PHYSIK 10

Ergänzungsheft
für die erweiterte Oberschule
A/C-Zweig

Physik

Ergänzungsheft für die erweiterte Oberschule

Klasse 10 (A/C)

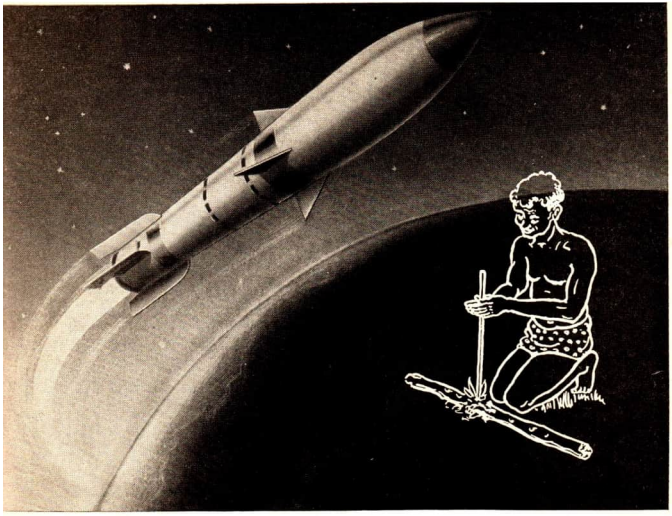
VOLK UND WISSEN
VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN
1966

Die Manuskripte wurden verfaßt von
Heinz Graff (Grundlagen der kinetischen Gas- und Wärmetheorie)
Arnim Haack (Hauptsätze der Wärmelehre)
Willi Wörstenfeld (Die Gasgesetze)
in Zusammenarbeit mit der Redaktion Physik des Verlages

Redaktion: Werner Golm · Ing. Günter Meyer

Auszug aus dem vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigten Lehrbuch Physik Kl. 10 (B) 021059, Ausgabe 1963
Ausgabe 1965

Typographische Gestaltung: Günter Runschke · Günter Wolff
ES 11 H · Bestell-Nr. 021053-2 · Preis: 1,10 · Lizenz-Nr. 203 · 1000/65 (DN)
Satz: VEB Leipziger Druckhaus, Leigzig (III/18/203)
Druck: VEB Werkdruck Gräfenhainichen (IV/2/14)



Wärmelehre

Es war ein langer, mühevoller Weg vom ersten Entfachen des Feuers durch einen Menschen bis zum Zünden einer modernen Mehrstufenrakete. Die Flamme erschien ihm anfangs als der Ausdruck einer gewaltigen, unbändigen Naturkraft, deren Ursache und Erscheinung er aber noch nicht zu deuten verstand. Die Menschen erkannten, daß es außer der wärmespendenden Sonne noch andere Wärmequellen gab, die Wärme ausstrahlten. So sahen die Menschen schon recht bald einen Zusammenhang zwischen dem Feuer und der Sonne. Der Mensch lernte das Feuer bewahren, durch Reibung verschiedener Hölzer selbst Feuer zu erzeugen und die Wärme für sich zu nutzen. Er bereitete mit ihrer Hilfe Speisen, brannte Bäume zum Bau von Booten aus und lernte irdene Gefäße zu brennen, in denen er Wasser und Vorräte aufbewahrte. Er lernte schließlich, mit Hilfe der Wärme aus den Erzen das Metall zu schmelzen, um sich damit immer bessere Arbeitsgeräte und Maschinen zu schaffen, und der heutige Stand der Produktion, des Verkehrs und der Weltraumforschung ist ohne

Wärmekraftmaschinen nicht denkbar. Doch der Mensch nutzte nicht nur die Wärme, sondern er dachte auch über das Wesen der Wärme nach. Schrieb er zunächst den Besitz des Feuers seinen Göttern zu, oder betrachtete er das Feuer als göttliche Macht (Feuerkult der Germanen, Perser, Inder, Griechen und Römer), so verloren sich diese Vorstellungen immer mehr, da er das Feuer selbst jederzeit entfachen konnte. Bald sah er in ihm ein „Element" der Natur neben Erde, Wasser und Luft. (Vorstellung der alten Griechen, die sich aus diesen „Elementen" den Aufbau der Welt dachten.)

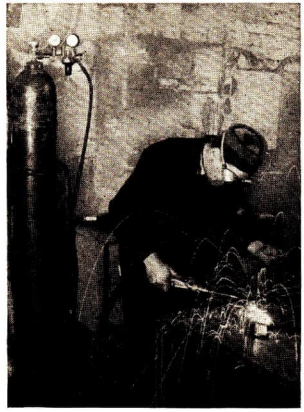
Im Mittelalter waren auf Grund der kirchlichen Einflüsse Wunderglauben und die Vermutung des Eingriffs übernatürlicher Kräfte weit verbreitet. Erst das 17. Jahrhundert brachte mit der Entwicklung der Chemie durch das Experiment einen Fortschritt gegenüber dem Altertum (Bild 40/1). So entstand Anfang des 18. Jahrhunderts die Phlogistontheorie[1] von STAHL.

Nach dieser Theorie faßte man die Wärme als unwägbaren Stoff auf, der den einzelnen Körpern mehr oder weniger beigegeben war. Man nannte diesen Stoff „Phlogiston". Einige Wissenschaftler eilten mit ihren Erkenntnissen jedoch ihrer Zeit schon weit voraus. LAVOISIER (1743 bis 1794) erschütterte die Phlogistontheorie durch den Nachweis, daß die Verbrennungsprodukte stets schwerer sind als der verbrannte Körper. BACO VON VERULAM (1620), HUYGENS (1690) und LOMONOSSOW (1750) entwickelten den Gedanken von der mechanischen Natur der Wärme. Sie führten die Wärme auf die Bewegung von kleinsten Teilen eines Körpers zurück, obwohl zu dieser Zeit die Existenz von Atomen und Molekülen noch nicht nachgewiesen war. Erst durch die experimentellen und theoretischen Arbeiten der Physiker, vor allem durch CLAUSIUS (1857), MAXWELL (1860) und BOLTZMANN (1894), wurde die wissenschaftlich begründete Theorie von der Wärme, die „kinetische Wärmetheorie", entwickelt. Sie ist noch heute die wissenschaftliche Grundlage für die Erklärung, Beherrschung und Anwendung vieler mit der Wärme zusammenhängender Erscheinungen und Vorgänge in Natur und Technik.

[1] von phlogein (griech.): brennen

40/1 Dieser Kupferstich von PIETER BREUGHEL d. Ä. zeigt eine sogenannte Alchimistenküche im Mittelalter

1. Die Gasgesetze



Beim Autogen-Schweißen werden die zur Aufrechterhaltung der Schweißflamme benötigten Gase den Druckflaschen entnommen. In der Schweißflamme tritt eine Temperatur von etwa 2800 °C auf, die ausreicht, um Stahl zum Schmelzen zu bringen. Wie lange aber reicht der Inhalt einer Flasche? Welcher Druck herrscht in der Flasche? Auf diese und noch andere Fragen sollen die folgenden Abschnitte Antwort geben.

1.1. Die Ausdehnung der Körper

Sie haben bereits erfahren, daß sich die meisten Körper beim Erwärmen ausdehnen.

- *Nennen Sie Beispiele für die Ausdehnung fester, flüssiger und gasförmiger Körper!*

Weiterhin haben Sie gelernt, die Größe der Ausdehnung bestimmter Körper zu berechnen.
Machen Sie sich am folgenden Beispiel noch einmal mit der **Ausdehnung fester Körper** vertraut.

Beispiel

Eine stählerne Brücke hat bei 0 °C eine Länge von 25 m. Wie groß ist die Längenänderung, wenn die Temperatur von 0 °C auf 20 °C ansteigt und der lineare Ausdehnungskoeffizient des Stahles $0{,}0000115\ \text{grd}^{-1} = 1{,}15 \cdot 10^{-5}\ \text{grd}^{-1}$ beträgt?

Lösungsweg:

Man bezeichnet die *Länge* der Brücke bei 0 °C mit l_0,

$l_0 = 25$ m.

Die zu berechnende *Längenänderung* $l_1 - l_0$ bezeichnet man mit Δl. Bei Temperaturerhöhung erfolgt ein Ausdehnen der Brücke. Diese *Temperaturänderung* läßt sich als *Differenz* ausdrücken. Man bezeichnet sie mit Δt,

$\Delta t = t_1 - t_0$

$\Delta t = 20\ °C - 0\ °C$

$\Delta t = 20\ \text{grd}.$

Der *lineare Ausdehnungskoeffizient* für Stahl gibt zahlenmäßig an, um das Wievielfache der Länge bei 0 °C sich ein stählerner Stab beim Erwärmen um 1 grd ausdehnt. Man bezeichnet den linearen Ausdehnungskoeffizienten mit α.

Zwischen den genannten Größen besteht die Beziehung

$$\boxed{\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t} \tag{5}$$

Das bedeutet, daß die Längenänderung Δl der Länge l_0 und der Temperaturdifferenz Δt direkt proportional ist. α ist der Proportionalitätsfaktor und stellt eine Materialkonstante dar, in unserem Falle für Stahl.

Lösung des gegebenen Beispiels:

$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$ $\qquad$ $\Delta t = t_1 - t_0$

$\Delta l = 25\ \text{m} \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-5}\ \text{grd}^{-1} \cdot 20\ \text{grd}$ $\qquad$ $\Delta t = 20\ °C - 0\ °C = 20\ \text{grd}$

$\Delta l = 5{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$

Die Längenänderung beträgt $5{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{m} = 5{,}8\ \text{mm}$.

Es läßt sich durch eine einfache Rechnung noch eine Formel herleiten, mit der die neue Länge l_1 nach einer durch Erwärmen oder Abkühlen aufgetretenen Längenänderung unmittelbar errechnet werden kann. Es ist nämlich $l_1 = l_0 + \Delta l$. (Neue Länge = ursprüngliche Länge + Längenänderung.) Setzen wir für Δl unsere gefundene Gleichung (5) ein, so ergibt sich

$l_1 = l_0 + l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$ und nach Ausklammern die

Gleichung für die Ausdehnung fester Körper

$$\boxed{l_1 = l_0\,(1 + \alpha \cdot \Delta t)} \tag{6}$$

Den Gleichungen (5) und (6) liegt eine Anfangstemperatur von 0 °C zugrunde. Man darf eigentlich mit diesen Gleichungen nicht rechnen, wenn eine andere Anfangstemperatur vorliegt (z. B. bei einer Temperaturänderung von $t_1 = 20$ °C auf $t_2 = 40$ °C, aber auch von $t_1 = -60$ °C auf $t_2 = -35$ °C). Die Unterschiede sind aber so gering, daß sie im allgemeinen in der Praxis vernachlässigt werden können. Die Gleichung (6) nimmt dann die Form $l_2 = l_1(1 + \alpha \cdot \Delta t)$ an, wobei $\Delta t = t_2 - t_1$ ist.

Außerdem ist zu beachten, daß der Wert des Ausdehnungskoeffizienten nur für einen bestimmten Temperaturbereich gilt. Bei Metallen jedoch ist der Ausdehnungskoeffizient zwischen 0 °C und 100 °C von der Temperatur nahezu unabhängig.

Beim Berechnen der **Ausdehnung flüssiger Körper** kann man wie bei festen Körpern verfahren. Es muß jedoch im Unterschied zu den festen Körpern berücksichtigt

werden, daß nicht die lineare Ausdehnung interessiert. Stets kommt es darauf an (Flüssigkeitsthermometer, Gußform), die Ausdehnung in allen drei Raumrichtungen zu berücksichtigen. Wir ersetzen in den Gleichungen (5) und (6) den linearen Ausdehnungskoeffizienten α durch den *kubischen Ausdehnungskoeffizienten* γ und die Längen l_0 und l_1 durch die Volumina V_0 (d. h. das Volumen bei 0 °C) und V_1.

Gleichung für die Ausdehnung flüssiger Körper

$$\boxed{V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t)} \tag{7}$$

Es gilt $\gamma \approx 3\alpha$. Auf den mathematischen Beweis sei an dieser Stelle verzichtet.
Die Gleichung (7) gilt für die Anfangstemperatur $t_0 = 0$ °C. Sie wird — wie bei den festen Körpern — in der Praxis auch bei anderen Anfangstemperaturen benutzt und erhält dann die Form $V_2 = V_1 (1 + \gamma \cdot \Delta t)$.

● *Ein Flüssigkeitsthermometer enthält, gemessen bei 0 °C, eine Quecksilbermenge mit einem Volumen von 0,8 cm³. Wie groß ist das Volumen dieser Quecksilbermenge bei 40 °C (für Quecksilber $\gamma = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ grd^{-1})?*

Beim Berechnen der **Ausdehnung der Gase** tritt eine Besonderheit auf, die es nicht gestattet, die Gleichung (7) ohne weiteres auch auf Gase zu übertragen. Wir hatten nämlich bisher stillschweigend angenommen, daß der *Druck* (z. B. der Luftdruck) auf den Betrag der Ausdehnung beim Erwärmen keinen Einfluß hat. Das kann man bei festen Körpern und Flüssigkeiten im allgemeinen auch voraussetzen. Bei einem Gas jedoch beeinflußt eine Druckänderung während des Erwärmens die Volumenzunahme. Man darf für Gase die Gleichung (7) nur benutzen, wenn sich der Druck während des Erwärmens nicht ändert, wenn er also konstant ist. Es lautet die

Gleichung für die Ausdehnung der Gase[1]

$$\boxed{V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t)} \tag{8}$$

Beachte: $p = \text{const}$

Diese Gleichung gilt nur für eine Anfangstemperatur von $t_0 = 0$ °C. Bei anderen Anfangstemperaturen ergeben sich Unterschiede, die nicht mehr vernachlässigt werden dürfen.

Wenn meist nur von Ausdehnung und nicht von Ausdehnung und Zusammenziehung gesprochen wurde, so nur der Einfachheit halber. Alle Gleichungen für das Ausdehnen beim Erwärmen gelten für das Zusammenziehen beim Abkühlen. Dabei ist zu beachten, daß Δt beim Zusammenziehen einen negativen Wert annimmt.

● *Gichtgas kommt mit einer Temperatur von 250 °C aus dem Hochofen. Welches Volumen hätte 1 m³ dieses Gases, wenn es anschließend bei konstantem Druck auf 0 °C abgekühlt würde* $\left(\gamma = \frac{1}{273}\ \text{grd}^{-1}\right)$*?*

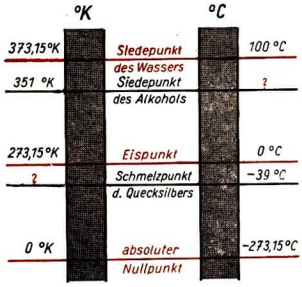
[1] auch Gay-Lussacsches Gesetz genannt

Es wurde festgestellt, daß die Ausdehnungskoeffizienten für alle Gase mit $\gamma \approx \frac{1}{273}\ \text{grd}^{-1}$ annähernd gleich groß und über einen großen Temperaturbereich konstant sind. Rein formal würde aus der Formel (8) folgen, daß ein Gas bei −273 °C das Volumen Null einnehmen müßte, denn

$$V_1 = V_0\left(1 + \frac{1}{273\ \text{grd}} \cdot -273\ \text{grd}\right)$$
$$V_1 = V_0(1 - 1)$$
$$V_1 = 0.$$

Das ist aber nicht der Fall, da in Wirklichkeit alle Gase bei hinreichend niedriger Temperatur in den flüssigen Zustand übergehen und dann nicht mehr dem angeführten Gesetz gehorchen.

Man hat aber doch diese Temperatur als die tiefstmögliche Temperatur angesehen und sie zum Ausgangspunkt einer neuen Temperaturskale, der Kelvinskale, gemacht. Sie liegt nach genauen Ermittlungen bei −273,15 °C[1]. Dieser Ausgangspunkt der Kelvinskale heißt auch *absoluter Nullpunkt* (0 °K), die Kelvinskale auch *absolute Temperaturskale*.



44/1 Vergleich zwischen der Celsius- und der Kelvinskale

- *Entnehmen Sie die Beziehungen zwischen der Celsiusskale und der Kelvinskale dem Bild 44/1!*

Es gilt die Beziehung

$$T/°\text{K} = 273 + t/°\text{C}$$

wobei T in Grad Kelvin (°K) und t in Grad Celsius (°C) gemessen werden.

- *Geben Sie den Erstarrungspunkt des Wassers, die Schmelzpunkte von Blei, Aluminium und Gold sowie die Siedepunkte von Sauerstoff, Stickstoff und Quecksilber in Grad Kelvin (°K) an! Benutzen Sie die Tabellen in der Zahlentafel!*

1.2. Die Gasgesetze von Gay-Lussac

Das Verhalten der Gase wurde schon in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts von dem französischen Naturforscher Guillaume Amontons erforscht, der das Luftthermometer erfand und auch bereits einen sehr tief gelegenen absoluten Nullpunkt der Temperatur vermutete. Der französische Physiker und Chemiker Louis-Joseph Gay-Lussac setzte diese Arbeiten fort.

Nach ihm sind noch heute zwei wichtige Gasgesetze benannt, die Sie schon kennen-

[1] Wir werden mit −273 °C weiterarbeiten, um das Rechnen zu vereinfachen.

gelernt haben und von denen wir das eine im Abschnitt Wärmeausdehnung wiederholt haben.
Der Zustand eines Gases wird von der Temperatur, dem Druck und dem Volumen bestimmt. Zwischen diesen drei Größen, den *Zustandsgrößen*, besteht eine Beziehung. Man braucht sie in der Technik, um zum Beispiel die im Zusammenhang mit dem Schweißen gestellten Fragen beantworten zu können. Zum Erarbeiten dieser Beziehung wollen wir zunächst zwei Schritte vornehmen:

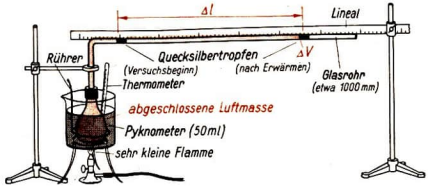
1. Das Vergrößern des *Volumens* beim Erhöhen der Temperatur ist zu messen, wobei der Druck konstant bleiben soll (1. Gay-Lussacsches Gesetz).
2. Das Vergrößern des *Druckes* beim Erhöhen der Temperatur ist zu messen, wobei das Volumen konstant bleiben soll (2. Gay-Lussacsches Gesetz).

45/1
GAY-LUSSAC (1778 bis 1850)

Dabei sind alle Temperaturen in °K (absolute Temperaturskale) anzugeben. Die Schreibweise der Gesetzmäßigkeiten wird dadurch bedeutend vereinfacht.

1.2.1. Erstes Gay-Lussacsches Gesetz (p = const)

Zum Untersuchen der Abhängigkeit des Volumens von der Temperatur bei konstantem Druck verwendet man eine Versuchsanordnung, wie sie in Bild 45/2 gezeigt ist. Wichtig ist, daß für diesen Versuch eine Glasröhre mit einem über die Meßstrecke hinweg konstanten Innendurchmesser verwendet wird. Außerdem ist zu beachten, daß unter ständigem Rühren die Flüssigkeit langsam erwärmt wird.



45/2

Durch die waagerechte Lage des Glasrohres ist gewährleistet, daß der Druck — wenn er sich während des Versuches im Versuchsraum nicht ändert — im Glaskolben konstant bleibt. Das Volumen der durch den Quecksilbertropfen eingeschlossenen Gasmasse wird zu Beginn des Versuches durch Messen und Rechnen bestimmt und zusammen mit der Anfangstemperatur in eine Tabelle eingetragen. Nach Erwärmen um jeweils 3 grd werden die Temperaturen und die dazugehörigen Volumina ermittelt und ebenfalls eingetragen.

Tabelle 1: Beispiel einer Meßreihe zum 1. Gay-Lussacschen Gesetz

T (in °K)	V (in cm³)	$\frac{V}{T}$ (in cm³ · °K⁻¹)	T (in °K)	V (in cm³)	$\frac{V}{T}$ (in cm³ · °K⁻¹)
292	50,2	0,172	301	51,4	0,171
295	50,5	0,171	304	51,9	0,171
298	51,0	0,171	307	52,4	0,171

Beachte: p = const

- *Stellen Sie die in der Tabelle 1 enthaltenen Werte grafisch dar! Beachten Sie, daß die Beziffe-rung der Koordinaten erst bei etwa 50 cm³ und 290 °K beginnt!*

Der annähernd konstante Wert des Quotienten aus Volumen V und Temperatur T läßt erkennen, daß

$$V \sim T$$

ist.

Bei konstantem Druck ist das Volumen einer Gasmasse der absoluten Temperatur proportional.

Weil der Druck gleichbleibt, spricht man auch von *isobarer*[1] *Zustandsänderung.* Wenn wir aus der Meßreihe der Tabelle 1 zwei Temperaturen und die entsprechenden Volumina herausgreifen, ergibt sich:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \quad \text{usw.}$$

Nach Umformen erhalten wir:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \tag{9}$$

Beachte: p = const

Die Volumina einer abgeschlossenen Gasmasse verhalten sich bei konstantem Druck wie ihre absoluten Temperaturen.

Dieses Gesetz gilt für alle Vorgänge in der Natur und in der Technik, bei denen Gase unter gleichbleibendem Druck erwärmt oder abgekühlt werden. *Das Gasvolumen verändert sich.* Das Stadtgas in Gasbehälter, der „Wind" im Winderhitzer eines Schmelzofens, über dem Erdboden erwärmte Luft (Thermik) sind Beispiele für das Wirken dieser Gesetzmäßigkeit.

- *Erklären Sie den im Schornstein herrschenden „Zug"!*

Beispiel

3 m³ eines Gases mit einer Temperatur von 283 °K werden bei konstantem Druck auf 393 °K erwärmt. Wie groß ist das Volumen bei dieser Temperatur?

[1] isos (griech.): gleich barys (griech.): schwer

Gegeben:

$p = \text{const}$

$V_1 = 3\ \text{m}^3$

$T_1 = 283\ ^\circ\text{K}$

$T_2 = 393\ ^\circ\text{K}$

Gesucht:

V_2 (in m^3)

Lösung:

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

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

$$V_2 = \frac{3\ \text{m}^3 \cdot 393\ ^\circ\text{K}}{283\ ^\circ\text{K}}$$

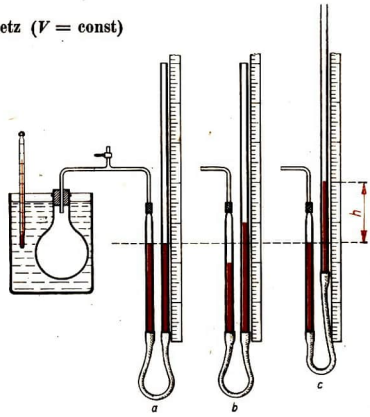
$$V_2 = 4{,}166\ \text{m}^3$$

Das Volumen beträgt etwa 4,2 m^3.

