahlungsenergie absorbieren als ein  $CO_2$ -Molekül. Zudem nimmt die Methankonzentration pro Jahr um ein Prozent zu und hat sich in den letzten 250 Jahren verdoppelt. Auch hier kann sich eine selbstverstärkende positive Rückkopplung aufbauen, weil der globale Temperaturanstieg die Zersetzung organischer Substanzen (etwa in den Sümpfen) beschleunigt, wodurch wiederum mehr  $CH_4$  an die Atmosphäre abgegeben wird.

Das Ozon  $O_3$  entsteht bei photochemischen Reaktionen, die durch das Sonnenlicht ausgelöst werden und an denen auch Methan, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxide beteiligt sind (die häufigsten Verunreinigungen der

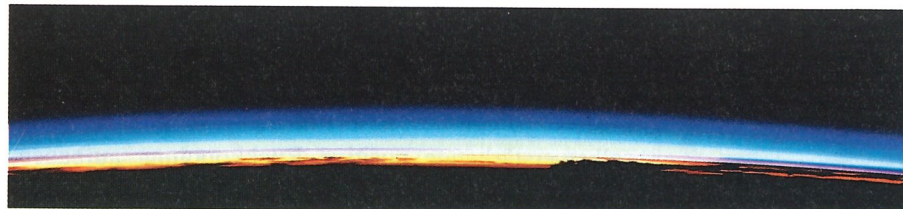
Atmosphäre). Die Ozonkonzentration in der Troposphäre, der untersten Schicht der Atmosphäre, stieg durch die Luftverschmutzung um 10 Prozent an – ungeachtet der Abnahme in der Stratosphäre vor allem über den Erdpolen („Ozonloch“). Ähnlich stark (um 5 bis 10 Prozent) hat der Gehalt an Stickstoffoxiden zugenommen, vorwiegend durch Abholzung von Wäldern, intensiven Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel und Verbrennung von Biomasse. Dies sind Begleiterscheinungen der landwirtschaftlichen Nutzung weiterer Landflächen.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) sind kein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre. Sie dienen als Kältemittel in Klima- und Kühlanlagen, zum Schäumen von Kunststoffen und als Treibgase in Spraydosen. Genau wie Kohlendioxid absorbieren sie Wärmestrahlung; außerdem zerstören sie die Ozonschicht in der Stratosphäre. Herstellung und Verbrauch der FCKWs gehen in vielen Ländern derzeit stark zurück. Dennoch nimmt – wegen ihrer chemischen Stabilität – ihr Anteil in der Atmosphäre immer noch zu und wird etwa 0,001 Volumenppm erreichen.

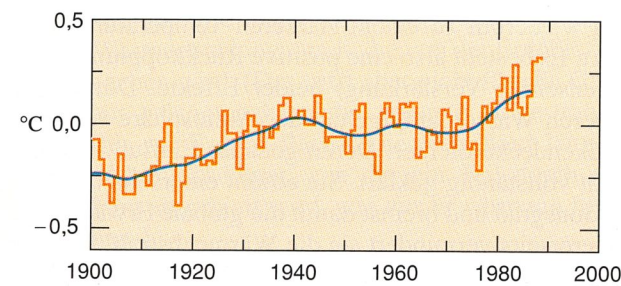
### Die globale Erwärmung

Die weltweit gemittelte Lufttemperatur ist seit 1900 um rund 0,5 K gestiegen (Abbildung 3). Die sechs bisher wärmsten Tage dieses Jahrhunderts traten alle nach 1980 auf. Allerdings sind weitere Daten nötig, damit detailliertere Aussagen über die Klimaveränderungen möglich sind – auch darüber, ob und inwieweit die Treibhausgase sie verursachen. Jedoch steht jetzt schon fest, daß deren ständig steigender Mengenanteil in der Atmosphäre am Temperaturanstieg zumindest mitwirkt. Würden wir mit Reaktionen und Änderungen warten, bis alle Einzelheiten geklärt sind, so würden die Schäden weiter zunehmen und könnten immer weniger gemildert oder behoben werden.

Die Auswirkung der globalen Erwärmung auf einzelne Gebiete ist nicht bekannt. Wahrscheinlich wird sich



Sonnenuntergang über dem Amazonas-Becken, aufgenommen aus der Raumfähre Challenger. Es ist sehr gut zu erkennen, wie dünn die Atmosphäre im Vergleich zum Erddurchmesser ist. (Foto: NASA, 83-HC-227)



**Abbildung 3** Die weltweit gemittelte Lufttemperatur, bezogen auf den zeitlichen Mittelwert von 1950 bis 1979. Seit Beginn des Jahrhunderts ist die Temperatur um 0,5 K angestiegen. Die Daten wurden an der Universität East Anglia und vom britischen Wetteramt ermittelt. (Aus: Richard A. Kerr, 1988 *Ties for Warmest Year*, in *Science* 243, 891; Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung der American Association for the Advancement of Science.)

die Verteilung der Niederschläge drastisch ändern, mit dramatischen Auswirkungen auf Landwirtschaft, wirtschaftliche Verflechtungen und Lebensumstände. Weiterhin wird das Festlandeis teilweise schmelzen. Dadurch wird der Meeresspiegel ansteigen, und die tiefer liegenden Landstriche, in denen ein Großteil der Menschheit lebt, werden überflutet oder zumindest bedroht.