● *Ein Gas, das bei −10 °C ein Volumen von 0,5* m^3 *einnimmt, wird bei konstantem Druck auf 120 °C erhitzt. Wie ändert sich das Volumen?*

1.2.2. Zweites Gay-Lussacsches Gesetz ($V = \text{const}$)

Zum Untersuchen der Abhängigkeit des Druckes von der Temperatur bei konstantem Volumen verwendet man eine Versuchsanordnung, wie sie in Bild 47/1 gezeigt ist. Zu Beginn des Versuches muß der Druck im Kolben gleich dem Luftdruck sein, was durch den in 47/1 a gezeigten Flüssigkeitsstand in beiden Röhrchen erreicht wird.



47/1

Der mit Luft gefüllte Kolben taucht in ein Wasserbad, dessen Temperatur mit einem Thermometer bestimmt wird. Nachdem die im Kolben eingeschlossene Luft die Ausgangstemperatur angenommen hat, stellt man zu Versuchsbeginn den Zustand *a* her und erwärmt dann bei kleiner Flamme um 3 grd. Es stellt sich der Zustand *b* ein. Im selben Moment werden durch Anheben des rechten, offenen Manometerrohres das Ausgangsvolumen und der Wert für h abgelesen. Aus der Höhe h der Wassersäule und dem an einem im Versuchsraum befindlichen Barometer abgelesenen Luftdruck läßt sich der Gesamtdruck p ermitteln. Dann wird abermals um 3 grd erwärmt und erneut abgelesen. Hier die Ergebnisse einer Meßreihe:

Tabelle 2: Beispiel einer Meßreihe zum 2. Gay-Lussacschen Gesetz

T (in °K)	p (in Torr)	$\frac{p}{T}$ (in Torr · °K^{-1})	T (in °K)	p (in Torr)	$\frac{p}{T}$ (in Torr · °K^{-1})
291	758	2,61	300	783	2,61
294	765	2,60	303	794	2,62
297	773	2,60	306	803	2,62

Beachte: $V = \text{const}$

● *Stellen Sie die Meßwerte der Tabelle 2 grafisch dar! Welche Kurve erhalten Sie?*

Bildet man die Quotienten aus den Drücken p und den dazugehörigen absoluten Temperaturen T, so erkennt man, daß

$$p \sim T$$

ist.

Bei konstantem Volumen ist der Druck einer Gasmasse der absoluten Temperatur proportional.

Weil das Volumen gleichbleibt, spricht man auch von *isochorer*[1] *Zustandsänderung*. Betrachtet man wieder einzelne Ergebnisse der Meßreihe in Tabelle 2, so erhält man

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \quad \text{usw.}$$

und nach Umformen:

$$\boxed{\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}} \tag{10}$$

Beachte: $V = \text{const}$

Die Drücke einer abgeschlossenen Gasmasse verhalten sich bei konstantem Volumen wie ihre absoluten Temperaturen.

Dieses Gesetz gilt für alle Vorgänge in der Natur und in der Technik, bei denen Gase bei gleichbleibendem Volumen erwärmt oder abgekühlt werden. *Der Gasdruck verändert sich.* Die Luft in einem Reifen und der Dampf in einem Kessel sind Beispiele für das Wirken dieser Gesetzmäßigkeit.

● *Erklären Sie, wie man einen eingebeulten Tischtennisball in warmem Wasser wieder ausbeulen kann!*

Beispiel

In einer Sauerstoffflasche herrscht bei einer Temperatur von 15 °C (= 288 °K) ein Druck von 130 at. Wie ändert sich der Druck in der Flasche, wenn sich die Temperatur des Gases auf 25 °C (= 298 °K) erhöht?

[1] choros (griech.): Raum

Gegeben:

$V = \text{const}$

$p_1 = 130 \text{ at}$

$T_1 = 288 \text{ °K}$

$T_2 = 298 \text{ °K}$

Gesucht:

p_2 (in at)

Lösung:

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

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

$$p_2 = \frac{130 \text{ at} \cdot 298 \text{ °K}}{288 \text{ °K}}$$

$$\underline{\underline{p_2 = 134{,}5 \text{ at}}}$$

Der Druck steigt auf 134,5 at.

Sie erkennen jetzt, warum man Gasflaschen nicht an Heizkörper anlehnen soll. Aus dem gleichen Grunde sollen Druckgasbehälter keiner direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt werden.

● *Ein Gas, das bei 10* °C *einen Druck von 25* at *aufweist, wird bei konstantem Volumen auf 80* °C *erwärmt. Wie ändert sich der Druck?*

Tabelle 3: Übersicht über die Gesetze von Gay-Lussac

	1. Gay-Lussacsches Gesetz	2. Gay-Lussacsches Gesetz
konstante Größe	Druck p	Volumen V
Beziehungen unter Verwendung der Celsiusskale	$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta t$ $V = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$ **1**	$p = p_0 \cdot \gamma \cdot \Delta t$ $p = p_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$ **2**
Koeffizient	Ausdehnungskoeffizient $\gamma = \frac{1}{273} \text{grd}^{-1}$	Spannungskoeffizient $\gamma = \frac{1}{273} \text{grd}^{-1}$
Beziehungen unter Verwendung der Kelvinskale	$V \sim T$ **3**	$p \sim T$ **4**
Beziehungen unter Berücksichtigung von 2 Zuständen	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ **5**	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ **6**

● *Geben Sie die (mit einer roten Ziffer versehenen) Zusammenhänge in Worten wieder! Beispielsweise für 6: Bei konstantem Volumen verhalten sich die Drücke einer eingeschlossenen Gasmasse wie ..... und für 1: Bei konstantem Druck dehnt sich ein Gas beim Erwärmen um 1* grd *um 1/273 seines .....*

1.3. Die allgemeine Zustandsgleichung der Gase

Die beiden Gesetze von Gay-Lussac können nur dann angewendet werden, wenn eine Zustandsgröße (Druck oder Volumen) konstant bleibt. Wenn sich aber beide Zustandsgrößen gleichzeitig verändern, muß man diesen Vorgang schrittweise untersuchen, wobei zunächst das Volumen, dann der Druck konstant gehalten wird. Man erhält auf diese Weise die gesuchte Beziehung zwischen p, V und T.

1.3.1. Die Herleitung der allgemeinen Zustandsgleichung

Die Temperatur einer abgeschlossenen Gasmasse mit den Zustandsgrößen p_1, V_1 und T_1 wird bei konstantem Druck erhöht, beispielsweise von 273 °K auf 546 °K. Dabei verdoppelt sich das Volumen, beispielsweise von 1 m³ auf 2 m³ (Bild 51/1).

- *Welche Zustandsänderung liegt vor? Wie lautet das entsprechende Gasgesetz?*

Es ergibt sich ein Zwischenzustand mit dem Druck p_1, dem Volumen V_2 und der Temperatur T_z.

- *Wie groß ist T_z? Drücken Sie T_z durch T_1, V_1 und V_2 aus!*

Die Gasmasse wird weiter erwärmt, beispielsweise von 546 °K auf 1092 °K. Wenn der äußere Druck von 1 at auf 2 at erhöht wird, bleibt das Volumen konstant.

- *Welche Zustandsänderung liegt vor? Wie lautet das entsprechende Gasgesetz?*

Aus dem Zwischenzustand (p_1, V_2, T_z) erreicht man den Endzustand (p_2, V_2, T_2). Durch Einsetzen des gefundenen Wertes für T_z finden wir nach Ordnen die **allgemeine Zustandsgleichung der Gase.**

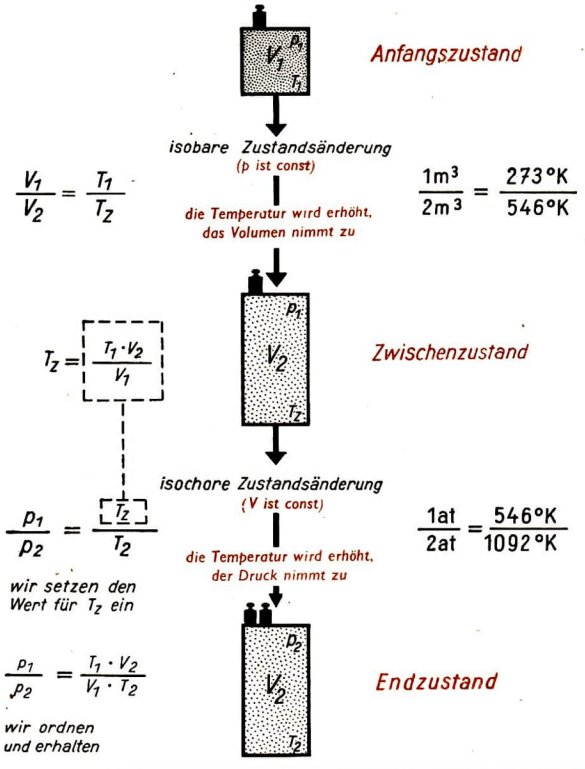
Bei einer abgeschlossenen Gasmasse ist das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die absolute Temperatur, konstant.

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \qquad (11)$$

Diese Gleichung gilt strenggenommen für kein wirklich existierendes Gas (reales Gas), sondern nur für ein Gas, bei dem man sich die Teilchen als Punktmassen denkt und die Kräfte, die die Teilchen aufeinander ausüben, nicht berücksichtigt (ideales Gas). Da sich aber viele Gase, besonders bei Temperaturen weit über ihren Siedepunkten und bei geringem Druck, fast wie ideale Gase verhalten, wird diese Gleichung in der Praxis angewendet.

Beispiel

Das Manometer einer 40-l-Sauerstoffflasche, die bei einer Temperatur von 15 °C (= 288 °K) gefüllt wird, zeigt einen Druck von 150 at an. Wieviel Liter Sauerstoff stehen zur Verfügung, wenn beim Schweißen mit einem Druck von 2 at gearbeitet wird und die Lufttemperatur 20 °C (= 293 °K) beträgt?



51/1 Allgemeine Zustandsgleichung der Gase

Gegeben:

$p_1 = 150$ at

$p_2 = 2$ at

$V_1 = 40$ l

$T_1 = 288$ °K

$T_2 = 293$ °K

Gesucht:

V_2 in Liter

Lösung:

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

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

$$V_2 = \frac{150 \text{ at} \cdot 40 \text{ l} \cdot 293 \text{ °K}}{288 \text{ °K} \cdot 2 \text{ at}}$$

$$\underline{\underline{V_2 = 3053 \text{ l}}}$$

Es stehen 3000 l Sauerstoff zur Verfügung.

1.3.2. Das Boyle-Mariottesche Gesetz und die allgemeine Zustandsgleichung

Wir schreiben die allgemeine Zustandsgleichung in der Form

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

Lassen wir jetzt die Temperatur konstant ($T_1 = T_2$), so erhalten wir durch Multiplikation mit T_1 (oder T_2):

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \text{für} \quad T = \text{const.}$$

Das ist das vom Abschnitt Mechanik der Flüssigkeiten her bekannte Gesetz von Boyle und Mariotte.

● *Geben Sie das Boyle-Mariottesche Gesetz in Worten wieder!*

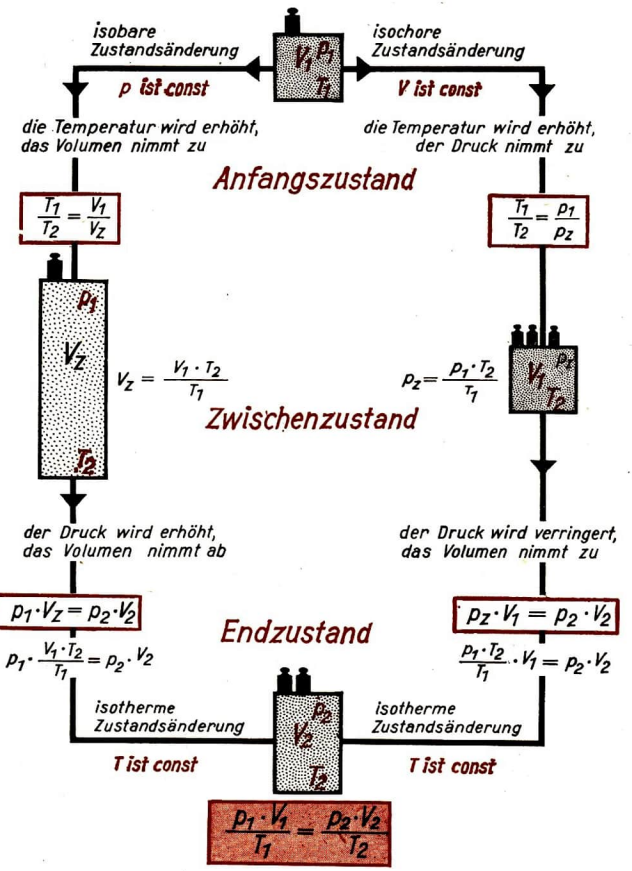
Man kann das Boyle-Mariottesche Gesetz benutzen, um auf einem anderen Wege zur allgemeinen Zustandsgleichung zu gelangen. Zunächst scheint dieses Gesetz gar nicht in die Wärmelehre hineinzugehören, da es für Volum- und Druckänderungen bei konstanter Temperatur gilt. Man wird aber seine Bedeutung für das Finden einer allgemeinen Beziehung zwischen Druck, Volumen und Temperatur erkennen, wenn man bedenkt, daß man nicht nur über die isobare und isochore Zustandsänderung zur allgemeinen Zustandsgleichung gelangt, sondern daß das sowohl über die isobare und isotherme als auch über die isochore und isotherme Zustandsänderung möglich ist.

● *Studieren Sie das Bild auf Seite 53!*
Verfolgen Sie beide Wege nacheinander und beantworten Sie für jeden Weg folgende Fragen:

1. *Durch welche Größen ist der Zustand der gegebenen Gasmasse gekennzeichnet?*
2. *Welche Zustandsänderung erfährt die Gasmasse, welche Größe bleibt konstant?*
3. *In welcher Beziehung stehen die sich ändernden Größen? (Absolute Temperaturen benutzen!)*
4. *Durch welche Größen ist der erreichte Zwischenzustand gekennzeichnet?*

Beachten Sie, daß der erreichte Zwischenzustand für die nachfolgende isotherme Zustandsänderung Ausgangszustand ist!

5. *Wie lautet das Boyle-Mariottesche Gesetz? (Benutzen Sie die Größen p_1, p_2, V_z, V_2 bzw. p_z, p_2, V_1, V_2!)*
6. *Setzen Sie in diese Gleichung für V_z bzw. p_z den für den Zwischenzustand gefundenen Wert ein!*
7. *Ordnen Sie die Gleichung so, daß alle Größen mit dem Index 1 links, alle Größen mit dem Index 2 rechts stehen!*
8. *Drücken Sie die gefundene Gleichung in Worten aus!*



53/1 Allgemeine Zustandsgleichung der Gase

1.4. Die Gaskonstante

Schreiben wir die allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase in der Form

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \text{const},$$

so erhalten wir durch Multiplikation mit T_1 die Form

$$p_1 \cdot V_1 = \text{const} \cdot T_1. \tag{12.1}$$

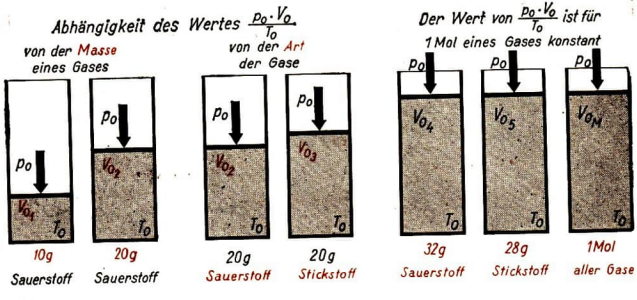
In dieser Form lautet die allgemeine Zustandsgleichung:

Bei einer gegebenen Gasmasse ist das Produkt aus Druck und Volumen der absoluten Temperatur proportional.

Die Konstante hat für jede Gasmasse einen bestimmten Wert, der nun berechnet werden soll. Wir gehen dabei von folgenden Überlegungen aus:
Für alle Gasmassen beträgt $p_0 = 760$ Torr und $T_0 = 273$ °K. Der Wert der Konstanten hängt damit nur von dem Volumen V_0 ab. Das Volumen V_0 ist, wie Sie sich am Bild 54/1 deutlich machen können, von der *Masse* des Gases und von der *Art* des Gases abhängig. So nehmen beispielsweise 20 g Stickstoff ein größeres Volumen als 20 g Sauerstoff ein.

Sie wissen aus dem Chemieunterricht, daß ein Kubikzentimeter eines jeden Gases bei 760 Torr und 0 °C $2{,}688 \cdot 10^{19}$ Moleküle enthält, und Sie wissen auch, daß Stickstoffmoleküle leichter sind als Sauerstoffmoleküle.

Ist das Volumen V_0 verschiedener Gasmassen bei p_0 und T_0 gleich, dann ist auch der Wert für $\frac{V_0 \cdot p_0}{T_0}$ gleich. Dieser Fall liegt vor, wenn wir 1 Mol eines Gases betrachten, weil 1 Mol eines Gases bei 760 Torr und 0 °C stets ein Volumen von 22,41 hat. Wir bezeichnen diese Größe als *Molvolumen* V_{0M}.



54/1

Setzen wir für V_0 in die Gleichung $\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}$ die Größe V_{0_M} ein, so erhalten wir $\frac{p_0 \cdot V_{0_M}}{T_0}$, dessen zahlenmäßiger Wert für ein Mol jedes Gases konstant ist. Wir bezeichnen $\frac{p_0 \cdot V_{0_M}}{T_0}$ deshalb als

universelle Gaskonstante R (nach dem französischen Physiker REGNAULT[1])

$$\frac{p_0 \cdot V_{0_M}}{T_0} = R.$$

Das ergibt für ein Mol eines Gases in Verbindung mit Gleichung (12.1.)

$$\boxed{p \cdot V_{0M} = R \cdot T} \tag{12.2}$$

Wir werden auf diese Gleichung zurückkommen und R im Zusammenhang mit dem Energiegehalt der Gase betrachten (s. S. 72).

Den zahlenmäßigen Wert von R erhalten wir durch Einsetzen der drei Zustandsgrößen

$$T_0 = 273\ °\text{K},$$

$$p_0 = 760\ \text{Torr} = 1033\ \text{p} \cdot \text{cm}^{-2} = 10330\ \text{kp} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$V_{0_M} = 22{,}4\ \text{l} \cdot \text{mol}^{-1} = 0{,}0224\ \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1},$$

$$R = \frac{p_0 \cdot V_{0_M}}{T_0},$$

$$R = \frac{10330\ \text{kp} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0{,}0224\ \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}}{273\ \text{grd}},$$

$$\boldsymbol{R = 0{,}847\ \text{kpm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}}.$$

Die universelle Gaskonstante kann auch in Wattsekunden (Ws) ausgedrückt werden, da 1 kpm = 9,81 Ws sind.

Es ist dann

$$R = 8{,}31\ \text{Ws} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}.$$

Die Einheit der Gaskonstante enthält als Faktor eine Arbeit.

1.5. Anwendungen der allgemeinen Zustandsgleichung

Die Gasgesetze haben für die theoretische Physik und für die Technik Bedeutung. Wir wollen zwei Beispiele herausgreifen.

Reduktion auf den Normzustand. Will man die Volumina zweier Gasmassen (etwa Sauerstoff und Wasserstoff) vergleichen, so ist dies mit Hilfe der allgemeinen Zu-

[1] HENRI VICTOR REGNAULT (1810 bis 1878) prüfte die Ergebnisse GAY-LUSSACS experimentell nach und fand dabei, daß γ für reale Gase unterschiedlich ist und daß die Abweichungen um so größer werden, je stärker man die Gase komprimiert

standsgleichung möglich. Wir rechnen für jede Gasmasse aus, welches Volumen sie bei der Temperatur $T_0 = 273$ °K (0 °C) und bei dem Luftdruck $p_0 = 760$ Torr (1,033 at) hat. Man nennt eine solche Angabe den *Normzustand* eines Gases. Die Umrechnung nennt man *Reduktion* (Zurückführung).

Beispiel

Gegeben:

$p_1 = 130$ at
$T_1 = 293$ °K
$V_1 = 40$ l
$p_0 = 1{,}033$ at
$T_0 = 273$ °K

Gesucht:

V_0 von Sauerstoff (in l)

Lösung:

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1}$$

$$V_0 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_0}{T_1 \cdot p_0}$$

$$V_0 = \frac{130 \text{ at} \cdot 40 \text{ l} \cdot 273 \text{ °K}}{293 \text{ °K} \cdot 1{,}033 \text{ at}}$$

$$\underline{\underline{V_0 = 4690 \text{ l}}}$$

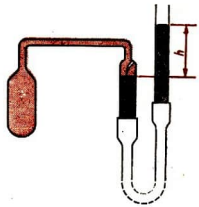
Die Sauerstoffflasche enthält 4690 l Sauerstoff im Normzustand.

Auf gleiche Weise läßt sich das Volumen des Wasserstoffs im Normzustand ermitteln.

- *Berechnen Sie den Inhalt einer 20-l-Wasserstoffflasche im Normzustand, wenn der Druck 48 at und die Temperatur 24 °C betragen!*

Das Gasthermometer. Die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Druck, Volumen und Temperatur eines Gases führte zum Bau von Gasthermometern. Sie enthalten als thermometrische Substanz Luft, Stickstoff, Helium oder Wasserstoff, die durch ein Quecksilbermanometer abgeschlossen ist (Bild 56/1). Man mißt die bei einer Temperaturänderung eintretende Druckänderung.

- *Wodurch unterscheiden sich Flüssigkeits- und Gasthermometer? Nennen Sie mindestens drei Merkmale!*



56/1 Gasthermometer. Durch Eis wird die Luft im Glasbehälter auf 0 °C gebracht. Im Manometer befindet sich Quecksilber, das genau bis an die Glasspitze im linken Manometerrohr reicht. Beim Erwärmen der Luft im Glasbehälter verändern sich die Höhen der Quecksilbersäulen. Durch Anheben des rechten Manometerrohres wird im linken Manometerrohr das Quecksilber wieder bis an die Glasspitze eingestellt. Der eingetretene Druckunterschied ist ein Maß für die Temperaturänderung

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Ein Aluminiumzylinder hat einen Durchmesser von 60 mm und eine Höhe von 80 mm, gemessen bei 0 °C. Wie groß sind Durchmesser, Höhe und Volumen des Zylinders, wenn er auf 80 °C erwärmt wird ($\alpha_{Al} = 0{,}000024$ grd^{-1})?
2. Tauchen Sie drei Kolben (mit Stopfen und Steigrohr), die gleich hoch mit Wasser, Petroleum und Alkohol gefüllt sind, in Wasser mit einer Temperatur von etwa 80 °C! Formulieren Sie Ihre Beobachtungen! (Bild 57/1)
   Achten Sie darauf, daß alle 3 Steigrohre den gleichen Innendurchmesser haben.

3. Bei 0 °C befinden sich in einem Tank 280 m³ Benzol. Um wieviel nimmt das Volumen des Benzols zu, wenn es um 20 grd erwärmt wird? (p = const, $\gamma_{\text{Benzol}} = 0{,}001\,229\ \text{grd}^{-1}$). Erklären Sie, warum man Behälter nicht *vollständig* mit Flüssigkeiten füllen soll!

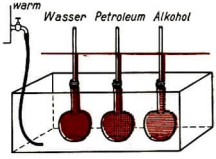
4. In den Winderhitzer eines Hochofens strömt Luft mit einer Temperatur von 10 °C ein. Berechnen Sie die Volumänderung der Gasmasse, wenn sie den Winderhitzer mit 1000 °C verläßt!

5. Bei welcher Temperatur nimmt ein Gas bei gleichbleibendem Druck den doppelten Raum ein wie bei 15 °C?

6. Eine Stahlflasche für Sauerstoff mit einem Volumen von 40 l wird bei 0 °C unter einem Druck von 150 at gefüllt. Wieviel Liter kann man unter einem Druck von 1,5 at bei 20,5 °C entnehmen?

7. Eine 8-l-Flasche mit Kohlendioxid, wie sie in Gaststätten zum Ausschenken von Bier und Brause benutzt wird, hat bei einer Temperatur von 20 °C einen Druck von 12 at. Wie groß ist das Volumen der eingeschlossenen Gasmasse im Normzustand?

8. Welchen Vorteil bringt die Verwendung von Wasserstoff statt Luft in einem Gasthermometer mit sich?



57/1

Zusammenfassung

1. **Die Ausdehnung der Körper beim Erwärmen hängt von der Länge des Körpers, der Temperaturänderung und dem Stoff ab, aus dem der Körper besteht.**

   Wie lautet die mathematische Gleichung für das Zusammenziehen der Körper beim Abkühlen?

2. **Die Ausdehnung der gasförmigen Körper hängt unter anderem vom Druck ab.**

   Wie ändert sich bei einer abgeschlossenen Gasmasse das Volumen, wenn Temperatur und Druck auf das Doppelte erhöht werden?

3. **Die absolute Temperaturskale hat als tiefste Temperatur null Grad Kelvin (0 °K).**

   Welcher Temperatur der Celsiusskale entspricht diese Temperatur?
   Was versteht man unter T_0?

4. **Die Volumina einer abgeschlossenen Gasmasse verhalten sich bei konstantem Druck wie ihre absoluten Temperaturen.**

   Man will das Volumen einer abgeschlossenen Gasmasse mit einer Temperatur von 0 °C verdoppeln. Um wieviel Grad (grd) muß man die Temperatur der Gasmasse erhöhen?

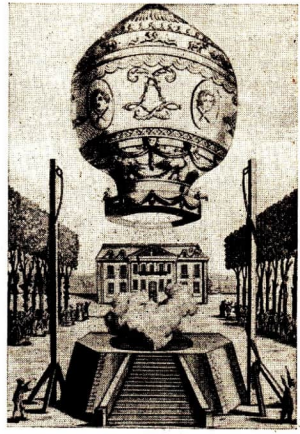
5. **Die Drücke einer abgeschlossenen Gasmasse verhalten sich bei konstantem Volumen wie ihre absoluten Temperaturen.**

   Bei welcher Temperatur müßte der Druck einer Gasmasse Null werden?

6. **Bei einer abgeschlossenen Gasmasse ist das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die absolute Temperatur, konstant.**

   Drücken Sie diese Beziehung mathematisch aus!
   Wie nennt man die gefundene Gleichung?

2. Die Grundlagen der kinetischen Gas- und Wärmetheorie



Der erste bemannte Warmluftballon stieg im Jahre 1783 in die Luft. Um eine wirksame Auftriebskraft zu erhalten, wurde dem Füllgas Luft Wärme zugeführt.
Bekannte Physiker untersuchten die Zusammenhänge zwischen der Wärme und dem Verhalten der Gase.
In diesem Abschnitt soll dargestellt werden, wie sich der Druck eines Gases zu der Anzahl der Gasmoleküle, ihrer Masse und ihrer Geschwindigkeit verhält. Damit lernen wir ein Gebiet der Physik kennen, das vorwiegend mathematisch untersucht wird.

2.1. Der molekulare Aufbau der Körper

In unseren Untersuchungen werden wir folgendermaßen vorgehen:

1. Wir werden zwei Betrachtungsweisen unterscheiden: die makroskopische und die mikroskopische oder molekulare Betrachtungsweise.
2. Wir werden die Körper von ihrem molekularen Aufbau her betrachten.
3. Wir werden einige Erscheinungen betrachten, die uns den Aufbau der Körper aus kleinsten Teilen erkennen lassen. Solche Erscheinungen sind zum Beispiel die Brownsche Bewegung und die Diffusion.

Danach wird es möglich sein, die Zusammenhänge zu erfassen, die unter dem Begriff „Grundlagen der kinetischen Gas- und Wärmetheorie" zu verstehen sind. Die vorangegangene Behandlung der beiden Gesetze von GAY-LUSSAC und des Gesetzes von BOYLE-MARIOTTE erfolgte vornehmlich unter einer *makroskopischen Betrachtungsweise*. Es wurde dabei von einer bestimmten Gasmenge ausgegangen und ihr Verhalten bei Druck- oder Temperaturänderung untersucht. Nicht berücksichtigt wurde das Verhalten der kleinsten Teile dieser Gasmenge, der *Gasmoleküle*.

Von dem Römer LUCRETIUS CARUS (gest. 55 v. u. Z.) ist uns ein Lehrgedicht überliefert. Danach suchten etwa 400 v. u. Z. LEUKIPP von MILET und sein Schüler DEMOKRIT den Zusammenhang der Naturerscheinungen zu finden und zu deuten. Diese Philosophen lehrten wohl als erste die

59/1 Robert Boyle (1627 bis 1691)

59/2 Michail Wassiljewitsch Lomonossow (1711 bis 1765)

Existenz kleinster, nicht mehr wahrnehmbarer Teilchen, aus denen sich alle Stoffe zusammensetzen.
Robert Boyle (Bild 59/1) ordnete den kleinsten Teilchen der Körper eine *eigene Bewegung* zu.
Das Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Petersburg M. W. Lomonossow (Bild 59/2) deutete die *Wärme als Rotation der Moleküle*; er kam damit den späteren Erkenntnissen recht nahe.
Der Franzose A. L. Lavoisier bewies durch Wägen das *Gesetz von der Erhaltung der Masse*.
Der Engländer J. Dalton untersuchte die *Massenverhältnisse* chemischer Verbindungen. Er fand und formulierte das *Gesetz der konstanten und multiplen Proportionen*.

- *Erklären Sie die Zusammenhänge der Massenverhältnisse; verwenden Sie dabei Ihre Kenntnisse aus dem Chemieunterricht!*

Aus diesem Gesetz konnte bereits gefolgert werden, daß die Elemente aus *Atomen* aufgebaut sind, deren Massen – entsprechend der Art des Elements – unterschiedlich sind.
Die in der Folgezeit sich rasch entwickelnde experimentelle Grundlagenforschung hat die zum großen Teil noch *hypothetischen* Aussagen der Forscher des 17. und 18. Jahrhunderts bestätigt.

2.1.1. Die mechanische Teilbarkeit der Körper

Ein Grundgedanke zum Erforschen der Körper war, sie mechanisch zu teilen. Man konnte auf diese Weise zunächst untersuchen, ob sich die *Eigenschaften* eines Körpers mit zunehmender mechanischer Teilung verändern, das heißt, ob ein sehr kleines Teil eines Körpers noch die gleichen Eigenschaften aufweist wie der Körper selbst.

Beispiele

1. *Quarz* läßt sich zu Fäden mit einem Durchmesser von 1 μm ausziehen (gewöhnliches menschliches Kopfhaar hat einen Durchmesser von 67 μm).

2. *Gold* für die Vergoldung von Denkmälern usw. läßt sich auf eine Dicke von weniger als 10 μm ausschlagen.
3. Eine über Wasser ausgedehnte Ölhaut kann eine Dicke von 0,1 nm erreichen.
4. Unser Geruch läßt 10^{-13} g *Moschus* (eine Drüsenabsonderung des Moschusochsen) und 10^{-16} g *Alkanthiol* (*Mercaptan*), das ist eine schwefelhaltige Kohlenwasserstoffverbindung, in einem Liter Luft wahrnehmen.

Allgemein kann festgestellt werden:

Unabhängig vom Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) sind alle Körper teilbar.

2.1.2. Atome und Moleküle

Erkenntnisse über die Grenzen der Teilbarkeit, Ergebnisse über die Untersuchung der physikalischen Eigenschaften kleinster Teile der Körper und Ergebnisse der theoretischen und praktischen Chemie haben zur Einteilung der kleinsten Teile der Körper geführt.
Im folgenden werden einige dieser kleinsten Teilchen beschrieben; dabei werden ihre Merkmale so weit dargelegt, wie es für unsere weiteren Untersuchungen notwendig ist.

Atome. Stoffe, die durch chemische Mittel und Verfahren nicht in andere Stoffe zerlegt und daher auch nicht auf chemischem Wege ineinander umgewandelt werden können, nennt man *chemische Grundstoffe* oder *Elemente*. Wir kennen über 100 Elemente, von denen ein Teil künstlich erzeugt werden kann.
Das kleinste Teilchen eines Grundstoffes nennt man *Atom* (atomos: unteilbar). Diese Bezeichnung geht auf die Annahme zurück, daß diese kleinsten Teilchen der stofflichen Materie nicht zerlegt werden können. In der Atom- und Kernphysik werden Sie erfahren, daß Atome durchaus teilbar sind und einen spezifischen Aufbau haben, der für jeden chemischen Grundstoff charakteristisch ist.

Atome sind die kleinsten Teile eines chemischen Grundstoffes, die noch alle chemischen Eigenschaften dieses Grundstoffes aufweisen.

Um sich eine Größenvorstellung von Atomen zu verschaffen, kann folgendes angenommen werden:
Denkt man sich ein Atom eine Milliarde mal vergrößert, dann wäre es etwa so groß wie ein Fußball (eine Kirsche im gleichen Maßstab vergrößert, wäre bereits so groß wie unser Erdball).

Moleküle. Aus den Atomen der Grundstoffe sind alle anderen Stoffe aufgebaut. Sie heißen *Verbindungen* und sind aus *Molekülen*[1], den kleinsten Teilen einer Verbindung, aufgebaut.

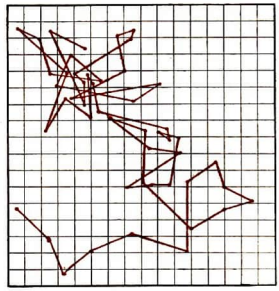
- *Was haben Sie über Atome und Moleküle im Chemieunterricht erfahren?*

[1] molekula (lat.): kleine Masse

2.1.3. Die Brownsche Bewegung

Einen wesentlichen Beitrag für die Erklärung molekularer Bewegungsvorgänge leistete der englische Botaniker ROBERT BROWN (1773 bis 1858), dessen Beobachtung als *Brownsche Bewegung* bekannt ist.
Hierzu einen Versuch:

> Wir saugen in eine etwa 2 cm³ große Kammer, die mit einer dünnen Glasscheibe als Deckplatte versehen ist und zwei gegenüberliegende Fenster enthält, mit Hilfe eines kleinen Gummiballs etwas Zigarettenrauch oder Salmiaknebel. Durch die seitlichen Fenster lassen wir ein helles, stark konvergentes Lichtbündel hindurchtreten. Wir betrachten die Kammer von oben durch ein Mikroskop mit etwa 75facher Vergrößerung. Wir sehen, wie die winzigen Rauchteilchen in eigentümlicher Weise hin und her zucken, und zwar unregelmäßig und unabhängig von den benachbarten (Bild 61/1).



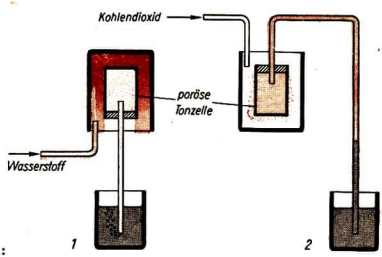
61/1 Brownsche Bewegung von Rauchteilchen. Nachzeichnung einer mikroskopischen Beobachtung

BROWN beobachtete diese Bewegungen im Saft von Pflanzen und glaubte zunächst, daß es sich um winzige Lebewesen handle. Diese unaufhörliche Bewegung fand man aber bald bei allen in einer Flüssigkeit oder einem Gas schwebenden Körperchen, wenn sie nur leicht genug und so groß waren, daß sie unter dem Mikroskop gesehen werden konnten.
Die an den schwebenden Teilchen zu beobachtende Bewegung hat folgende Ursache: In jedem Augenblick stoßen sehr viele Luft- oder Wassermoleküle von allen Seiten auf ein schwebendes Teilchen. Welche Wirkung die Stöße haben, können wir im einzelnen nicht beobachten. Da sich aber die Stoßwirkungen auf ein Teilchen nicht in jedem Augenblick gegenseitig aufheben, wird seine Lage mit der Zeit verändert. Je kleiner das gestoßene Teilchen ist, das heißt, von je weniger Molekülen es zu gleicher Zeit getroffen wird, desto weniger gleichen sich die Stöße aus und um so stärker ist seine Bewegung. BROWNS Entdeckung ist ein überzeugender Beweis für den Aufbau der Stoffe, zum mindesten der Flüssigkeiten und Gase, aus *bewegten Molekülen*.

2.1.4. Die Diffusion

Wir haben bereits im Physikunterricht kennengelernt, daß sich überschichtete Flüssigkeiten nach einer geraumen Zeit ohne äußeres Zutun vermischen. Die Erklärung ergibt sich aus der Molekularbewegung.

> **Die gegenseitige Durchdringung von Stoffen ohne äußere Krafteinwirkung (oftmals entgegen der Schwerkraft) heißt Diffusion.**



62/1 Versuchsanordnung zur Diffusion von Gasen durch poröse Scheidewände

Wir wollen zwei Gase, *Wasserstoff* und *Kohlendioxid*, nacheinander durch eine *poröse Tonzelle* diffundieren lassen; Bild 62/1 zeigt die Anordnungen, die für beide Versuche benutzt werden.

Wir können folgendes feststellen:

1. Wasserstoff diffundiert mit solcher Geschwindigkeit durch die porösen Wände, daß unten aus dem Glasrohr lebhaft Blasen aufsteigen. Entfernt man darauf das Becherglas, so ist die Tonzelle von außen mit Luft umgeben, während sie innen mit einem Luft-Wasserstoff-Gemisch gefüllt ist. Jetzt diffundiert der Wasserstoff so rasch nach außen, daß das Wasser zu beträchtlicher Höhe im Rohr emporsteigt.
2. Kohlendioxid diffundiert langsamer als Luft. Die Vorgänge laufen in umgekehrter Reihenfolge wie bei der Diffusion des Wasserstoffs. Es entsteht im Tonzylinder zunächst ein Unterdruck. Entfernt man dann das Becherglas wieder, so steigen infolge der raschen Diffusion der Luft lebhaft Gasblasen im Wasser empor.

Quantitative Versuche lehren, daß die Diffusionsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 zweier Gase sich indirekt proportional verhalten wie die Quadratwurzeln aus ihren Dichten ϱ_1 und ϱ_2:

$$v_1 : v_2 = \sqrt{\varrho_2} : \sqrt{\varrho_1}.$$

Man mißt die Diffusionsgeschwindigkeiten durch die in einer Sekunde diffundierte Gasmenge.

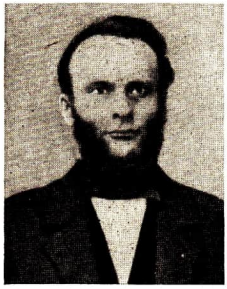
Die Diffusion der Gase durch Scheidewände hat in neuerer Zeit als Mittel zur Trennung von Gasgemischen, insbesondere zur Trennung von gasförmigen Isotopen, an Bedeutung gewonnen. So werden häufig schwerer und leichter Wasserstoff durch Diffusion voneinander getrennt. Bei dem in Bergwerken verwendeten Schlagwetteranzeiger und bei anderen Geräten zur Warnung gegen die Ansammlung explosiver Gase dienen Diffusionsvorgänge zur Auslösung von Alarmvorrichtungen.

Fragen, Aufgaben

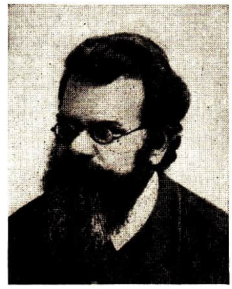
1. Suchen Sie Beispiele für die Teilbarkeit der Körper
   1.1. aus dem Unterrichtstag in der Produktion,
   1.2. aus dem Haushalt!
   Geben Sie Größen der Teilchen an, die auftreten können, und vergleichen Sie mit Größen von Molekülen!
2. Nennen Sie Beispiele für Diffusionsvorgänge
   2.1. zwischen gasförmigen Stoffen,
   2.2. zwischen Flüssigkeiten,
   2.3. zwischen festen und gasförmigen Stoffen!

2.2. Grundvorstellung und Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

Die Erkenntnisse über die Brownsche Bewegung haben auch einen starken Einfluß auf die molekulare Betrachtungsweise der Gase.
23 Jahre nach der Beobachtung Browns wurden durch R. E. CLAUSIUS (Bild 63/2), Professor der Physik in Zürich, Würzburg und Bonn, die theoretischen Grundlagen der kinetischen Gastheorie geschaffen.



63/1 R. E. CLAUSIUS (1822 bis 1888)



63/2 L. BOLTZMANN (1844 bis 1906)

Diese Theorie wurde dann durch den Engländer J. C. MAXWELL, den Österreicher L. BOLTZMANN (Bild 63/2) und den Amerikaner J. W. GIBBS vervollständigt.

2.2.1. Grundvorstellung der kinetischen Gastheorie

Physiker und Chemiker erkannten, daß es gasförmige Elemente gibt; die Luft wurde als Gasgemisch aus solchen Elementen analysiert. Die Forscher beschäftigten sich mit den Gasen und suchten unter anderen für zwei Eigenschaften der Gase nach einer Erklärung:

1. Jedes Gas füllt den ihm zur Verfügung stehenden Raum aus;
2. jedes in ein Gefäß eingeschlossene Gas drückt gegen die Wände dieses Gefäßes.

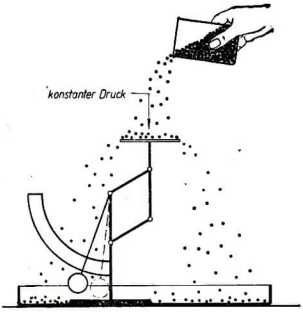
Mit der folgenden *Grundvorstellung* werden diese beiden Eigenschaften der Gase erklärt:

Die kleinsten Teile eines Gases, die Gasmoleküle, befinden sich ständig in Bewegung.

Beispiel

Wird eine Stahlkugel gegen eine elastische Wand geworfen, so verformt sich diese unter der Einwirkung der Stoßkraft etwas, nimmt aber bald darauf ihre alte Lage und Form

wieder ein. Folgen viele Würfe sehr schnell aufeinander, so sind die einzelnen Stöße kaum noch zu unterscheiden; auf die Wand scheint eine konstante Druckkraft zu wirken. Wir veranschaulichen uns dies mit kleinen Stahlkugeln, die wir in sehr schneller Folge auf eine Briefwaage fallen lassen (Bild 64/1).



64/1 Kraftwirkung auf eine Briefwaage unter dem Einfluß herabfallender Stahlkugeln

In derselben Weise erklärt sich der Druck, den ein Gas ausübt, aus dem *molekularen Hagel* seiner kleinsten Teilchen auf die Gefäßwand. Zwar ändert sich der Bewegungszustand der einzelnen Gasteilchen ständig; makroskopisch aber sind diese molekularen Änderungen nicht bemerkbar. Dies hat seine Ursache darin, daß sich das unterschiedliche Verhalten der Moleküle bei der sehr großen Zahl der sich bewegenden Teilchen mit sehr großer *Wahrscheinlichkeit* ausgleicht. Den Begriff Wahrscheinlichkeit kann man mit folgendem Beispiel erklären.

Beispiel

Die *mathematische Wahrscheinlichkeit*, mit einem regelmäßig gearbeiteten Würfel unter 6 Würfen einmal eine *Sechs* zu werfen, beträgt $\frac{1}{6}$. Das heißt aber nicht, daß sich unter den ersten 6 Würfen oder jedesmal unter 6 Würfen der Wurf *Sechs* befindet. Es bedeutet auch nicht, daß eine Sechs unter 60 Würfen 10mal, unter 120 Würfen 20mal, unter n Würfen $\frac{n}{6}$ mal zustande kommt. Die Angabe der Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{6}$ hat vielmehr folgende Bedeutung: Wenn unter einer großen Anzahl w von Würfen t Treffer zustande kommen, bei denen eine Sechs fällt, so kommt der Quotient $\frac{t}{w}$ dem Wert $\frac{1}{6}$ im allgemeinen um so näher, je größer die Zahl der Würfe ist.

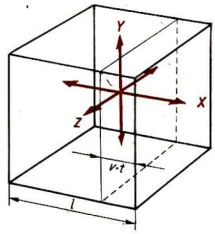
Die folgende Tabelle und das dazugehörige Diagramm (Bild 65/1) erläutern dies an einem Beispiel, bei dem 600mal gewürfelt wurde.

Tabelle 4: Häufigkeit der Treffer („Sechs") in Abhängigkeit von der Wurfzahl

w	30	60	90	120	240	360	480	600
t	7	15	20	29	45	65	83	99
$\frac{t}{w}$	0,233	0,250	0,222	0,242	0,188	0,181	0,173	0,165

Um zur Grundgleichung der kinetischen Gastheorie zu gelangen, nehmen wir ebenfalls einige Vereinfachungen vor. Man spricht von einem *Modell des Gases*, das gegenüber der Wirklichkeit zum Erleichtern der Rechnung vereinfacht ist.

1. Als Gasbehälter wählen wir einen würfelförmigen Raum mit der Kantenlänge l. (Wir können praktisch *jeden* Gasbehälter in beliebig viele kleine und gleich große würfelförmige Gasbehälter zerlegen.)
2. In dem würfelförmigen Raum sollen sich N Moleküle mit jeweils der Masse m und dem Geschwindigkeitsbetrag v befinden. Da wir die Moleküle als *Punktmassen* betrachten, behindern sie sich bei ihren Bewegungen nicht; außerdem haben sie einen so großen Abstand voneinander, daß sie während ihrer Bewegungen keine Kräfte aufeinander ausüben.
3. Wir stellen uns die Gasmoleküle zunächst als Punktmassen vor, das heißt, wir denken uns diese Teilchen so klein, daß sie wie Punkte im Raum durch drei Koordinaten bestimmt werden können. Die Punktmassen sollen zwar eine Masse, jedoch keine Eigenvolumina besitzen.
4. Im Gegensatz zur Wirklichkeit sollen sich die Moleküle in vorgeschriebenen Bahnen, nämlich je ein Drittel der Moleküle nur parallel zur x-, y- oder z-Achse bewegen (Bild 66/1). Keine der sechs Wegrichtungen soll dabei bevorzugt sein.
5. Jedes Molekül, das auf eine der durch die drei Koordinaten angezeigten Flächen trifft, soll elastisch auf die gegenüberliegende Fläche des Raumes zurückgeworfen (reflektiert) werden.