Während der Erdgeschichte gab es viele einschneidende Klimawechsel. Im Unterschied zu diesen sind die heutigen Veränderungen jedoch direkt auf das Verhalten der Menschheit zurückzuführen, also keine natürlichen Prozesse, auf die wir keinen Einfluß haben. Durch Veränderung unseres Verhaltens können wir die erwarteten bzw. schon ablaufenden Klimaveränderungen abschwächen oder vielleicht sogar stoppen. Keineswegs nur im Hinblick auf die Kosten müssen wir entscheiden, was zu tun ist. Dabei haben wir sowohl die noch bestehenden Unsicherheiten zu berücksichtigen als auch die möglichen Konsequenzen verschiedener Maßnahmen. – Werden wir klug genug sein, diese Herausforderung zu bestehen?

## Aufgaben

### Stufe I

#### 16.1 Wärmekapazität und spezifische Wärme

1. Ein erwachsener Mensch hat einen Energieverbrauch von durchschnittlich 2500 kcal pro Tag. a) Wieviel Joule entspricht dies? b) Welche Leistung gibt die Person ab? Dabei soll angenommen werden, daß die Energie während der 24 Stunden eines Tages gleichmäßig abgegeben wird.

2. Ein Metallstück der Masse 100 g habe zu Beginn die Temperatur 100 °C. Es werde in einen Behälter der Masse 200 g aus dem gleichen Metall gegeben, der 500 g Wasser mit der Anfangstemperatur 20 °C enthält. Die Endtemperatur beträgt 21,4 °C. Wie hoch ist die spezifische Wärme des Metalls?

#### 16.2 Phasenübergänge und latente Wärme

3. Ein Stück Eis der Masse 200 g habe eine Temperatur von 0 °C; es werde in 500 g Wasser der Temperatur 20 °C gegeben. Das gesamte System befinde sich in einem von der Umgebung isolierten Behälter mit vernachlässigbar geringer Wärmekapazität. a) Wie hoch ist die Temperatur nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts? b) Wieviel Eis ist dann geschmolzen?

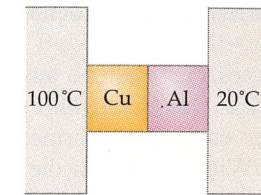
4. Wieviel Wärme muß abgeführt werden, damit 100 g Wasserdampf der Temperatur 150 °C zu Eis bei 0 °C gefroren werden? Die spezifische Wärme des Dampfes ist 2,01 kJ/(kg·K).

#### 16.3 Wärmeübertragung

5. Ein 2 m langer, runder Kupferstab habe einen Durchmesser von 2 cm. Die beiden Enden werden auf einer Temperatur von 100 °C bzw. von 0 °C gehalten. Die Oberfläche des Stabes sei isoliert, so daß seitlich keine Wärme abfließen kann. Berechnen Sie a) den Wärmewiderstand  $R$  des Stabes, b) den Wärmestrom  $I$ , c) den Temperaturgradienten  $\Delta T/\Delta x$  und d) die Temperatur in einer Entfernung von 25 cm vom heißen Ende.

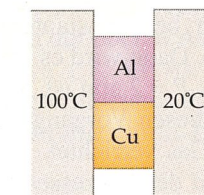
6. Zwei Metallwürfel aus Kupfer (Cu) bzw. aus Aluminium (Al) mit der Kantenlänge 3 cm werden hintereinander angeordnet, wie in Abbildung 16.19 zu sehen. Berechnen Sie a) den Wärmewiderstand jedes einzelnen Würfels, b) den Wärmewiderstand  $R$  des Gesamtsystems aus beiden Würfeln, c) den gesamten Wärme-

strom  $I$  durch beide Würfel und d) die Temperatur  $T_{Gr}$  an der Grenzfläche zwischen beiden Würfeln.



16.19 Zu Aufgabe 6.

7. Die gleichen Würfel wie in Aufgabe 6 werden parallel angeordnet, wie in Abbildung 16.20 gezeigt. Berechnen Sie a) den Wärmestrom durch jeden Würfel von links nach rechts, b) den gesamten Wärmestrom  $I$  durch beide Würfel und c) den Wärmewiderstand  $R_{Ers}$  des Gesamtsystems aus beiden Würfeln.



16.20 Zu Aufgabe 7.

8. Die Heizdrähte eines elektrischen 1-kW-Heizgerätes zeigen bei 900 °C helle Rotglut. Nehmen Sie an, die Leistung werde zu 100 Prozent als Strahlung abgegeben und die Drähte wirken wie schwarze Strahler. Die Raumtemperatur sei 20 °C. Wie groß ist unter diesen Voraussetzungen die effektive strahlende Oberfläche der Drähte?

9. Betrachten Sie den menschlichen Körper als schwarzen Strahler der Temperatur 33 °C (das ist etwa die Temperatur der Hautoberfläche) und berechnen Sie die Wellenlänge des Strahlungsmaximums ( $\lambda_{max}$ ).

#### 16.4 Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik

10. Ein Bleigeschoß mit anfangs 30 °C fange gerade an zu schmelzen, wenn es inelastisch auf eine Platte aufschlägt. Nehmen Sie an, die gesamte kinetische Energie des Projektils gehe beim Aufprall in seine innere Energie über und bewirke dadurch die Temperaturerhöhung, die zum Schmelzen führt. Wie hoch war die Geschwindigkeit des Projektils?