66/1 Der würfelförmige Gasbehälter hat die Kantenlänge l; die Bewegung der Gasmoleküle soll parallel zu den Koordinaten erfolgen

Mit diesen Vereinfachungen lassen sich der Gasdruck, die Molekülanzahl je Volumeneinheit, ihre Masse und ihre Geschwindigkeit erfassen mit der

Grundgleichung der kinetischen Gastheorie:

$$p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2 \tag{13.1}$$

Der Druck eines Gases ist gleich einem Drittel des Produktes aus der Molekülanzahl in der Volumeinheit, der Masse eines Moleküls und dem Quadrat der mittleren Geschwindigkeit.

Im folgenden ist ein Weg gegeben, wie man zu dieser Grundgleichung gelangt.

1. Wieviel Moleküle N' prallen in der Zeit t auf eine Seitenwand des Würfels?

In der Zeit t erreichen alle jene Moleküle die rechte Seitenwand, die von dieser Wand nicht weiter entfernt sind als $s = v \cdot t$ und sich auf diese Wand zu bewegen.

Im gesamten Würfelvolumen l^3 bewegen sich $\frac{N}{6}$ Moleküle auf die Wand zu. Im Teil-Volumen $l^2 \cdot v \cdot t$ sind es N' Moleküle.

N' ergibt sich aus der Proportion $N' : \frac{N}{6} = v \cdot t : l^3$. Daraus folgt

$$N' = \frac{N}{6} \cdot \frac{v \cdot t}{l}.$$

2. Welche Kraft übt ein Molekül beim Stoß gegen die Wand aus?

Während der Zeit t_0 des Stoßvorganges wird ein aufprallendes Molekül zuerst auf die Geschwindigkeit Null abgebremst und dann wieder bis zum Erreichen seiner ursprünglichen Geschwindigkeit beschleunigt. Die Geschwindigkeit kehrt ihre Richtung um. Die Geschwindigkeitsänderung ist also $2 \cdot v$.

Vereinfachend soll nun angenommen werden, daß während des Stoßes das Molekül eine konstante Beschleunigung erfährt.

$$\text{Beschleunigung} = \frac{\text{Geschwindigkeitsänderung}}{\text{Stoßzeit}},$$

$$a = \frac{2 \cdot v}{t_0}.$$

Hieraus folgt für die Kraft, die auf das Molekül von der Wand ausgeübt wird:

$$F = m \cdot a,$$

$$F = m \cdot \frac{2 \cdot v}{t_0}.$$

Nach dem Gesetz actio = reactio übt das Molekül beim Stoß eine gleich große Gegenkraft auf die Wand aus.

3. Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie.

Nach der in 1. entwickelten Gleichung treffen in der Zeit t_0 N_0' Moleküle die Wand:

$$N_0' = \frac{N}{6} \cdot \frac{v \cdot t_0}{l}.$$

Die von allen diesen Molekülen ausgeübte Kraft ist die Summe der gleich großen Einzelkräfte

$$F_{ges} = N_0' \cdot F,$$

$$F_{ges} = \frac{N}{6} \cdot \frac{v \cdot t_0}{l} \cdot m \cdot \frac{2 \cdot v}{t_0},$$

$$F_{ges} = \frac{N}{3} \cdot \frac{m \cdot v^2}{l}.$$

Da im Mittel zu gleichen Zeiten ständig die gleiche Zahl von Molekülen aufprallt, ist diese Kraft konstant.

Für den Gasdruck ergibt sich:

$$p = \frac{F_{ges}}{A} = \frac{F_{ges}}{l^2},$$

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m \cdot v^2}{l \cdot l^2},$$

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m \cdot v^2}{l^3}.$$

Der Ausdruck l^3 ist gleichbedeutend mit dem Volumen V. Es ergibt sich:

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m \cdot v^2}{V}. \tag{13.2}$$

Diese Gleichung klärt den Zusammenhang zwischen Teilchenkonzentration $\frac{N}{V}$, Teilchenmasse, Teilchengeschwindigkeit und Gasdruck.

Der Quotient $\frac{N}{V}$ aus der Gesamtzahl der Gasmoleküle und dem Volumen ist zahlenmäßig gleich der Molekülanzahl in der Volumeinheit. Wir bezeichnen ihn mit dem Buchstaben n[1]. Es folgt also die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie:

$$p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2.$$

Durch Multiplikation beider Seiten der Gleichung 13.1 mit dem Gasvolumen erhält man

$$p \cdot V = \frac{N}{3} \cdot m \cdot v^2.$$

Da die auf der rechten Seite der Gleichung stehenden Größen nach den obigen Voraussetzungen konstant sind, folgt also:

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

Das ist das bereits auf andere Weise erarbeitete Boylesche Gesetz. Somit kann aus den Grundannahmen der kinetischen Gastheorie ein makroskopisches Gesetz abgeleitet werden. Das bestätigt die Grundvorstellungen der kinetischen Gastheorie.

2.2.3. Die Anzahl der Gasmoleküle in einem Mol

Aus der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie kann die Anzahl der Moleküle je Kubikzentimeter berechnet werden. Sie kann hier nur ohne Beweis mitgeteilt werden; sie beträgt bei 0 °C und 760 Torr etwa $27 \cdot 10^{18}$. Aus dem Chemieunterricht ist uns der Begriff des *Mols* bekannt (s. auch S. 54). Es ist beispielsweise ein Mol Sauerstoff (O_2) gleich 32 g Sauerstoff. Das Mol eines jeden Gases nimmt bei 0 °C und 760 Torr einen Raum von annähernd 22400 cm³ ein, es enthält somit

$$22400 \cdot 27 \cdot 10^{18} \approx 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle.}$$

Diese Zahl $L = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ wurde 1865 annäherungsweise von dem österreichischen Physiker Joseph Loschmidt[2] gefunden und heißt nach ihm die *Loschmidtsche Zahl*. Sie kann durch mehrere voneinander unabhängige Methoden experimentell bestimmt werden. Die Ergebnisse aller dieser Ermittlungen stimmen, wenn man von den kleinen, durch Meßungenauigkeiten bedingten Fehlern absieht, miteinander gut überein.

2.3. Die Volumenergie einer Gasmenge

Oftmals ist es wichtig zu wissen, welche Energie ein Gas in einem Behälter hat; man benötigt solche Angaben, um zum Beispiel die Druckluftversorgung einer Farbspritzanlage sicherzustellen. Den Begriff der *Volumenergie* eines Gases, also das Arbeitsvermögen einer abgeschlossenen Gasmenge, und das Verhältnis zur gesamten kinetischen Energie einer Gasmenge wollen wir im folgenden kennenlernen.
Bild 69/1 zeigt einen Behälter. Durch ein Ansatzrohr kann das Gas einströmen; dabei wird ein Kolben mit der Fläche A seitlich verschoben (Wir verein-

[1] n hat die Einheit m^{-3}, dm^{-3}, cm^{-3} usw., da die Molekülzahl die Dimension 1 hat.
[2] Joseph Loschmidt (1821 bis 1895), Professor in Wien

Der Quotient $\frac{N}{V}$ aus der Gesamtzahl der Gasmoleküle und dem Volumen ist zahlenmäßig gleich der Molekülanzahl in der Volumeinheit. Wir bezeichnen ihn mit dem Buchstaben n[1]. Es folgt also die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie:

$$p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2.$$

Durch Multiplikation beider Seiten der Gleichung 13.1 mit dem Gasvolumen erhält man

$$p \cdot V = \frac{N}{3} \cdot m \cdot v^2.$$

Da die auf der rechten Seite der Gleichung stehenden Größen nach den obigen Voraussetzungen konstant sind, folgt also:

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

Das ist das bereits auf andere Weise erarbeitete Boylesche Gesetz. Somit kann aus den Grundannahmen der kinetischen Gastheorie ein makroskopisches Gesetz abgeleitet werden. Das bestätigt die Grundvorstellungen der kinetischen Gastheorie.

2.2.3. Die Anzahl der Gasmoleküle in einem Mol

Aus der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie kann die Anzahl der Moleküle je Kubikzentimeter berechnet werden. Sie kann hier nur ohne Beweis mitgeteilt werden; sie beträgt bei 0 °C und 760 Torr etwa $27 \cdot 10^{18}$. Aus dem Chemieunterricht ist uns der Begriff des *Mols* bekannt (s. auch S. 54). Es ist beispielsweise ein Mol Sauerstoff (O_2) gleich 32 g Sauerstoff. Das Mol eines jeden Gases nimmt bei 0 °C und 760 Torr einen Raum von annähernd 22400 cm³ ein, es enthält somit

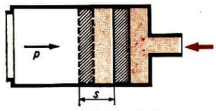
$$22400 \cdot 27 \cdot 10^{18} \approx 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle.}$$

Diese Zahl $L = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ wurde 1865 annäherungsweise von dem österreichischen Physiker Joseph Loschmidt[2] gefunden und heißt nach ihm die *Loschmidtsche Zahl*. Sie kann durch mehrere voneinander unabhängige Methoden experimentell bestimmt werden. Die Ergebnisse aller dieser Ermittlungen stimmen, wenn man von den kleinen, durch Meßungenauigkeiten bedingten Fehlern absieht, miteinander gut überein.

2.3. Die Volumenergie einer Gasmenge

Oftmals ist es wichtig zu wissen, welche Energie ein Gas in einem Behälter hat; man benötigt solche Angaben, um zum Beispiel die Druckluftversorgung einer Farbspritzanlage sicherzustellen. Den Begriff der *Volumenergie* eines Gases, also das Arbeitsvermögen einer abgeschlossenen Gasmenge, und das Verhältnis zur gesamten kinetischen Energie einer Gasmenge wollen wir im folgenden kennenlernen.
Bild 69/1 zeigt einen Behälter. Durch ein Ansatzrohr kann das Gas einströmen; dabei wird ein Kolben mit der Fläche A seitlich verschoben (Wir verein-

[1] n hat die Einheit m^{-3}, dm^{-3}, cm^{-3} usw., da die Molekülzahl die Dimension 1 hat.
[2] Joseph Loschmidt (1821 bis 1895), Professor in Wien



69/1 Zur Veranschaulichung der Volumenergie

fachen: der Kolben sei gewichtslos, und bei seinem Verschieben erfolgte keine Reibung). Die gegen den Kolben wirkende Druckkraft ist $p \cdot A$. Wird der Kolben um die Strecke s verschoben, so ist die verrichtete Arbeit W gleich $p \cdot A \cdot s$. Daraus folgt

$$W = p \cdot V. \tag{14.1}$$

Das Produkt $p \cdot V$ heißt *Volumenergie* der Gasmenge.

Der Zusammenhang zwischen der Volumenergie und der gesamten kinetischen Energie W_{kin} einer Gasmenge läßt sich folgendermaßen darstellen:

Der Ausdruck (13.1)

$$p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2$$

soll auf die Arbeit $W = p \cdot V$ erweitert werden:

$$p \cdot V = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2 \cdot V.$$

Da $n = \frac{N}{V}$ ist, folgt $p \cdot V = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m \cdot v^2 \cdot V$ und nach dem Kürzen

$$p \cdot V = \frac{N \cdot m \cdot v^2}{3}. \tag{14.2}$$

Die kinetische Energie W_{kin} aller Gasmoleküle N ist

$$W_{kin} = \frac{N \cdot m \cdot v^2}{2}. \tag{14.3}$$

Aus den letzten beiden Gleichungen läßt sich dann ableiten

$$\boxed{p \cdot V = \frac{2}{3} W_{kin}} \tag{14.4}$$

Die Volumenergie eines Gases beträgt zwei Drittel der kinetischen Energie seiner Moleküle.

2.4. Die Grundlagen der kinetischen Wärmetheorie

Bei der Erarbeitung der Grundlagen der kinetischen Gastheorie wurde die *Bewegung* der Moleküle als *Eigenschaft* dieser kleinen Teilchen bezeichnet.
Im folgenden soll diese Eigenschaft gedeutet werden.

2.4.1. Molekularbewegung und Wärme

1. Vom *Jouleschen Versuch* zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents (Klasse 8) ist bekannt, daß durch das Zuführen kinetischer Energie in einer Flüssigkeit eine Temperaturerhöhung bewirkt wird.

2. Eine analoge Erscheinung würden wir beobachten können, wenn an Stelle der Flüssigkeit einem Gas kinetische Energie zugeführt wird.
3. Erwärmt man das Präparat zur Darstellung einer Brownschen Bewegung stärker, dann kann eine lebhaftere Bewegung der Teilchen festgestellt werden.

Solche und andere Feststellungen lassen folgern, daß die Erwärmung eines Stoffes durch zugeführte Energie im engen Zusammenhang mit der Größe der Bewegung seiner Moleküle steht.

Wird einem Stoff Wärme zugeführt, so erhöht sich die mittlere Geschwindigkeit seiner Moleküle.

Bestätigt wird diese Aussage zum Beispiel durch das Verhalten einer in einem Behälter eingeschlossenen Gasmenge, bei der eine Temperaturerhöhung bewirkt wird: Der Druck auf die Wände dieses Behälters wird größer. Offensichtlich ändert sich durch die Zuführung von Energie der Betrag der mittleren Geschwindigkeit der Moleküle, so daß sie die Anzahl ihrer Kraftstöße auf die Wände des Behälters erhöhen.

Wir haben bisher einiges über die *Bewegung der Moleküle* erfahren. Im Physikunterricht wurden bereits andere Formen der Bewegung untersucht.
In der Mechanik gibt es die gleichförmige und die gleichmäßig beschleunigte Bewegung (z. B. den freien Fall). Diese Bewegungen sind *Relativbewegungen*, das heißt, sie sind stets auf ein (wiederum bewegtes) System, zum Beispiel unser Sonnensystem, bezogen.
In der Elektrizitätslehre lernten wir die *Bewegung der Elektronen* kennen. Mit ihrer Hilfe lassen sich viele Erscheinungen erklären: zum Beispiel der spezifische Widerstand der Stoffe, der Zusammenhang zwischen Stromstärke, Widerstand und Spannung und die Vorgänge bei der Elektrolyse.
Auch in der belebten Natur gibt es Bewegungen, man nennt sie *biologische Bewegungen*: der Stoffwechsel der Eiweißkörper und die Entwicklung der Arten.
In der Tätigkeit des Menschen vollzieht sich die Entwicklung der Produktivkräfte und der Produktionsverhältnisse: diese Form der Bewegung nennen wir die *gesellschaftliche Entwicklung*.
Hier wurden nur einige Beispiele für Bewegungen genannt. Es läßt sich aber allgemein sagen:

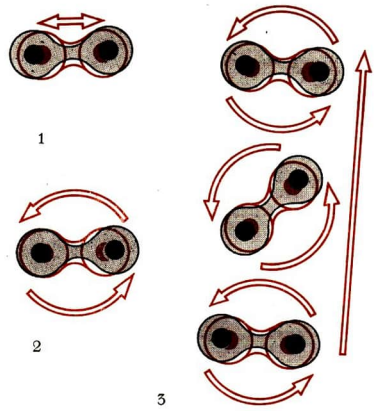
Alles in der Natur und in der Gesellschaft befindet sich in unaufhörlicher Bewegung.

Im philosophischen Sinne bedeutet Bewegung nicht nur die Ortsveränderung eines Gegenstandes im Raum. Sie umfaßt alle vor sich gehenden Prozesse und Veränderungen.

2.4.2. Der Wärmeinhalt eines Körpers

Die ungeordnete Bewegung der Moleküle, wie sie bei der Brownschen Bewegung erklärt wurde, stellt nur *eine* Äußerung der kinetischen Energie der Moleküle dar. Die moderne Forschung schreibt den Molekülen außerdem noch folgende Bewegungsmöglichkeiten zu (Bild 71/1):

1. *Schwingung:* Die Atome der Moleküle sind nicht starr verbunden; sie schwingen um eine Ruhelage.
2. *Rotation:* Die Moleküle können Drehbewegungen ausführen.
3. Zusammenwirken von *Rotation und Translation:*
   Fortschreitende und drehende Bewegung können gemeinsam auftreten.



71/1 Veranschaulichung von Bewegungsformen der Moleküle
1 Schwingung
2 Rotation
3 Zusammengesetzte Bewegung aus Rotation und Translation

Alle in einem System befindlichen Teilchen wirken ständig aufeinander ein; auf diese Weise kommt es zu einem dauernden Austausch von kinetischer und potentieller Energie.

Die Gesamtheit der mechanischen Energien der kleinsten Teilchen eines Körpers bildet seinen Wärmeinhalt.

Wird einem Körper Energie (z. B. Wärme) zugeführt, so erhöht sich, wenn keine anderen Zustandsänderungen eintreten, seine Temperatur. Die gleiche Menge Energiezufuhr bei zwei Körpern gleichen Volumens, gleicher Temperatur, jedoch unterschiedlichen Stoffes bewirkt eine unterschiedliche Temperaturerhöhung. Diese Tatsache ist in *makroskopischer* Betrachtungsweise als *spezifische Wärme* in der Klasse 8 vermittelt worden.
Molekularkinetisch läßt sich diese Tatsache so begründen, daß sich die zugeführte Energie gleichmäßig auf sämtliche Bewegungsmöglichkeiten der Moleküle verteilt: Je mehr Atome zu einem Molekül gehören, desto größer ist die Zahl der Bewegungsmöglichkeiten innerhalb des Moleküls, desto größer ist auch der Wärmeinhalt des Körpers je Mol. Den kleinsten Wärmeinhalt je Mol hat ein Körper, der nur aus einzelnen Atomen besteht, die sich gegenseitig nicht beeinflussen, sich nur um ihre Achsen selbst drehen und keine Schwingungen ausführen. Das ist bei den Edelgasen der Fall.

Der Wärmeinhalt eines Körpers ist eine Energiegröße, sie ist bestimmt durch die Summe aller Lage- und Bewegungsenergien der Elementarteilchen des Körpers.

2.4.3. Temperatur und Energieinhalt eines Gases

Die *Temperatur* ist eine **makroskopische Zustandsgröße;** sie ist abhängig von der mittleren kinetischen Energie der Moleküle.
Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie liefert die Beziehung zwischen einer makroskopischen Zustandsgröße, dem Druck p, und mehreren molekularen Zustandsgrößen, nämlich der Molekülanzahl je Raumeinheit n, der Molekülmasse m und der mittleren quadratischen Molekülgeschwindigkeit v^2; es ist

$$p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2.$$

Als Zustandsgleichung für ein Mol eines Gases gilt (s. S. 55):

$$p \cdot V_{0\,M} = R \cdot T.$$

Setzt man den obengenannten Ausdruck für p in diese Gleichung ein, so erhält man

$$\frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2 \cdot V_{0\,M} = R \cdot T. \tag{15}$$

Einer Erhöhung der Temperatur entspricht demnach eine Steigerung der Geschwindigkeit der Moleküle, da in dieser Gleichung außer T und v nur konstante Größen vorkommen. Gibt man dieser Gleichung die Form

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot n \cdot V_{0\,M} \cdot m \cdot v^2 = R \cdot T$$

und berücksichtigt, daß das Produkt $n \cdot V_{0\,M} \cdot m$ die Gesamtmasse der Moleküle in einem Mol bedeutet, so gelangt man zu der Folgerung:

> **Die absolute Temperatur eines Gases ist der mittleren kinetischen Energie der Gasmoleküle proportional.**

Daraus folgt auch, daß die kinetische Energie der Molekularbewegung je Mol durch die Gleichung

$$\boxed{\frac{W_{kin}}{\text{Mol}} = \frac{3}{2} R \cdot T} \tag{16}$$

gegeben ist.

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß bei der absoluten Temperatur $T = 0$ °K das ideale Gas keine Bewegungsenergie mehr hat. Diese Temperatur ist die tiefste Temperatur, die auftreten kann. Die Erfahrung zeigt, daß alle Gase beim Abkühlen bereits vor der Annäherung an den absoluten Nullpunkt kondensieren.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Warum ist es notwendig, zur Darstellung der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie Vereinfachungen vorzunehmen?
2. Welche physikalischen Erscheinungen können ebenfalls mit Hilfe des Begriffes der Punktmasse erklärt werden?

3. Ein Stickstoffmolekül hat bei 0 °C die Geschwindigkeit von 492 $m \cdot s^{-1}$. Wievielmal trifft es in einer Sekunde auf dieselbe Wand eines würfelförmigen Raumes, wenn die Kantenlänge l des Raumes 3 cm beträgt?

4. Was verstehen Sie unter der Volumenergie eines Gases?

5. Begründen Sie die Ableitung $p \cdot V = \frac{2}{3} W_{kin}$!

6. Füllen Sie ein Becherglas zu zwei Drittel mit Wasser, geben Sie einige Körnchen Kaliumpermanganat vorsichtig in das Glas und erwärmen Sie es mit ganz kleiner Flamme eines Bunsenbrenners! Was folgern Sie aus dem Verlauf der Schlierenbildung und Färbung des Wassers!

7. Nennen Sie Möglichkeiten, wie die Bewegung der Moleküle in einem Stück Stahl erhöht werden kann!

8. Erklären Sie die Wärmewirkung des elektrischen Stromes molekularkinetisch!

9. Geben Sie eine molekularkinetische Erklärung des Übergangs vom festen in den flüssigen Zustand beim Schmelzen von Blei!

Zusammenfassung

1. **Stoffe lassen sich mit Hilfe der modernen Technik in einem hohen Maße teilen.**
   Welche Beispiele haben Sie kennengelernt?

2. **Die Brownsche Bewegung läßt den Schluß zu, daß sich die kleinsten Teilchen der Stoffe ständig in Bewegung befinden.**
   In welchem Aggregatzustand befanden sich die Stoffe bei dem Versuch zur Brownschen Molekularbewegung?

3. **Zwischen dem Druck eines Gases, der Anzahl der Moleküle dieses Gases, der Masse und der Geschwindigkeit eines Moleküls dieses Gases besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang.**
   Wie wird dieser Zusammenhang mathematisch ausgedrückt?

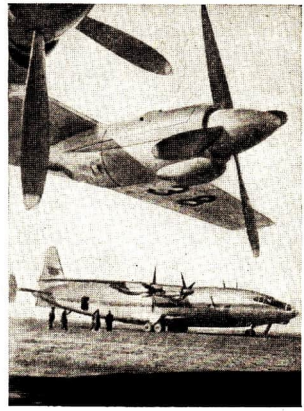
4. **Ein Gas vermag eine Arbeit zu verrichten, die man Volumenergie nennt. Zwischen der Volumenergie eines Gases und der kinetischen Energie der Moleküle dieses Gases besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang.**
   Wie wird dieser Zusammenhang mathematisch ausgedrückt?

5. **Wird ein Stoff erwärmt, so wird die Bewegung seiner Moleküle stärker; diese Bewegungen können ungeordnet, geordnet und zusammengesetzt sein.**
   Stellen Sie die Bewegungsformen grafisch dar!

6. **Bildet man die Summe der kinetischen und potentiellen Energie der Teilchen eines Körpers, so entspricht diese Summe dem Wärmeinhalt dieses Körpers.**
   Welche Beziehung zwischen der spezifischen Wärme eines Körpers und seinem Wärmeinhalt kann gezeigt werden?

7. **Die absolute Temperatur eines Gases ist der kinetischen Energie der Gasmoleküle proportional.**
   Welche Beziehung besteht zwischen dieser Aussage und den beiden Gesetzen von Gay-Lussac?

3. Hauptsätze der Wärmelehre



Die Erfahrungen mit der Dampfturbine und dem Dieselmotor halfen den Ingenieuren und Wissenschaftlern bei den Versuchen, das Arbeitsvermögen erwärmter Gase in einer Gasturbine auszunutzen.
Allen Wärmekraftmaschinen liegen die Erkenntnisse aus den Hauptsätzen der Wärmelehre zugrunde, die unter hohem technischem Aufwand, aber auch mit großem Erfolg verwirklicht werden.

3.1. Die spezifische Wärme

Wenn die Temperatur eines Körpers erhöht werden soll, muß ihm Energie, zumeist in Form von Wärme, zugeführt werden. Die für eine bestimmte Temperaturerhöhung notwendige Wärme wächst mit der Masse des Körpers und ist außerdem noch vom Stoff abhängig, aus dem der Körper besteht. Diese Beziehung wird wiedergegeben durch die Gleichung:

$$W = m \cdot c \cdot \Delta t.$$

W: zugeführte Wärme (in kcal)
m : Masse des Stoffes (in kg)
c: spezifische Wärme des Stoffes (in $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}$)
Δt: Temperaturerhöhung (in grd)

Die spezifische Wärme c ist, wie aus genauen Messungen hervorgeht, eine vom Material, von der Temperatur und vom Druck abhängige Größe.

3.1.1. Die spezifische Wärme der Gase

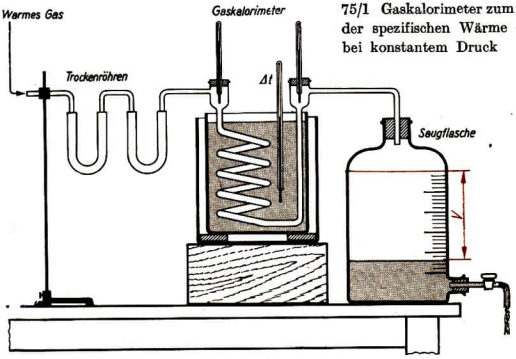
In allen Wärmekraftmaschinen werden gasförmige Arbeitsstoffe verwendet (Wasserdampf, Benzindampf oder Schweröldampf-Luftgemische und ihre Verbrennungsprodukte). Aus diesem Grunde müssen für die Wärmetechnik die spezifischen Wärmen der Gase bekannt sein. Bei der Bestimmung der spezifischen Wärme eines Gases ergeben sich verschiedene Schwierigkeiten:

1. Wegen der geringen Dichte der Gase ist die Wärmeaufnahme je Volumeneinheit gering.
2. Wenn ein Gas erwärmt wird, ändern sich mit der Temperatur im allgemeinen auch gleichzeitig die anderen Zustandsgrößen Volumen und Druck.

Aus diesem Grunde muß jeweils genau angegeben werden, unter welchen Bedingungen die spezifische Wärme gemessen wurde.
Wir werden zwei Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Wärme der Gase kennenlernen.
Im ersten Falle erhalten wir die spezifische Wärme bei konstantem Druck c_p.
Im zweiten Falle erhalten wir die spezifische Wärme bei konstantem Volumen c_v.

3.1.2. Bestimmung der spezifischen Wärme c_p eines Gases bei konstantem Druck

Das auf eine bestimmte Temperatur vorgewärmte Gas (Luft) strömt durch ein in einem Kalorimeter befindliches Schlangenrohr. Das Gas gibt dabei Wärme an die Kalorimeterflüssigkeit (Wasser) mit der Masse m_W ab. Es werden gemessen: Die Eintrittstemperatur T_1 und die Austrittstemperatur T_2 des Gases sowie die Anfangstemperatur t_1 und die Endtemperatur t_2 und die Masse m_W des Wassers. Das Volumen V des durchströmenden Gases wird ebenfalls bestimmt und daraus auf die Gasmasse m_G geschlossen.



75/1 Gaskalorimeter zum Bestimmen der spezifischen Wärme eines Gases bei konstantem Druck

Die gesamte an das Kalorimeter abgegebene Wärme W_{ges} wird im Versuch bestimmt und mit den anderen bekannten Faktoren die spezifische Wärme bei konstantem Druck ermittelt:

$$W_{ges} = m_W \cdot c_W \cdot (t_2 - t_1), \qquad \text{Kalorimeterflüssigkeit}$$

$$c_p = \frac{W_{ges}}{m_G\,(T_1 - T_2)}. \qquad \text{Luft}$$

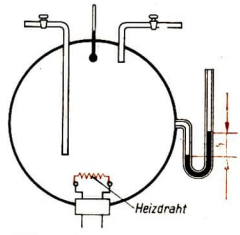
Für trockene, von Kohlendioxid befreite Luft erhält man bei 760 Torr und 0 °C den Wert:

$$c_p = 0{,}2375 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}.$$

Für andere Gase können die c_p-Werte aus Tabellen entnommen werden.

3.1.3. Bestimmung der spezifischen Wärme c_v eines Gases bei konstantem Volumen

Hierzu wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Wir beschränken uns auf die elektrische Methode nach NERNST.



76/1 Gerät zur Bestimmung der spezifischen Wärme eines Gases bei konstantem Volumen

Ein kugelförmiges Gefäß, in dem sich ein Heizdraht befindet, ist mit einem empfindlichen Manometer versehen; es wird mit dem zu untersuchenden Gas gefüllt und verschlossen (Bild 76/1). Zur Erwärmung des Heizdrahtes leitet man durch diesen einen Strom von sehr kurzer Dauer, etwa 0,01 s bis 0,1 s. Die frei werdende Wärme führt zu einer Temperaturerhöhung des Gases. Dies hat eine Druckerhöhung der Gasmenge im Gefäß zur Folge. Hierbei hat, wie man experimentell feststellen konnte, die ungleichmäßige Verteilung der Wärme auf die Größe der Druckzunahme keinen Einfluß. Wichtig ist nur, daß der Druck gemessen wird, ehe das vom Heizdraht aufsteigende erwärmte Gaswölkchen die obere Gefäßwand erreicht hat, das heißt, bevor eine Wärmeabgabe an das Gefäß eintritt.

Folgende Überlegung führt zu einer Beziehung zwischen frei werdender Wärme und daraus entstehender Druckerhöhung.

1. *Wärmeentwicklung* (elektrisches Wärmeäquivalent)

   $1 \text{ Ws} = 0{,}239 \text{ cal}.$

   Demnach ist die elektrische Arbeit des Heizdrahtes

   $$W_{el} = U \cdot I \cdot t.$$

   Diese physikalischen Größen lassen sich leicht ermitteln. Daraus wird die Wärmeentwicklung berechnet.

2. *Druckzunahme* (Gay-Lussacsches Gasgesetz)

   Die Druckänderung des Gases läßt wiederum auf eine Temperaturänderung Δt schließen. Damit erhält man die spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Volumen

   $$c_v = \frac{W_{el}}{m \cdot \Delta t}.$$

Für Luft erhalten wir bei 760 Torr und 0 °C den Wert

$$c_v = 0{,}1690 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}.$$

Messungen haben ergeben, daß in jedem Falle auch bei anderen Gasen $c_p > c_v$ ist. Bildet man aus den beiden spezifischen Wärmen einen Quotienten, so erhält man eine Konstante

$$\varkappa = \frac{c_p}{c_v}.$$

Diese Konstante hängt vom Aufbau der Gasmoleküle ab.

Tabelle 5: Spezifische Wärmen einiger Gase

Gas		c_p (in kcal · kg^{-1} · grd^{-1})	c_v (in kcal · kg^{-1} · grd^{-1})	$\varkappa$
einatomig	Helium	1,25	0,755	1,66
zweiatomig	Wasserstoff	3,41	2,43	1,409
	Luft	0,2375	0,1690	1,402
dreiatomig	Wasserdampf (100 ... 300 °C)	0,4515	0,339	1,332
	Kohlendioxid	0,1962	0,1510	1,30

Die unterschiedlichen Werte für $\varkappa$ haben ihre Ursache in der unterschiedlichen Rotation und Translation der Gasmoleküle (s. S. 71 Kinetische Gastheorie), die den Energiehaushalt je nach Zahl der Atome im Molekül verändern. Das Verhältnis der spezifischen Wärmen ($\varkappa$) ist eine für die Berechnung von thermischen Prozessen außerordentlich bedeutungsvolle Größe.

77/1 Major Gagarin, der erste Kosmonaut der Welt, der die Erde umkreiste, nach der Landung

3.2. Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Am 12. 4. 1961 landete der erste Kosmonaut, Major GAGARIN, nach einmaliger Erdumkreisung wohlbehalten wieder auf der Erde. Bei Beendigung des Fluges durchstieß er mit seiner Flugkabine die dichteren Schichten der Erdatmosphäre, wobei

die zu diesem Zwecke angebrachte Wärmeschutzschicht der Kabine infolge der frei werdenden Reibungswärme verglühte und verdampfte.
Die mechanische Arbeit, die aufgewendet werden mußte, um das Raumschiff auf seine Bahn zu bringen, wird bei der Annäherung an die Erde in Form von Reibungsarbeit wieder frei. Das entspricht dem Gesetz von der Erhaltung der Energie.

● *Welche Ursache hat die Wärmeentwicklung an Flugkörpern beim Durchfliegen der Atmosphäre?*

3.2.1. Arbeit - Wärme - Äquivalenz

Aus dem Weltraum zu uns gelangende Meteorite verglühen und verdampfen in ihr. Aber auch beim Hobeln, Drehen oder Bohren tritt eine starke Erwärmung ein, und wer ungeschickt ist, kann sich beim Herablassen an der Kletterstange Brandblasen an den Handflächen zuziehen.
Bekannt ist folgendes:

Das Überwinden der Reibungskraft erfordert mechanische Arbeit. Bei Reibungsvorgängen wird Wärme frei.

Daraus können wir schließen, daß mechanische Energie und Wärmeenergie in enger Beziehung zueinander stehen.

Einer der ersten, die diesen von uns noch zu untersuchenden Sachverhalt erforschten, war Benjamin Thompson, der vom bayrischen König den Titel Graf Rumford verliehen bekam. Thompson war um 1798 damit beschäftigt, dem bayrischen König eine Geschützproduktion einzurichten. Beim Ausbohren von Kanonenrohren wies er nach, daß die dabei frei werdende Wärme unabhängig ist von der erzeugten Bohrspanmenge. Damit zeigte er, daß die bis dahin gebräuchliche Auffassung vom „Wärmestoff" falsch war. Die entscheidende Entdeckung machte der deutsche Schiffsarzt eines holländischen Kurierseglers in der Südsee. Dieser Dr. Robert Mayer stellte bei seinen ärztlichen Untersuchungen fest, daß in den Tropen das venöse Blut nicht so dunkelrot ist wie in gemäßigten Klimazonen, daß demzufolge der Sauerstofftransport im Körper in wärmeren Zonen geringer ist. Andererseits war ihm bekannt, daß das Leistungsvermögen des Menschen in den Tropen geringer ist. Demzufolge konnte zwischen der im Körper „erzeugten" Wärme und dem Arbeitsvermögen ein Zusammenhang bestehen.
Dr. Robert Mayer stellte, nachdem er nach Deutschland zurückgekehrt und in eine Zeit großer technischer Entwicklungen geraten war, auf Grund seiner biologischen Erkenntnisse ein Gedankenexperiment an.
Zwei gleich große Zylinder sind mit Luft gefüllt. Die Zylinder sind durch reibungslos und gewichtslos angeordnete Kolben so abgedichtet, daß unter dem Atmosphärendruck 1 atm genau 1 m^3 Luft darin enthalten ist. Die Temperatur der eingeschlossenen Gasmenge sei 0 °C (273 °K).

$$1\ \text{atm} = 760\ \text{Torr} = 101\,325\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 101\,325\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2},$$

$$1\ \text{Torr} = \frac{101\,325}{760}\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{101\,325}{760}\ \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}.$$

Da die Luftdichte unter den Anfangsbedingungen 1,293 kg · m^{-3} beträgt, enthält jeder Zylinder 1,293 kg Luft.

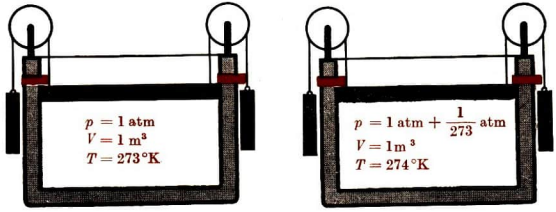
Die Luft im ersten Zylinder wird bei konstantem Volumen um 1 grd erwärmt. Hierzu ist die Wärme

$$W_v = m \cdot c_v \cdot \Delta t,$$

$$W_v = 1{,}293\,\text{kg} \cdot 0{,}1690\,\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grd}} \cdot 1\,\text{grd},$$

$$W_v = 0{,}219\,\text{kcal}$$

erforderlich.



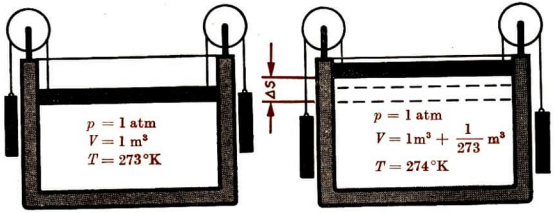
Die Luft im zweiten Zylinder wird bei konstantem Druck um 1 grd erwärmt. Hierzu ist die Wärme

$$W_p = m \cdot c_p \cdot \Delta t,$$

$$W_p = 1{,}293\,\text{kg} \cdot 0{,}2375\,\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grd}} \cdot 1\,\text{grd}.$$

$$W_p = 0{,}307\,\text{kcal}$$

erforderlich.



- *Weshalb ist die Wärme W_p größer als W_v?*

Das Gas hat sich bei der Erwärmung unter konstantem Druck ausgedehnt und dabei gegen die äußere Druckkraft eine Arbeit verrichtet.

Die Differenz der beiden Wärmen $W_p - W_v = 0{,}088$ kcal ist in die Ausdehnungsarbeit umgewandelt worden.

Diese Arbeit soll nun berechnet werden.
Die Druckkraft, die bei der Ausdehnung wirksam ist, ergibt sich nach der Gleichung

$$F = p \cdot A .$$

Wenn bei der Ausdehnung der Kolben um die Strecke s verschoben wird, ist die Arbeit

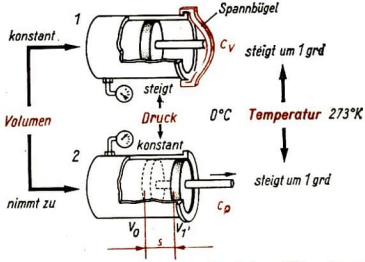
$$W_{mech} = F \cdot s,$$
$$W_{mech} = p \cdot A \cdot s$$
$$W_{mech} = p \cdot V.$$

$A \cdot s$ ist die Volumzunahme des Gases. Diese ist bei Temperaturerhöhung um 1 grd $\frac{1}{273}$ des Anfangsvolumens:

$$V = \frac{1}{273}\,\mathrm{m}^3.$$

Damit erhält man für die Arbeit

$$W = 1\,\mathrm{atm} \cdot \frac{1}{273}\,\mathrm{m}^3,$$
$$1\,\mathrm{atm} = 10330\,\mathrm{kpm}^{-2}$$
$$W = \frac{10330}{273}\,\mathrm{kpm},$$
$$W = 37{,}8\,\mathrm{kpm}.$$



80/1 Darstellung zum mechanischen Wärmeäquivalent

Durch Gleichsetzen der Ausdehnungsarbeit mit der Differenz der Wärmemengen ergibt sich

$$0{,}088\,\mathrm{kcal} = 37{,}8\,\mathrm{kpm}.$$

Diese Beziehung zwischen der Energieeinheit der Mechanik Nm und der Energieeinheit der Wärme wird ausgedrückt durch die

Arbeit - Wärme - Äquivalenz **1 kcal = 427 kpm,**

oder wenn die mechanische Energieeinheit $1\,\mathrm{Nm} = \frac{1}{9{,}81}\,\mathrm{kpm}$ eingeführt wird:

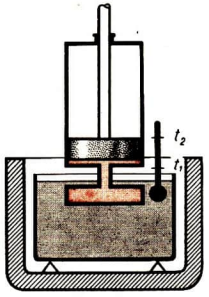
1 kcal = 4187 Nm.

Ebenfalls einander äquivalente Energiebeträge sind: $1\,\mathrm{kcal} = 4187\,\mathrm{Ws}$
$1\,\mathrm{kcal} = 1{,}162 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{kWh}.$

Dr. Robert Mayer benutzte bei seinen Untersuchungen die damals schon bekannten spezifischen Wärmen bei konstantem Volumen und konstantem Druck und gab gleichzeitig eine Erklärung für den Unterschied. Den Nachweis, daß mechanische Energie und Wärmeenergie einander äquivalent sind, hat unabhängig von Mayer der Engländer James Prescott Joule experimentell erbracht.

1. Ein Gefäß, in dem Luft bis auf 22 at komprimiert werden kann, wird in das Wasserbad eines Kalorimeters gebracht.
Die zur Kompression der Luft aufgewendete Arbeit kann aus dem Anfangs- und Enddruck sowie dem Anfangs- und Endvolumen berechnet werden. Das Kalorimeter wird so groß gewählt, daß die Temperaturerhöhung entsprechend klein bleibt. Die aufgewendete Arbeit setzt sich vollkommen in Wärme um; dies führt zur Erwärmung des Wasserbades.

Der gleiche Versuch läßt sich in umgekehrter Richtung durchführen. Läßt man das komprimierte Gas entspannen, so verringert sich die Temperatur der Kalorimeterflüssigkeit. Es wird offensichtlich Wärme in mechanische Energie umgesetzt.

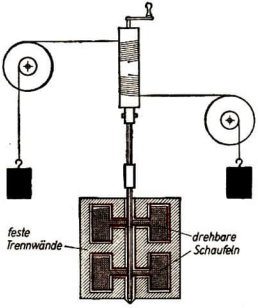


81/1 Mechanische Energie läßt sich in Wärmeenergie umwandeln (Versuch von JOULE)

2. JOULE bestimmte das mechanische Wärmeäquivalent auch unmittelbar, indem er ein Schaufelrad durch zwei Massen in schnelle Umdrehung setzte (Bild 81/2). Das Rad lief in einem mit Quecksilber gefüllten Kalorimeter, das zur Erhöhung der Reibung radial geschlitzte Zwischenwände hatte. Die Flügel des Rades bewegten sich zwischen den Kammern. Beim Herabsinken der Massen wurde die mechanische Energie fast verlustlos in Reibungswärme umgewandelt. Daraus folgt:

$$W_{mech} = m \cdot g \cdot h.$$

Aus der Temperaturerhöhung der Masse der Kalorimeterflüssigkeit läßt sich leicht die äquivalente Wärmemenge bestimmen. Auf diese Weise gelangte JOULE zu experimentell bestätigten Ergebnissen.



81/2 Bestimmung der Äquivalenz von Wärme und Arbeit nach J. P. JOULE
Zwei Massen versetzen ein in ein Kalorimeter eingebautes Rührwerk in Umdrehung. Hierdurch wird das im Kalorimeter befindliche Quecksilber erwärmt

Wir erkennen:

Wärme ist eine Energieart und damit anderen Energiearten äquivalent.

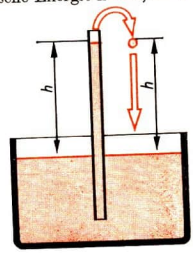
- *Welche Verfahren sind anwendbar, um den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Energiearten und der Wärmeenergie quantitativ zu ermitteln?*

3.2.2. Gesetz von der Erhaltung der Energie

MAYER und JOULE haben diesen Zusammenhang physikalisch erkannt und ausgewertet. Die Ergebnisse führten zum **ersten Hauptsatz der Wärmelehre:**

> Mechanische Energie und Wärme sind zwei Energiearten, die sich ineinander überführen lassen. Bei allen Umwandlungen zwischen diesen Energien bleibt die Summe der Energiebeträge erhalten.

H. v. HELMHOLTZ wandte den Satz von der Erhaltung der Energie auf alle bis dahin bekannten Energiearten an und schuf damit ein Bindeglied zwischen elektrischer Energie, Lichtenergie, Schallenergie und chemischer Energie.
Die Auslegung des allgemeinen Energiesatzes gestattet folgende Aussage: Es kann keine Maschine und keine Einrichtung geben, die mechanische Energie liefert, ohne einen äquivalenten Energiebetrag einer anderen Energieart dafür aufzuwenden, d. h., es gibt kein *perpetuum mobile* (unaufhörlich sich von selbst bewegend).



Beispiel

Infolge der Kapillarität steigt in einem engen Röhrchen eine benetzende Flüssigkeit um den Betrag h empor. Beim Verdunsten mit nachfolgender Kondensation entsteht der angedeutete Kreislauf. Obwohl beim Emporsteigen der Flüssigkeit scheinbar keine Arbeit aufgewendet wird, besitzt der fallende Tropfen einen mechanischen Energieinhalt. *Woher stammt die Energie (Dampfdruck beachten)?*

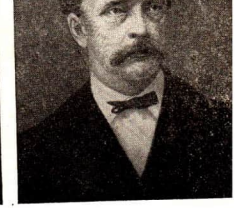
Fragen und Aufgaben

1. Warum muß man bei einem Gas zwei verschiedene spezifische Wärmen, c_p und c_v, unterscheiden?
2. Erklären Sie, warum die Bremstrommeln eines Fahrzeuges beim Bremsen warm werden!

82/2 JULIUS ROBERT MAYER

82/3 JAMES PRESCOTT JOULE

82/4 HERMANN v. HELMHOLTZ



3.3. Die Zustandsänderung eines Gases

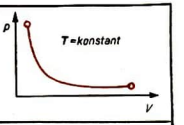
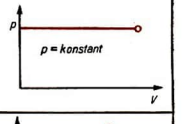
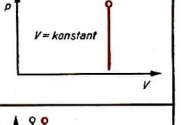
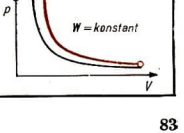
Die Wärme ist eine Form kinetischer Energie, die in der ungeordneten Bewegung der Gasmoleküle besteht (kinetische Gastheorie). Wärme kann aber auch wiederum in mechanische Arbeit umgewandelt werden, wie das Beispiel des Systems Dieselmotor – Kompressor – Drucklufthammer beweist (mechanisches Wärmeäquivalent). Dabei spielen thermische Gasprozesse eine besondere Rolle, denn der Gewinn äußerer, mechanischer Arbeit ist verbunden mit einer Änderung des inneren Energiezustandes der Druckluft.
Dieser Zustand eines Gases ist stets durch drei Größen bestimmt. Es sind das:

Druck p,
Volumen V,
Temperatur T.

Der gegebene Zustand eines Gases läßt sich verändern durch:

1. Erwärmen oder Abkühlen,
2. Verdichten oder Ausdehnen und durch 1. und 2. gleichzeitig.

Die Zustandsänderung eines Gases kann unter verschiedenen Bedingungen herbeigeführt werden.

1. Zustandsänderung bei konstanter Temperatur (Boyle-Mariottesches Gesetz)	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$	isotherme Zustandsänderung	
2. Zustandsänderung bei konstantem Druck (Gay-Lussacsches Gesetz)	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$	isobare Zustandsänderung	
3. Zustandsänderung bei konstantem Volumen	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	isochore Zustandsänderung	
4. Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\varkappa}$	adiabatische Zustandsänderung Schwarze Kurve: Isotherme	

In den Wärmekraftmaschinen werden solche Zustandsänderungen herbeigeführt, die angenähert isotherm, isobar, isochor oder auch adiabatisch ablaufen.

● *Welche 3 Möglichkeiten des Wärmetransportes sind Ihnen bekannt?*

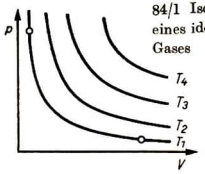
3.3.1. Die isotherme Zustandsänderung

Befindet sich das Gas in einem dicht abschließenden wärmeleitenden Zylinder, so kann mit einem Kolben das Volumen des Gases verringert bzw. vergrößert werden. Der Druck folgt, wenn keine Temperaturerhöhung eintritt, dem Boyle-Mariotteschen Gasgesetz.

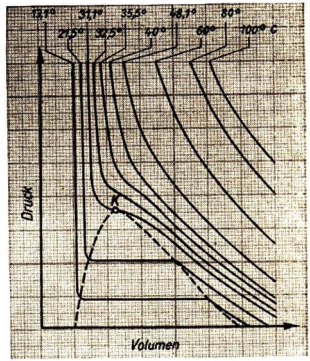
Die Temperaturänderung des Gases beim Zusammendrücken beziehungsweise Entspannen wird sehr langsam durchgeführt. Durch den Wärmeaustausch mit der Umgebung bleibt die Temperatur dabei konstant.

Führt man das Experiment nochmals aus und wählt nun eine niedrigere Ausgangstemperatur, die während der Untersuchung wiederum konstant bleiben soll, so erhält man beim Aufzeichnen (Bild 84/1) ebenfalls eine Hyperbel. Diese Kurve liegt dem Ursprung des Koordinatensystems jedoch näher und schmiegt sich den Koordinatenachsen dichter an. Die in Bild 84/1 gezeigte Schar von Hyperbeln bezeichnet man als Isothermen mit T als Parameter.

Für reale Gase allerdings erhalten wir ein wesentlich anderes Isothermenbild. Es zeigt, daß bei bestimmten Voraussetzungen ein sprunghafter Übergang stattfindet, der aber ebenfalls wieder gesetzmäßig verläuft.



84/1 Isotherme eines idealen Gases



84/2. Isothermen eines realen Gases (Kohlendioxid)

3.3.2. Die Volumarbeit eines Gases bei konstanter Temperatur und konstantem Druck

In einem Zylinder sei ein Kolben frei beweglich und reibungslos so angeordnet, daß er mit einer konstanten Kraft F auf das einströmende Gas wirkt. Das Gas bleibt unter konstantem Druck und wird den Zylinder mit Gas füllen. Der Kolben wird gehoben.

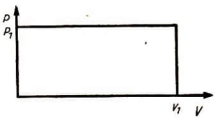
Das Produkt aus der Kraft des Kolbens und der Hubhöhe ist somit bestimmt.

I. $W_H = F \cdot h$.

Das Gas strömt ein mit dem Druck p, und das Volumen erreicht den Wert V.

Die Füllarbeit W_F des Gases ist

II. $W_F = p \cdot V$.



85/1 p-V-Diagramm (Gleichdruck–Hubarbeit)

Beispiel

Ein Gas steht unter dem Druck $p = 1000\ \mathrm{N \cdot m^{-2}}$, das Volumen beträgt $0{,}500\ \mathrm{m^3}$. Welche mechanische Arbeit kann das Gas verrichten?

Gegeben:

$p = 1000\ \mathrm{N \cdot m^{-2}}$
$V = 0{,}5\ \mathrm{m^3}$

Gesucht:

W_{mech} (in Nm und in kp · m)

Lösung:

$W_{mech} = p \cdot V$
$W_{mech} = 1000\ \mathrm{Nm^{-2}} \cdot 0{,}5\ \mathrm{m^3}$
$W_{mech} = 500\ \mathrm{Nm}$

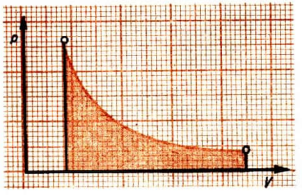
Die mechanische Arbeit beträgt 500 Nm.
Berechnen Sie die Arbeit in kpm!

3.3.3. Verrichtung einer mechanischen Arbeit durch isotherme Entspannung eines Gases

In einem senkrechten Zylinder steht Gas unter dem Druck p_0 bei einem Volumen V_0. Läßt man nun bei konstanter Temperatur (dazu ist ein Wärmeaustausch notwendig!) das Gas auf V_1 ausdehnen, so ist das Gas in der Lage, einen Kolben um die Strecke h zu heben. Vorausgesetzt wird, daß der durch den Kolben ausgeübte Druck geringer ist als der Druck des eingeschlossenen Gases.
Wirkt also eine Kraft längs eines Weges in Kraftrichtung, so wird Arbeit verrichtet.

Es ist allerdings zu beachten, daß die auf den Kolben wirkende Kraft sowie auch der Druck keine konstanten Werte sind. Die gesamte Arbeit ist hier dargestellt durch die Fläche unter der Isotherme zwischen V_1 und V_2. Mit Hilfe des Millimeterpapiers oder des Planimeters kann die Größe dieser Arbeit direkt grafisch bestimmt werden (Bild 85/2). Eine Berechnung der unregelmäßigen Fläche kann erst später mit Mitteln der höheren Mathematik erfolgen.

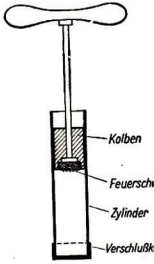
Isotherme Verdichtung und Entspannung erfolgen bei konstanter Temperatur.

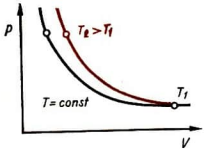


85/2 p-V-Diagramm bei isothermer Entspannung
Die Volumarbeit bei isothermer Entspannung entspricht der Fläche unter der Isotherme

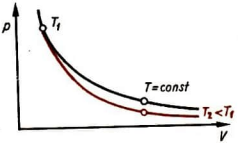
3.3.4. Die adiabatische Zustandsänderung des Gases

Bei der isothermen Zustandsänderung wird vom Gas Wärme aus der Umgebung aufgenommen oder an diese abgegeben. Im Gegensatz dazu steht die adiabatische Zustandsänderung.
Findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung während der Zustandsänderung des Gases statt, so bezeichnen wir diesen Vorgang als *adiabatisch*. Hierbei müssen wir uns den Zylinder als völlig wärmeisoliert vorstellen. Dieser Idealfall läßt sich bei Kraftmaschinen jedoch nicht verwirklichen, da stets Wärme an die Umgebung mit niedrigerer Temperatur abgeleitet wird. Wenn jedoch die Verdichtung sehr schnell vor sich geht, dann sind die Wärmeverluste äußerst gering (Bild 86/1).
In der Technik wird die Erwärmung bei adiabatischen Zustandsänderungen bewußt angewendet. Bei der Kompression der Luft im Zylinder eines Dieselmotors tritt eine so hohe Kompressionstemperatur auf, daß der eingespritzte Dieselkraftstoff entzündet wird (Selbstentzündung).





86/2 p-V-Diagramm bei adiabatischer Kompression
schwarz: Isotherme



86/3 p-V-Diagramm bei adiabatischer Entspannung
rot: Adiabate

86/1 Beim pneumatischen Feuerzeug wird die Luftmenge sehr schnell komprimiert. Dabei entzündet sich ein mit Schwefelkohlenstoff getränkter Wattebausch

Diese Erwärmung ist auch bei Verdichtern und innerhalb des Ausbreitungsgebietes von Schallwellen festzustellen.

Bei adiabatischer Verdichtung steigt die Temperatur.

● *Wie verhindert man im Kompressor die adiabatische Erwärmung?*

Komprimiert man ein Gas adiabatisch, so nimmt das Produkt aus Druck und Volumen einen höheren Wert als bei isothermer Verdichtung an. Bei einer adiabatischen Entspannung wird der Wert des Produktes aus Druck und Volumen entsprechend kleiner (Bilder 86/2 und 86/3).

Bei adiabatischer Entspannung verringert sich die Temperatur.

Sie kennen alle die Methode des Stoppens beim Fußballspiel. Der Spieler weicht mit dem Fuß vor dem ankommenden Ball etwas zurück. Der Ball prallt mit wesentlich geringerer Geschwindigkeit zurück oder rollt dem Spieler fast auf den Fuß. Ganz ähnlich ist die Abkühlung bei adiabatischer Entspannung zu erklären: Die Gasmoleküle prallen von dem nach außen gehenden Kolben mit kleinerer Geschwindigkeit zurück. Dadurch verringert sich bei jedem Stoß gegen den Kolben ihre kinetische Energie und damit auch die Temperatur des Gases.

Beispiel

Vergleiche den Unterschied bei adiabatischer und isothermer Verdichtung

Gegeben: Wasserstoff $\varkappa = 1{,}4$ $\quad V_1 = 10\ \mathrm{dm^3}$

$T_1 = 300\ \mathrm{°K}\ (27\ \mathrm{°C})$ $\quad V_2 = 2\ \mathrm{dm^3}$

$p_1 = 1\ \mathrm{at}$

Adiab. Verdichtung		Isotherme Verdichtung	
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa}$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa}$	$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$	$T = const$
$p_2 = 9{,}5\ \mathrm{at}$	$T_2 = 571\ \mathrm{°K}$	$p_2 = 5{,}0\ \mathrm{at}$	$T = 300\ \mathrm{°K}$

87/1 Beim Föhn[1] treten die Merkmale der adiabatischen Zustandsänderung in Erscheinung. Infolge der Kondensation bei adiabat. Dehnung ist die Lufttemperatur nach dem Übersteigen des Gebirgszuges höher als vorher.

3.4. Anwendung des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre

Maschinen in denen die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie vorgenommen wird, heißen *Wärmekraftmaschinen*. Man kann sie unterteilen in

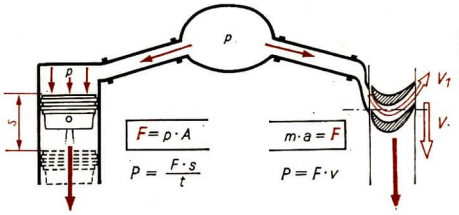
Kolbenmaschinen: Dampfmaschine, Gasmotor, Benzinmotor, Schwerölmotor.

Strömungsmaschinen: Dampfturbine, Gasturbine, Rakete.

[1] Föhn: warmer Fallwind, der auf der dem Winde abgewandten Seite der Gebirge plötzliche Wetterveränderungen und Tauwetter hervorruft

3.4.1. Allgemeines über Wärmekraftmaschinen

Die *Kolbenmaschinen* arbeiten nach folgendem Prinzip: Vor der Maschine hat das Arbeitsmittel eine potentielle Energie, die durch den Druck p gekennzeichnet wird. Dieser Druck wirkt auf die Fläche A eines beweglichen Kolbens. Das Arbeitsmittel übt dabei eine Kraft aus, die in der Maschine in Arbeit umgesetzt wird.
Um ein möglichst großes Arbeitsvermögen zu erhalten, müssen der Ausgangsdruck und das Temperaturgefälle groß gewählt werden. Das Arbeitsmittel entspannt sich dabei angenähert adiabatisch, und die Wärmeenergie verringert sich um die verrichtete Arbeit.



88/1 Prinzip der Kolbenmaschine und der Strömungsmaschine

Die *Strömungsmaschinen* arbeiten nach folgendem Prinzip: Das Arbeitsmittel tritt aus Düsen aus, in denen die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt wird. Dabei erhält das Gas eine große Geschwindigkeit. Durch Umlenkung an den Schaufeln, die eine Beschleunigung a der Dampfmasse m darstellt, wird die Energie des gespannten Dampfes durch die Umfangskraft F nutzbar gemacht. Das Turbinenlaufrad dreht sich mit der Geschwindigkeit v. Die Drehzahl richtet sich unter anderem nach der Dampfgeschwindigkeit, dem Durchmesser des Schaufelrades und der Form der Schaufeln. Die Turbine gibt die Arbeit unmittelbar in der günstigsten Form, in der Drehbewegung, ab.
Um ein möglichst großes Arbeitsvermögen zu erhalten, müssen die Strömungsgeschwindigkeit und die durchströmende Masse groß gewählt werden.

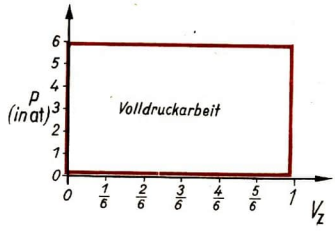
3.4.2. Arbeitsdiagramm der Kolbenkraftmaschine

Wir wollen nun an einigen Beispielen zeigen, wie mit grafischen Mitteln die von Maschinen verrichtete Arbeit dargestellt werden kann.
Arbeitsdiagramm der Volldruckmaschine. Bei den früher gebauten *Volldruckmaschinen* strömt der im Kessel erzeugte Dampf in den Dampfzylinder und treibt den Kolben mit vollem Druck bis in seine Endstellung. Die Dampfzufuhr erfolgt während der ganzen Dauer der Kolbenbewegung.

Beispiel

Der einströmende Dampf besitzt einen Druck von 6 at. Der vom Kolben zurückgelegte Weg, der Kolbenhub s, beträgt 0,6 m, die Kolbenfläche ist 500 cm² groß. Auf jedes Qua-

dratzentimeter wirkt der Dampf mit der Kraft von 6 kp. Die wirksam werdende Gesamtkraft beträgt mithin 3000 kp, und die bei einem Kolbenhub verrichtete Arbeit ist demnach gleich 1800 kpm (Bild 89/1).



89/1 Arbeitsdiagramm einer Volldampfmaschine (schematisch)
Der Druck sinkt erst beim Ausströmen des Dampfes bis auf den Außendruck ab.

Im Bild 89/1 sind diese Zusammenhänge als Druck-Volumen-Diagramm grafisch dargestellt. Die Dampfdruckkurve – hier eine Parallele zur Abszissenachse – sowie die Abszissenachse, die Anfangs- und die Endordinate begrenzen ein Rechteck. Es veranschaulicht das Produkt aus Druck und Volumen. Es ist

$$p \cdot V = \frac{F}{A} \cdot A \cdot s,$$

$$p \cdot V = F \cdot s.$$

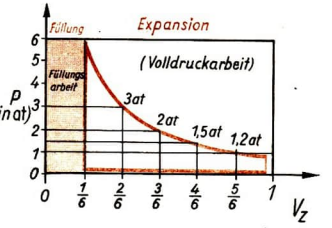
Es ist demzufolge möglich, aus der Fläche des Druck-Volumen-Diagramms durch Auszählen der Flächeneinheiten direkt auf das Arbeitsvermögen des Dampfes zu schließen.

Arbeitsdiagramm der Expansionsmaschine. Bei der Volldruckmaschine strömt der Dampf mit hohem Druck aus dem Zylinder. Die ihm innewohnende Energie wird infolgedessen zur Arbeitsverrichtung nicht voll ausgeschöpft. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Maschine nutzt man auch noch die *Expansion* des Dampfes aus.

Beispiel (Bild 89/2)

Soll der Druck des unter einem Kesseldruck von 6 at in den Zylinder einströmenden Frischdampfes unter der Annahme isothermer Zustandsänderung infolge der Expansion bis auf 1 at sinken, so muß die Füllung des Zylinders unterbrochen werden, wenn der Kolben $\frac{1}{6}$ seines Weges zurückgelegt hat. Der Dampf dehnt sich dann im Zylinder auf den sechsfachen Raum aus und drückt weiter gegen den Kolben. Dabei verwandelt sich seine Energie in nutzbare mechanische Arbeit.

Bild 89/2 zeigt das Druck-Volumen-Diagramm einer mit Expansion arbeitenden Maschine. Die Drucklinie verläuft bis zum ersten Sechstel des Zylinderraumes parallel zur Volumachse, dann fällt sie ab. Die vom Dampf im Dampfzylinder verrichtete Arbeit setzt sich zusammen aus der nichtnutzbaren Füllungsarbeit und der Expansionsarbeit. Sie entspricht der



89/2 Arbeitsdiagramm einer Expansionsmaschine

im Bild 89/2 rot umrandeten Fläche, die von der Druck-Volumen-Kurve, den Ordinaten ihres Anfangs- und Endpunktes und der Volumachse umschlossen wird. Die vom Dampf während der Füllung verrichtete Arbeit wird als Volldampfarbeit bezeichnet. Die nach Abschluß der Füllung vom Dampf verrichtete Arbeit bezeichnet man als Expansionsarbeit.

Beispiel

(Die Größe der verrichteten mechanischen Arbeit wird durch Auszählen ermittelt.)
In dem oben angegebenen Beispiel der Arbeitsweise einer Expansionsmaschine ist die Gesamtarbeit des Dampfes 837,6 kpm. Dagegen wäre die Volldruckarbeit des gleichen Zylinders bei Volldampffüllung 1800 kpm.
Das zeigt auch die Arbeitsfläche des Diagramms der Expansionsmaschine, die kleiner ist als bei einer Volldruckmaschine. Es fehlt der rechte obere Teil der Arbeitsfläche.
Die Expansionsmaschine arbeitet wirtschaftlicher als die Volldruckmaschine; denn sie benötigt zum Verrichten der angegebenen Arbeit nur 5 l Dampf, während die Volldruckmaschine 30 l Dampf verbraucht.

Expansionsmaschinen arbeiten wirtschaftlicher als Volldruckmaschinen.

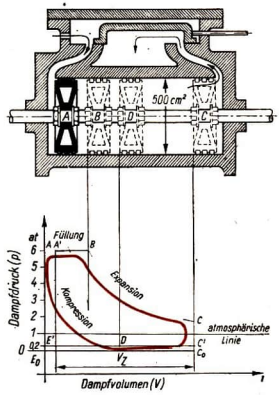
3.4.3. Die vier Takte der Expansionsmaschine

Bild 90/1 zeigt das Arbeitsdiagramm einer bis auf Kondensatordruck expandierenden Maschine.

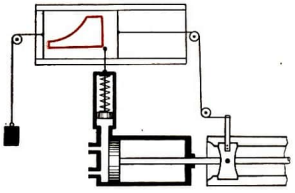
Nach der Füllung ($A'B$) expandiert der Dampf (BC) und entspannt sich am Schluß des Kolbenwegs plötzlich auf den Kondensatordruck von etwa 0,2 at (CC'). Soll die Maschine von neuem Arbeit verrichten, so muß der Kolben wieder an den Ausgangspunkt zurückkehren. Bei seinem Rückgang schiebt er den Dampf gegen den Kondensatordruck aus. Die dabei verrichtete Arbeit, dargestellt durch das Rechteck $C_0C'E'E_0$, wird in der Maschine selbst verbraucht.

Die Arbeit des Kolbens setzt infolge des vorhandenen schädlichen Raumes nicht an der Stelle A, sondern erst an der Stelle A' ein. Da die Verdichtungsarbeit[1] von der Maschine aufgebracht werden muß, wird die der Maschine entnehmbare Arbeit um

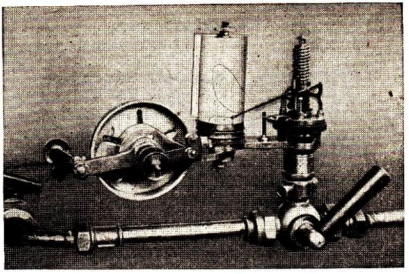
[1] durch sie wird ein ruhigerer Lauf der Maschine erreicht.



90/1 Arbeitsdiagramm einer Expansionsmaschine, bezogen auf den darüber abgebildeten Zylinder (schematisch)
Oben: Längsschnitt durch einen Dampfzylinder
Unten: Das dazugehörige Arbeitsdiagramm



91/1 Schnitt durch einen Indikator (schematisch) Der Indikatorzylinder steht mit dem Arbeitszylinder der Dampfmaschine in Verbindung. Unter seinem Kolben herrscht in jedem Augenblick der Druck des Dampfes wie im Dampfzylinder



91/2 Indikator, angeschlossen an den Dampfzylinder einer Kolbendampfmaschine. Die Trommel wird mittels Schnurübertragung durch den Kreuzkopf in Bewegung gesetzt.

die der Fläche $DE'AA'$ entsprechende Arbeit verringert. Jedoch ist dieser Verlust geringer als der durch Dampfersparnis erzielte Gewinn. Die aus der Maschine gewinnbare Arbeit entspricht nunmehr der von der Kurve $A'BCC'DA'$ umschlossenen Fläche.
Im Dampfzylinder folgen vier Takte aufeinander, deren Reihenfolge aus Bild 90/1 zu entnehmen ist. Man unterscheidet die *Füllung*, die *Expansion*, das *Ausschieben*, die *Verdichtung*. Die Fläche innerhalb der Kurve stellt die mechanische Arbeit dar, sie kann auf Millimeterpapier aufgetragen und ausgezählt werden.
Zur Aufzeichnung des Arbeitsdiagramms einer Dampfmaschine dient der *Indikator* (Bild 91/2). Seine Einrichtung zeigt Bild 91/1.
Bei einem Kolbenhin- und -rückgang entsteht ein geschlossener Linienzug auf dem Papier: Das *Indikatordiagramm*.

Der Flächeninhalt eines Indikatordiagramms ist ein Maß für die während eines Kolbenhin- und rückganges vom Dampf an eine Kolbenseite abgegebene Arbeit.

Aus dem Indikatordiagramm läßt sich, falls die Drehzahl bekannt ist, die Leistung der Maschine ermitteln. Man bezeichnet den gefundenen Wert als *indizierte Leistung*.
Für sehr schnell laufende Maschinen verwendet man elektrisch anzeigende Indikatoren.

Fragen und Aufgaben

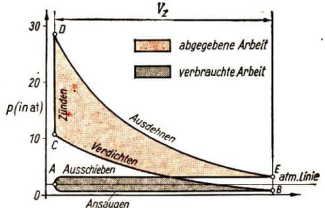
1. Schildern Sie die Wirkungsweise des Indikators und erklären Sie die Bedeutung des von ihm aufgezeichneten Arbeitsdiagramms!
2. Eine Dampfmaschine arbeitet mit einem Dampfdruck von 7 at. Der Kolbenhub beträgt 0,8 m. Zeichnen Sie auf Millimeterpapier das Arbeitsdiagramm
   2.1. einer Volldruckmaschine,
   2.2. einer Expansionsmaschine mit $\frac{1}{4}$- Füllung $\left(\frac{1}{5}\text{- Füllung}\right)$, konstruieren Sie die p-V-Kurve und ermitteln Sie die nach isothermer Entspannung gewonnene mechanische Arbeit!

3.4.4. Das Arbeitsdiagramm des Viertakt-Ottomotors

Bei der Dampfmaschine geht auf dem Wege vom Kessel zum Zylinder ein Teil der Energie des Dampfes für die Gewinnung nutzbarer Arbeit verloren. Demgegenüber wird bei den Verbrennungskraftmaschinen das hochkomprimierte Gas unmittelbar im Zylinder erzeugt.

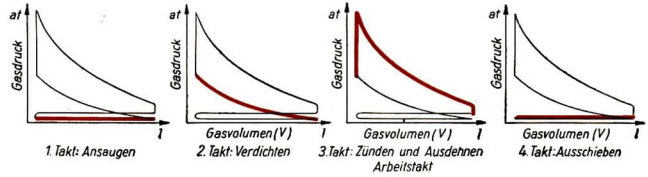
- *Welche Arten von Verbrennungskraftmaschinen kennen Sie? Wodurch unterscheiden sie sich?*

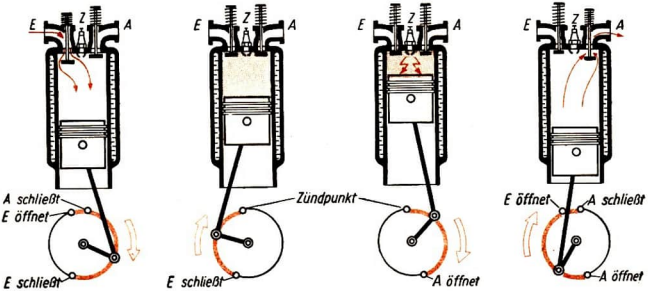
Bild 92/2 zeigt den Zusammenhang des Druck-Volumen-Diagramms mit der Stellung und der Bewegung des Kolbens eines Viertakt-Motors. Das zu einem vollständigen Arbeitsprozeß gehörige Arbeitsdiagramm stellt Bild 92/1 dar. Der Arbeits-



92/1 Arbeitsdiagramm eines Viertaktmotors

92/2 Die Takte des Viertaktmotors
E Einlaßventil, *A* Auspuffventil, *Z* Zündkerze
Oben: das zu jedem Takt gehörende Stück des Druck-Volumen-Diagramms
Unten: schematische Wiedergabe der Kolbenstellungen





prozeß gliedert sich in vier Takte: *Ansaugen, Verdichten, Zünden* und *Ausdehnen, Ausschieben.*

In einem Takt, nämlich im dritten, verrichtet die Maschine Arbeit. Die entwickelte Energie muß so groß sein, daß nicht nur die notwendige Nutzarbeit geliefert wird, sondern daß der Kolben auch während der drei übrigen Takte gegen die Reibungswiderstände bewegt und beim zweiten Takt außerdem das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet wird.

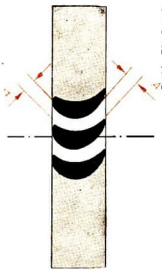
Um dieses Arbeitsdiagramm auszuwerten, muß ebenfalls die gesamte Fläche innerhalb der Kurve ausgezählt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß von der gesamten ermittelten Arbeit die für das Ausschieben und Ansaugen benötigte Arbeit zu subtrahieren ist.

3.5. Strömungsmaschinen

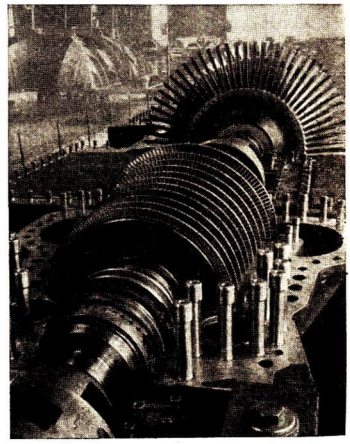
In den Turbinen wird die Strömungsenergie des Arbeitsmittels umgewandelt. Der Dampf- oder Gasstrahl wirkt in der *Gleichdruckturbine* durch seine Auftreffkraft auf die Laufradschaufeln. Bei der *Überdruckturbine* übt das Arbeitsmittel eine Rückstoßkraft aus, weil zwischen den Schaufeln eine Geschwindigkeitserhöhung eintritt.

3.5.1. Die Gleichdruck-Dampfturbine

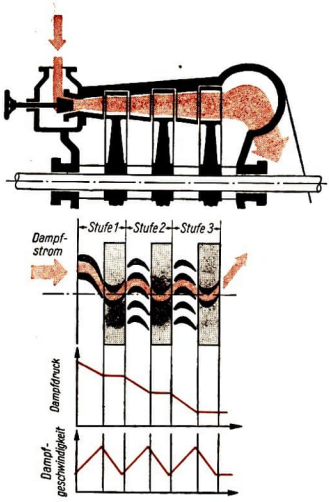
Bei Gleichdruckturbinen ist der Querschnitt zwischen den Laufradschaufeln an allen Stellen gleich groß (Bild 93/1), und damit bleibt infolge der relativ zu den Schaufeln gleichbleibenden Durchströmungsgeschwindigkeit auch der Druck zwischen den Schaufeln an allen Stellen gleich. Gegenüber dem Gehäuse der Turbine nimmt jedoch die Dampfgeschwindigkeit in jedem Rad ab. Das Druckgefälle des Arbeitsmittels wird in den Leiträdern dazu benutzt, um die ursprüngliche Strömungsgeschwindigkeit wiederherzustellen.



93/1 Querschnitt durch mehrere Schaufeln des Laufrades einer Gleichdruckturbine



93/2 Läufer einer Dampfturbine aus dem VEB Bergmann-Borsig



94/1 Gleichdruckturbine mit drei Druckstufen. Der Druck sinkt in den Leiträdern von Stufe zu Stufe, ist aber in jeder Stufe konstant. Die Geschwindigkeit nimmt in den Leiträdern zu und in den Laufrädern ab

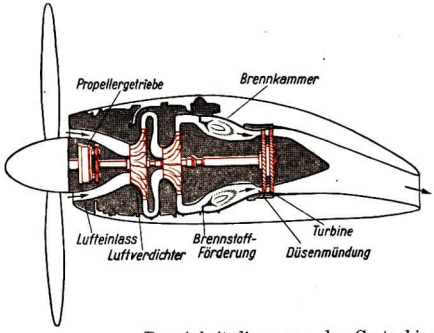
● *Wie setzen sich die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades und die Ausströmgeschwindigkeit des Arbeitsmittels zusammen?*

Würde das Druckgefälle des Arbeitsmittels in einer Stufe ausgenutzt, dann ergäben sich sehr hohe Drehzahlen für die Turbine. Durch stufenweises Ausnutzen der Strömungsgeschwindigkeit beziehungsweise des Druckgefälles wird die Drehzahl herabgesetzt. Der Druckraum der Turbine ist in Druckstufen unterteilt, die durch Scheidewände dampfdicht gegeneinander abgeschlossen sind. Durch die am Umfang des Gehäuses sitzenden Leitrad-Schaufelkränze gelangt der Dampf aus einer Druckkammer in die nächste, in der er die Schaufeln des folgenden Laufrades durchströmt. Leit- und Laufradkränze wechseln einander ab. Nachdem der Dampf praktisch seine gesamte kinetische Energie fast vollständig an die Laufräder abgegeben hat, strömt er mit geringer Geschwindigkeit in den Kondensator.

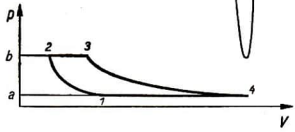
3.5.2. Die Gasturbine

Der Wirkungsgrad einer Kraftmaschine hängt in erster Linie von dem Temperaturgefälle $T_2 - T_1$ ab. Bei Dampfturbinen liegt die Eingangstemperatur heute bei etwa 800 °K. Das Temperaturgefälle beträgt etwa 500 grd. Weitaus größere Temperaturgefälle erzielt man bei Verwendung von brennbaren Gasen als Arbeitsmittel. Die Gasturbine kann heute bei Temperaturen bis zu etwa 1000 °K betrieben werden.
Gasturbinen arbeiten nach folgendem Prinzip:
Der Treibstoff wird in die Brennkammer gespritzt und dort verbrannt. Die Verbrennungsgase strömen infolge adiabatischer Dehnung mit großer Geschwindigkeit gegen die Schaufeln der Laufräder und versetzen sie in Drehung. Auf der Turbinenachse ist mit der Gasturbine ein *Turbokompressor* gekoppelt, der die für die Brennkammer benötigte Frischluft ansaugt und komprimiert. Die Abgase der Turbine wärmen dabei die komprimierte Frischluft vor, so daß die Verbrennungswärme des Treibstoffes besser ausgenutzt wird (Bild 95/3).

95/1 Gasturbinen-Propellertriebwerk (Turboprop)

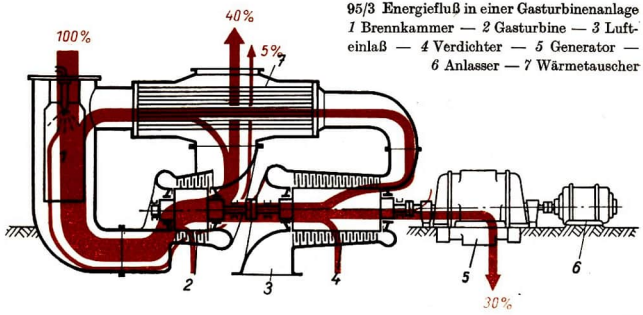


95/2 Arbeitsdiagramm einer Gasturbine



Das Arbeitsdiagramm der Gasturbine (Bild 95/2) zeigt im wesentlichen die gleichen Vorgänge, wie sie sich bei allen anderen Wärmekraftmaschinen abspielen. Die im Verdichter aufzuwendende Arbeit entspricht der Fläche *1–a–b–2* bei adiabatischer Verdichtung. Danach wird dem Gas Wärme bei annähernd gleichbleibendem Druck (offene Brennkammer) zugeführt (Isobare *2–3*). Danach erfolgt adiabatische Entspannung in der Turbine *3–4*. Die von der Turbine verrichtete Arbeit ergibt sich aus der Fläche *3–4–a–b–3*.

Anwendung der Gasturbine im Gasturbinenkraftwerk. Seit dem 18. Mai 1962 arbeitet am Stadtrand von Erfurt das erste Gasturbinenkraftwerk der Deutschen Demokratischen Republik mit einer Leistung von 25 MW, ein weiteres befindet sich bei Meiningen im Bau. Als Brennstoff wird Teeröl, ein Abfallprodukt aus Böhlen, ver-



95/3 Energiefluß in einer Gasturbinenanlage *1* Brennkammer — *2* Gasturbine — *3* Lufteinlaß — *4* Verdichter — *5* Generator — *6* Anlasser — *7* Wärmetauscher

wendet. Die Turbinen können innerhalb von 20 min vom Stillstand auf Vollastdrehzahl gebracht werden. Bei den Kohle-Wärmekraftwerken sind dazu fast 24 Stunden erforderlich. Daher eignet sich das Gasturbinenkraftwerk ganz ausgezeichnet als Spitzenbelastungskraftwerk.

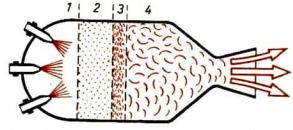
● *Untersuchen Sie die grundsätzlichen Unterschiede zwischen einem Gasturbinenkraftwerk und einem Kohle-Wärmekraftwerk*

	Gasturbinenkraftwerk	Kohle-Wärmekraftwerk
1. Transportprobleme	Teeröl	Kohle
2. Heizwert	Teeröl	Kohle
3. Wirkungsgrad	Gasturbine	Kessel-Dampfturbine
4. Leistungsgrenze	Gasturbine	Kessel-Dampfturbine
5. Produktion des Energieträgers	Teeröl	Kohle
6. Energieumwandlungen in der	Gasturbine	im Kohle-Wärmekraftwerk
7. Wasserbedarf	—	Kesselspeisewasser, Kühlwasser
8. Arbeitskräfteeinsatz	1 Arbeitskraft auf 3 MW Leistung	1 Arbeitskraft auf 1 MW Leistung
9. Luftverunreinigung	Verbrennungsgase	Flugasche, Rauch, Ruß

3.5.3. Das Raketentriebwerk

Eine Besonderheit unter den Wärmekraftmaschinen stellt das Raketentriebwerk dar. Hier erzielt die Beschleunigung einer Gasmasse eine Kraftwirkung, die zwischen dem Triebwerk und dem ausgestoßenen Gasstrahl wirksam ist. Solche Triebwerke werden als Strahltriebwerke bezeichnet.

In einer Brennkammer wird der kontinuierlich gegen den Brennkammerdruck eingespritzte Treibstoff zur Verbrennung gebracht. Der gesamte Prozeß verläuft etwa in vier Stufen: *Zerstäuben (1), Verdampfung (2), Flammenfront (3), Verbrennung (4).* Das Umsetzen der Wärmeenergie in kinetische Energie des Gasstrahles erfolgt adiabatisch. Die wirksame Kraft wird in der Raketentechnik als Schub bezeichnet. Die Art des verwendeten Treibstoffes (Feststoffrakete mit festen Treibstoffen, Flüssigkeitsrakete mit flüssigen Treibstoffen) spielt für den thermischen Prozeß eine untergeordnete Rolle.



96/1 Raketentriebwerk

Da während der Entspannung im Gasstrahl kaum ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, kann die Ausströmgeschwindigkeit nach folgender Formel berechnet werden (adiabatische Entspannung):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \varkappa}{\varkappa - 1} \cdot \frac{R \cdot T}{M} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\varkappa - 1}{\varkappa}}\right]}$$

T: Temperatur in der Brennkammer

$\varkappa$: Verhältnis der spezifischen Wärmen des Brenngases

p_1: Druck an der Düsenmündung

p_0: Druck in der Brennkammer

Der Wirkungsgrad des Raketentriebwerks ist abhängig vom Brennkammerdruck und dem Außendruck. Der Brennkammerdruck wiederum ergibt optimale Leistungen bei bestimmter Form der Ausströmdüse. Für alle diese Faktoren sind umfangreiche Berechnungen und Versuche notwendig, die nur in Versuchslaboratorien ausgeführt werden können, die mit der notwendigen technisch-mathematischen Ausrüstung und umfangreichen Sicherheitsanlagen ausgestattet sind.

Ein Beispiel für den Vorzug sozialistischer Gemeinschaftsarbeit gegenüber dem Konkurrenzkampf im kapitalistischen Staat bietet die sowjetische Raketentechnik. Die sowjetischen Raketen mit ihren Steuerungs- und Nachrichteneinrichtungen stellen den Höchststand auf diesem Gebiet der Technik dar, ganz gleich ob es sich um die Trägerraketen der Weltraumschiffe und Weltraumsonden oder um die interkontinentalen ballistischen Raketen handelt.

3.6. Der Wirkungsgrad

Bei der Behandlung der Zustandsgleichung eines Gases haben wir erfahren:

1. In einer Wärmekraftmaschine wird stets Wärmeenergie in mechanische Arbeit umgewandelt.
2. In einer Wärmekraftmaschine wird einem Gas Wärme zugeführt. Die zugeführte Wärme verwandelt sich in nutzbare mechanische Arbeit.

3.6.1. Der thermische Wirkungsgrad

Wenn das Arbeitsmittel (Gas, Dampf) die Maschine verläßt, besitzt es noch eine bestimmte Wärmeenergie, mit der es gegenüber dem äußeren Luftdruck aus dem Arbeitsraum ausströmt. Demzufolge kann die im Brennstoff zugeführte Wärmeenergie nicht voll ausgenutzt werden. Das Verhältnis der einer Kraftmaschine (einschließlich der Kesselanlage) zugeführten Energie W_1 und abgeführter Nutzarbeit W bezeichnet man als den **thermischen Wirkungsgrad.**

$$\text{thermischer Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Energieaufwand}} \qquad \eta_{th} = \frac{W}{W_1} \tag{17.1}$$

Wird nun der Maschine die Wärme W_1 zugeführt, so soll diese möglichst vollständig in mechanische Energie W umgewandelt werden.

Nach Arbeitsverrichtung des Gases hat dieses aber immer noch die Restwärme W_2.

Diese wird benötigt, damit das Gas gegen den Atmosphärendruck genügend schnell ausgestoßen werden kann. Die Restwärme W_2 kann in der Wärmekraftmaschine selbst nicht mehr ausgenutzt werden.
Wir erhalten demnach

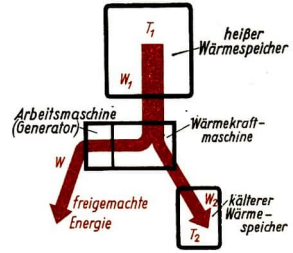
$$W = W_1 - W_2.$$

Daraus folgt

$$\eta_{th} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \qquad (17.2)$$

Da die Wärme W der Temperatur T proportional ist, kann man schreiben:

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (17.3)$$



Wenn es also gelingt, das Gas möglichst hoch zu erwärmen und nach der Arbeitsverrichtung bei sehr tiefen Temperaturen ausströmen zu lassen, dann würde der thermische Wirkungsgrad sehr günstig werden.
Der thermische Wirkungsgrad ist physikalisch bedingt der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad.

Beispiel

Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad einer Dampfmaschine. Die Dampfeintrittstemperatur t_1 beträgt 180 °C, und im Kondensator herrscht eine Temperatur t_2 von 20 °C.

Gegeben:
$T_1 = 453$ °K
$T_2 = 293$ °K

Gesucht:
η_{th}

Lösung:

$$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

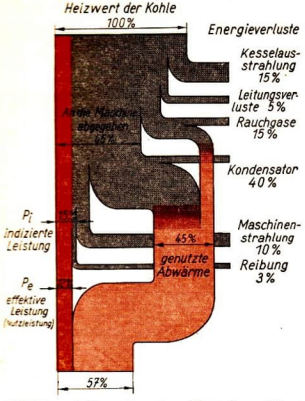
$$\eta_{th} = \frac{453\ °K - 293\ °K}{453\ °K}$$

$$\underline{\underline{\eta_{th} = 0{,}35}}$$

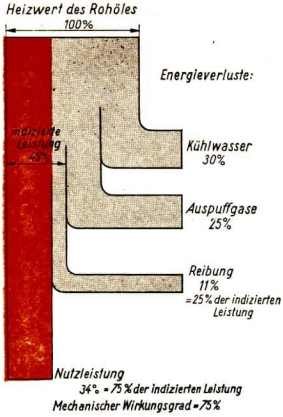
Der theoretisch erreichbare, der thermische Wirkungsgrad dieser Dampfmaschine ist 0,35.

3.6.2. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad

Als in England im Kohlenbergbau die ersten Dampfpumpen eingesetzt wurden, klagten die Bergwerksbesitzer immer wieder darüber, daß zum Betrieb der Pumpen mehr Kohle nötig wäre, als durch die Entwässerung der Gruben mehr abgebaut werden könne. Unter solchen Bedingungen war der Betrieb der Dampfpumpen nicht wirtschaftlich.
Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmekraftanlage wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Aus dem Diagramm Bild 99/1 entnehmen wir, daß einer Kolben-



99/1 Energiediagramm einer Dampfmaschinenanlage



99/2 Energiediagramm eines Dieselmotors

dampfmaschine etwa 65% der im Brennstoff enthaltenen Wärmeenergie in Form von Dampf zugeführt werden kann. Diese zugeführte Wärmeenergie soweit wie möglich zu nutzen, ist eine außerordentlich wichtige technische Aufgabe; denn die uns zur Verfügung stehenden Brennstoffmengen sind nicht unerschöpflich.

Das Verhältnis der ausgenutzten Wärmeenergie W_N zu der in die Anlage gelangenden Wärmeenergie W_M bezeichnet man als den **wirtschaftlichen Wirkungsgrad.**

$$\eta_w = \frac{W_N}{W_M} \tag{18}$$

Eine Erhöhung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades erreicht man durch Ausnutzung der Wärmeenergie, die im Abdampf die Maschine verläßt. Meist wird der Abdampf zu Heizzwecken verwendet. Auf diese Art kann der wirtschaftliche Wirkungsgrad einer Wärmekraftanlage auf 0,8 bis 0,9 gesteigert werden.

● *Warum kann der wirtschaftliche Wirkungsgrad nie den Wert 1 erreichen?*

Der Energieverbleib beim Arbeitsprozeß in einer Wärmekraftmaschine läßt sich durch ein *Streifendiagramm* veranschaulichen.

Bei den Verbrennungskraftmaschinen fallen die Verluste fort, die in der Dampfmaschine schon bei der Dampferzeugung auftreten. Bild 99/2 zeigt, daß bei einem Dieselmotor bis zu 34% der aufgewendeten Wärmeenergie als mechanische Arbeit gewonnen werden können.

Die Steigerung des Wirkungsgrades ist durch die Eigenart der Konstruktion jeder einzelnen Maschine begrenzt. Unseren Wissenschaftlern und Ingenieuren erwächst daraus die Aufgabe, die Wirtschaftlichkeit unserer Energieanlagen zu erhöhen, damit aus weniger Brennstoff ein größerer Energiebetrag zur Verfügung gestellt werden kann. In den Betrieben des Kraftmaschinenbaus der Deutschen Demokratischen Republik wird mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln an der Lösung der Aufgabe gearbeitet. Obwohl dieser Zweig des Maschinenbaus noch verhältnismäßig jung ist, Turbinen werden erst seit etwa 1950 bei uns gebaut, sind bereits beachtenswerte Leistungen erreicht worden. Im VEB Bergmann-Borsig werden Turbinen von 50 MW und 100 MW Leistung gebaut, während der VEB Energiebau Radebeul komplette Gasturbinenkraftwerke liefert.

Fragen und Aufgaben:

1. Welche Möglichkeiten sind vorhanden, um den thermischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine zu steigern?
2. Was gibt das Indikatordiagramm einer Kraftmaschine an? Mit welchen Energieverlusten ist bei jeder Kraftmaschine zu rechnen?
3. Aus welchen Faktoren setzt sich der wirtschaftliche Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine zusammen?
4. Welche Möglichkeiten gibt es zur Erhöhung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades einer Wärmekraftmaschine?
5. Durch welche Gleichung wird die für den Dauerbetrieb nutzbare Energie wiedergegeben?

3.7. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

Der Inhalt des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre lautet etwa folgendermaßen: „Alle mechanischen, elektrischen sowie magnetischen Vorgänge sind umkehrbar, solange dabei keine Wärmeenergie frei wird." Um diese Gesetzmäßigkeit zu erfassen, sind umfangreiche und grundlegende Beobachtungen der Naturerscheinungen erforderlich.

3.7.1. Umkehrbare Vorgänge

Als Beispiel eines umkehrbaren Vorganges sei ein in Schwingung versetztes Pendel angeführt. Dabei wird in periodischer Folge stets der Ausgangszustand des Pendels wiederhergestellt (vorausgesetzt, daß es reibungslos schwingt). Fällt eine Stahlkugel auf eine Stahlplatte, so kann die Ausgangslage dadurch wiederhergestellt werden, daß die Kugel nach dem Aufprall keine dauernde Verformung hinterläßt. Die Stahlplatte ist nur als zeitweiliger Speicher der potentiellen Energie anzusehen. Dadurch wird die Kugel die Ausgangslage wieder annähernd erreichen. Der Vorgang läuft sodann in umgekehrter Richtung ab. Die Stahlplatte beschleunigt die Stahlkugel.

Die Ausgangslage wird unter der Voraussetzung erreicht, daß dabei keinerlei mechanische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. So ist auch die Bewegung der Sputniks und Weltraumschiffe auf ihren Bahnen ein umkehrbarer Vorgang. Es wird tatsächlich nach einem vollen Umlauf um die Erde der alte Ausgangsort wieder erreicht. Auch hier muß vorausgesetzt werden, daß keinerlei Reibung an Gasmolekülen oder Gasatomen eintreten darf.
Diese Beispiele umkehrbarer oder reversibler Vorgänge lassen sich noch erweitern. Alle reversiblen Vorgänge haben bestimmte Merkmale:

1. Reversible Vorgänge lassen sich rückgängig machen durch Umkehr ihres Weges (nötigenfalls über Hilfsmittel).
2. Die Wiederherstellung des Ausgangszustandes erfordert keine zusätzliche Energie.
3. Bei reversiblen Vorgängen dürfen bei keinem der beteiligten Körper Zustandsänderungen eintreten.

Bei diesen Beispielen handelt es sich um idealisierte Grenzfälle. In der Praxis treten sie nie auf; wir können uns dem Idealzustand nur bis zu einem bestimmten Grade nähern. In den meisten Fällen wird Wärmeenergie frei, und eine geeignete Hilfsenergie stellt über Energieumwandlung den Ausgangszustand wieder her.

3.7.2. Nichtumkehrbare Vorgänge

Fällt eine Bleikugel aus großer Höhe auf eine Stahlplatte, so wird die gesamte kinetische Energie in Wärmeenergie umgeformt. Wenn eine Stahlkugel aus großer Höhe in losen Sand fällt, dann wird ebenfalls die gesamte mechanische Energie nach der bleibenden Verformung des Sandes zum Teil in Wärmeenergie umgesetzt, und zum anderen Teil werden die Sandteilchen verdrängt und unter Energieaufwand an der Wandung der Kugel hochgedrückt. Dieser Vorgang ist nicht mehr umkehrbar. Niemals wird die entstandene Wärmeenergie die Stahlkugel wieder in ihre Ausgangslage zurückbefördern. Wollte man das Arbeitsvermögen der Kugel verwerten, so könnte man damit das Räderwerk einer Uhr betreiben und somit die mechanische Energie zum größten Teil in Reibungswärme umwandeln. Auch in diesem Falle ist das Räderwerk der Uhr nicht in der Lage, das Massestück wieder in die Ausgangslage zu bringen. Dieser Vorgang ist also ebenfalls nicht umkehrbar, er ist irreversibel.
Als Joule seine Versuche zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents machte, setzte er durch eine abwärts strebende Masse ein Rührwerk in Tätigkeit. Dabei wurde mechanische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Es ist nicht möglich, daß dieser Vorgang umgekehrt abläuft. Nie wird das Rührwerk durch Abkühlung im Kalorimeter das Massestück wieder hochziehen. Als Gay-Lussac innerhalb eines Kalorimeters Gas aus einer Stahlflasche unter hohem Druck in eine Stahlflasche mit geringerem Druck strömen ließ, erkannte er, daß sich an der inneren Energie des Gases nichts geändert hatte. Das System war in sich abgeschlossen. Nach unseren bisherigen Kenntnissen kann das Gas nur aus einer Flasche höheren Drucks in die Flasche niederen Drucks strömen. Ist ein Druckausgleich erfolgt, kommt der Vorgang zum Abklingen. Die mittlere kinetische Energie aller Gasmoleküle ist in beiden

Flaschen gleich groß, demnach ist auch die Temperatur ausgeglichen. Niemals würden die Moleküle wieder in ihre Flasche zurückströmen.
Treten Temperaturunterschiede zwischen Körpern auf, so gleichen sie sich stets aus. Aber immer wird der wärmere Körper seinen Wärmeenergieüberschuß dem kälteren mitteilen, bis ein Gleichgewichtszustand hergestellt ist, der sich in einem gleichen wärmeenergetischen Zustand beider Körper äußert. Ein anderes Beispiel für irreversible Vorgänge ist der ausströmende Dampf aus einer Turbine. Nie zeigt der Dampf das Bestreben, nach seinem Austritt aus dem Zylinder in denselben zurückzukehren, wie auch niemals aus einer Parfümflasche entweichender Duftstoff aus dem Raum in die Flasche zurückkehren würde.

3.7.3. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

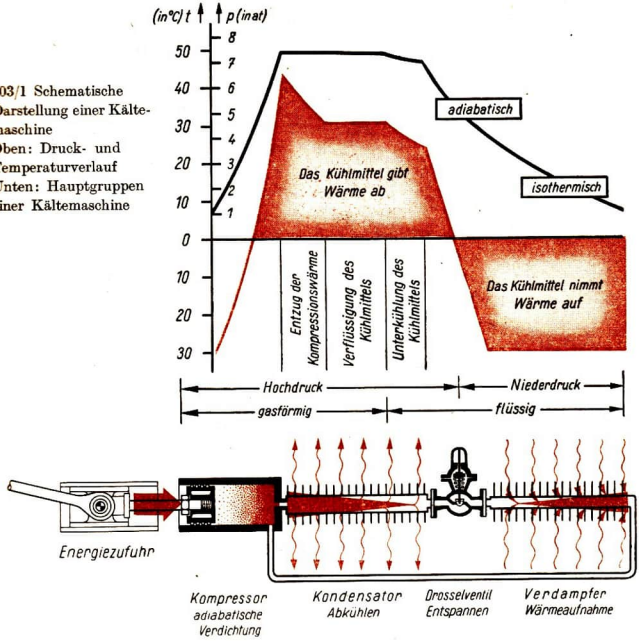
Der erste Hauptsatz der Wärmelehre gibt über die Erhaltung der Energie bei Naturvorgängen Auskunft, er sagt jedoch nichts über die Richtung aus, in der die Vorgänge verlaufen.
Die Tatsache, daß alle Vorgänge, bei denen ein Teil der Energie in Wärme übergeht oder bei denen auf andere Weise ein Temperaturausgleich innerhalb des betrachteten Systems eintritt, nicht umkehrbar sind, führt zum **zweiten Hauptsatz der Wärmelehre:**

1. Wärme geht niemals von selbst ohne zusätzlichen Energieaufwand von einem kälteren zu einem wärmeren Körper über.
2. Zwischen Körpern von gleicher Temperatur entstehen niemals Temperaturunterschiede, ohne daß dauernde Veränderungen in der Umgebung hervorgerufen werden.

Wenn die im zweiten Hauptsatz als unmöglich gekennzeichneten Vorgänge doch ablaufen könnten, wäre es möglich, eine Maschine zu bauen, die nur durch Abkühlung eines Wärmebehälters Arbeit verrichtet. Es müßte dann beispielsweise möglich sein, eine Schiffsmaschine zu konstruieren, die, ohne eine andere Energiequelle auszunutzen, nur dadurch nutzbare Arbeit verrichtet, daß sie dem Meerwasser dauernd Wärme entzieht. Bei ortsfesten Maschinen würde an Stelle des Meerwassers der Erdboden oder die Luft treten. Eine solche Maschine würde bei den unerschöpflich in der Natur verfügbaren Wärmemengen praktisch dieselbe Bedeutung haben wie ein Perpetuum mobile. Man hat ihr daher den Namen *Perpetuum mobile zweiter Art* gegeben zum Unterschied zu dem auf Seite 82 erwähnten Perpetuum mobile erster Art. Eine solche Maschine zu konstruieren hat sich aber als eine Unmöglichkeit erwiesen.

3.7.4. Die Kältemaschine

Im Abschnitt über die Wärmekraftmaschinen wurden stets Beispiele untersucht, in denen einem System Wärme zugeführt wurde, um mechanische Energie zu gewinnen.

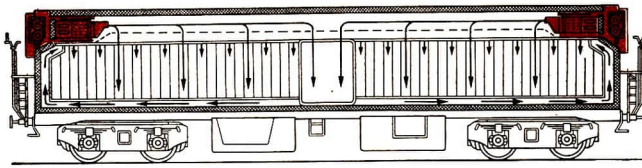


103/1 Schematische Darstellung einer Kältemaschine
Oben: Druck- und Temperaturverlauf
Unten: Hauptgruppen einer Kältemaschine

Eine ebenso bedeutungsvolle Aufgabe wie die genannten Maschinen haben heute die Kälteanlagen in der Wirtschaft und in der Technik.

Der Aufbau solch einer Kältemaschine ist aus dem Bild 103/1 zu ersehen. Die meisten Kälteverfahren beruhen darauf, daß eine Flüssigkeit unter Wärmeaufnahme aus der Umgebung verdampft. Die dabei aufgenommene Wärme wird dem Kühlgut entzogen.

In einem Kompressor wird das gasförmige Kältemittel adiabatisch verdichtet, wobei die Temperatur stark ansteigt. In dem daran angeschlossenen Kühlsystem wird das unter hohem Druck stehende Kältemittel abgekühlt, indem ihm durch Kühlwasser oder Kühlluft die Kompressionswärme entzogen wird. Dabei verflüssigt sich das Kältemittel. Beim Durchgang durch das Drosselventil entspannt sich das Kältemittel adiabatisch, und die Temperatur sinkt nochmals. Im Verdampfer findet eine iso-



104/1 Kälteanlage eines Kühlzuges aus dem VEB Waggonbau Dessau

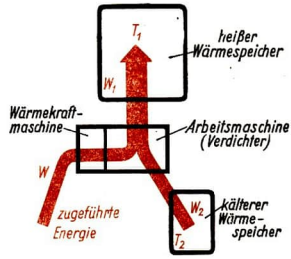
thermische Zustandsänderung statt. Durch Wärmeaufnahme aus der Umgebung wird das Kältemittel wieder verdampft. Damit ist der Kreislauf in der Kältemaschine geschlossen.

Die Kältemaschinen werden eingesetzt zum

Kühlen von Gasen (Klimaanlagen, Kühlhäuser),

Kühlen von Flüssigkeiten (Molkerei, Brauerei), Eiserzeugen,

Stofftrennen (Öl und Paraffin, Fruchtsäfte, Gefriertrocknen von Fleisch und Gemüse, Sauerstoffgewinnung).



Fragen und Aufgaben

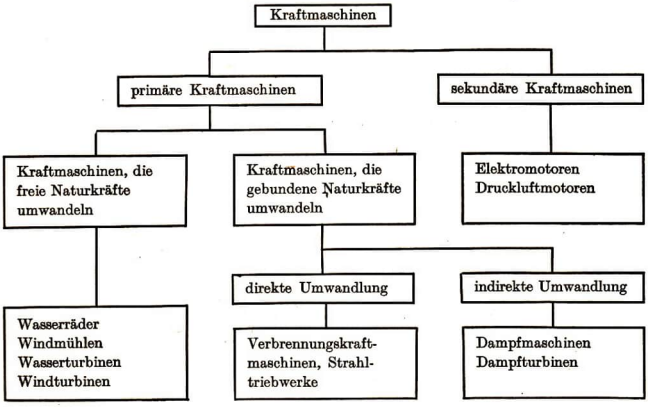
1. Betrachten Sie folgenden Energielauf:
   Wärmestrahlung der Sonne — Aufbau organischer Substanz — Kohlebildung durch Druck und Wärme — Wärmekraftwerke — Entstehung von Dampf — Turbine — Generator erzeugt elektrischen Strom — Transformator wandelt die Spannungen — im Haushalt wird ein elektrischer Heizofen eingeschaltet. Wärmestrahlung und Wärmeleitung des Heizofens.
2. Sprechen Sie über die Energieumwandlungen und entwickeln Sie an diesem Beispiel die Prozesse: reversibel und irreversibel!
   Betrachten Sie auch einzelne Stufen zwischen den Energieumwandlungen!
   Gehen Sie auch ein auf den Wirkungsgrad bei den Energieumwandlungen!
3. Wie wird erreicht, daß die Energie mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad ausgenutzt wird?
4. Welche Vorstellungen haben Sie von dem Bestreben der Menschen, den Wirkungsgrad der Anlagen zu erhöhen?
5. Welche Energieumwandlungen werden sich in der Zukunft immer stärker durchsetzen?
6. Erklären Sie den Begriff umkehrbarer Vorgang und nennen Sie Beispiele für annähernd umkehrbare Vorgänge!
7. Erläutern Sie den Begriff nichtumkehrbarer Vorgang und geben Sie Beispiele für solche Vorgänge!
8. Stellen Sie den Inhalt des zweiten Hauptsatzes dem Inhalt des ersten Hauptsatzes gegenüber!

3.8. Die Entwicklung des Kraftmaschinenbaus

Die Produktion materieller Güter (z. B. Wohnungen, Nahrungsmittel, Kleidung, Maschinen) ist die Grundlage für das Leben und die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft. Zum Durchführen der Produktion sind in allen Gesellschaftsordnungen neben den Menschen mit ihren geistigen und physischen Kräften auch Werkzeuge und Maschinen, Rohstoffe, Materialien und Gebäude, erforderlich. Der Mensch entwickelte im Verlaufe der Geschichte immer mehr und bessere Werkzeuge und Arbeits- und Kraftmaschinen.
Welch ein gewaltiger Unterschied besteht zwischen dem Wasserrad des Mittelalters und einer modernen Gasturbine!

● *Nennen Sie Werkzeuge aus der Urgesellschaft und der Sklavenhalterordnung!*

Werkzeuge und Maschinen können nur in einer bestimmten Reihenfolge entwickelt werden, so wie die Geschicklichkeit und die Produktionserfahrungen der Menschen sowie die Bedürfnisse der materiellen Produktion wachsen. Es ist verständlich, daß nicht sofort nach der Erfindung des Wasserrades eine Gasturbine gebaut werden konnte. Neue Erfindungen entstehen auf der Grundlage bereits vorhandener technischer Erfahrungen und wissenschaftlicher Erkenntnisse.
Im Verlaufe der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft machte sich das geringe Arbeitsvermögen der menschlichen und tierischen Arbeitskraft hemmend bemerkbar. Für die Erweiterung der Produktion benötigte man Kraftmaschinen, die den steigenden Anforderungen besser gerecht werden konnten.
Nach der Art der Kraftquelle teilt man die Kraftmaschinen wie folgt ein:



Diese Kraftmaschinen formen natürliche Energie in technisch verwertbare Energie um. Sie dienen zum Antrieb der Arbeitsmaschinen, mit denen der Produktionsprozeß durchgeführt wird.

- *Nennen Sie Beispiele für Arbeitsmaschinen aus der industriellen und aus der landwirtschaftlichen Produktion!*

Bis zum Mittelalter wurden im wesentlichen nur die Muskelkraft von Menschen und von Tieren ausgenutzt, wenn auch Wasserräder und Windmühlen in manchen Ländern schon bekannt waren.

Im Mittelalter reichte die menschliche Muskelkraft und die Kraft der Tiere nicht mehr für die Produktion aus. Unter den damaligen technischen Möglichkeiten wurden in immer größerem Umfang die Energie des Windes und des strömenden Wassers ausgenutzt. Windmühlen und Wasserräder ermöglichten den Betrieb von Getreide- und Sägemühlen, von Pochwerken zur Erzzerkleinerung, von Hammerwerken und vieler anderer Anlagen. Auch die ersten Textilfabriken in England wurden im 18. Jahrhundert noch an Flußläufen errichtet, deren Energie zum Antrieb der Arbeitsmaschinen ausgenutzt wurde.

- *Suchen Sie in der Umgebung Ihres Heimatortes Zeugen dieser alten Technik!*

Als im Jahre 1784 James Watt seine Dampfmaschine baute, konnte er sich auf die Erfahrungen stützen, die zum Teil schon im Altertum gemacht worden waren. Denis Papin führte zum Beispiel 1690 ein Experiment vor, wonach in einem Zylinder durch Wasserdampf ein Kolben bewegt wurde. Durch das Abkühlen des Zylinders wurde der Dampf kondensiert und somit ein Unterdruck erzeugt. Der Kolben kehrte mit Hilfe des Luftdrucks wieder in seine Ausgangslage zurück. 1711 wandte Newcomen dieses Prinzip in seiner atmosphärischen Dampfmaschine an. Die Kondensation wurde durch in den Zylinder eingespritztes Kühlwasser beschleunigt.

In Rußland baute 1763 Polsunow ebenfalls eine Dampfmaschine, deren Entwicklung unter den gesellschaftlichen Bedingungen des Zarenreiches nicht fortgesetzt wurde.

Die englische Bourgeoisie dagegen hatte großes Interesse an der Entwicklung der Kraftmaschinen. Die Förderung in den Bergwerken mit Pferdekraft war nicht beliebig steigerungsfähig. Hier bot der Einsatz der Dampfmaschine offensichtliche Vorteile. James Watt beseitigte bis 1784 die Mängel der Dampfmaschine von Newcomen, die sehr langsam lief und unwirtschaftlich arbeitete. Er verlegte die Dampfkondensation aus dem Zylinder heraus in einen besonderen Kondensator und ließ den Dampfdruck von beiden Seiten auf den Kolben wirken. Das ermöglichte eine kontinuierliche Kondensation und ersparte das ständige Erwärmen und Abkühlen des Arbeitszylinders. Diese Dampfmaschine wurde bald in allen Ländern eingeführt und war eine wesentliche Voraussetzung für das Entstehen großer kapitalistischer Fabriken. Es entstand der Maschinenbau, die Hüttenindustrie entwickelte sich und damit auch der Steinkohlenbergbau.

- *Stellen Sie die Zusammenhänge zwischen den genannten Industrien dar!*

Mit der gewaltigen Steigerung der industriellen Produktion mußten auch die Verkehrsmittel entwickelt werden.

1807 wurde in den Vereinigten Staaten von Nordamerika das erste Dampfschiff gebaut, und 1825 wurde in England die erste Eisenbahn in öffentlichen Betrieb genommen (1814 fuhr die erste Eisenbahn).
Die Kolbendampfmaschine war im 18. und 19. Jahrhundert die vorherrschende Wärmekraftmaschine. Erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts waren die Werkstofftechnik und die thermodynamischen Forschungen so weit, daß erfolgreiche Versuche mit anderen Wärmekraftmaschinen vorgenommen und sie in die Praxis eingeführt werden konnten. Von CARNOT wurde nachgewiesen, wie die thermischen Vorgänge in einer idealen Wärmekraftmaschine ablaufen müssen, wenn ein höchstmöglicher Nutzen erzielt werden soll.

● *Überlegen Sie, an welchen Stellen der ersten Wärmekraftmaschinen Verbesserungen vorgenommen werden konnten!*

CLAUSIUS, MAXWELL und BOLTZMANN entwickelten die kinetische Gastheorie. Auf der Grundlage dieser theoretischen Voraussetzungen und wertvoller Arbeiten vieler Ingenieure wurden Verbrennungsmotoren, Dampfturbinen und Gasturbinen geschaffen. 1859 baute LENOIR den Gasmotor, 1878 entwickelten OTTO und LANGEN den *Ottomotor*, und DIESEL schuf 1893 den *Dieselmotor*.

● *Erklären Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen Ottomotor und Dieselmotor!*

In den Jahren 1883/84 gelang es dem Schweden DE LAVAL, eine leistungsfähige *Dampfturbine* zu entwickeln. Der Dampfturbinenbau wirkte besonders auf die Elektrifizierung ein, und auch heute noch hat die Dampfturbine in den Wärmegroßkraftwerken eine beherrschende Stellung.
Bisher nicht aufgetretene Schwierigkeiten (besonders wegen der hohen Temperaturen), die jahrzehntelang nicht überbrückt wurden, brachten die Versuche zum Bau einer *Gasturbine* mit sich. Erst durch die wachsenden Erkenntnisse beim Bau der anderen Wärmekraftmaschinen, beim Herstellen warmfester Werkstoffe und beim Erforschen der wissenschaftlichen Grundlagen wurden die technischen Voraussetzungen für den Bau der ersten einsatzfähigen Gasturbine durch den deutschen Ingenieur Dr. HOLZWARTH im Jahre 1909 geschaffen. In die Zeit der weiteren Entwicklung der Gasturbine fallen etwa 25 Jahre, während der ein großer Teil der Menschheit in den hochindustrialisierten Staaten von ihren herrschenden Klassen gezwungen wurde, zwei Weltkriege vorzubereiten, durchzuführen und anschließend die Kriegsfolgen zu überwinden und zu beseitigen. So ist zwar verständlich, aber keinesfalls von der menschlichen Gesellschaft zu billigen, daß die technische Entwicklung, in unserem Beispiel die der Gasturbine, in diesem Zeitraum sehr stark gehemmt wurde.

● *Geben Sie Beispiele aus der Geschichte, mit denen Sie die Verzögerung des technischen Fortschritts durch Krisen und Kriege nachweisen können!*

Heute hat auch die Gasturbine als Wärmekraftmaschine in der Industrie und im Verkehrswesen ihren Platz erhalten. Führend auf diesem Gebiet ist die Sowjetunion. Die ersten Verkehrsflugzeuge mit Gasturbinentriebwerken, die mit Erfolg im Verkehr eingesetzt wurden, waren sowjetische Flugzeuge vom Typ TU-104. Die zur Zeit stärksten Flugzeuggasturbinen besitzt die TU-114 mit vier Triebwerken zu je 12000PS

Leistung. In der Sowjetunion arbeiten seit 1947 Wärmekraftwerke, die ausschließlich mit Gasturbinen ausgerüstet sind. Auch im kapitalistischen Ausland gibt es eine, jedoch geringe Zahl von Gasturbinenkraftwerken und Flugzeuge, die mit Gasturbinentriebwerken ausgerüstet sind, doch reicht deren Leistung nicht an die der sowjetischen Turbinen heran.

Es konnte nur angedeutet werden, daß die Entwicklung der Wärmekraftmaschinen im Zusammenhang mit der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft gesehen werden muß, im Zusammenhang mit den sich ständig verbessernden Arbeitsfertigkeiten und Kenntnissen der Menschen und den Bedürfnissen der kapitalistischen und der sozialistischen Produktion. In den Klassen 11 und 12 werden Sie mehr von den allgemeinen Entwicklungsgesetzen der Natur, der Gesellschaft und des menschlichen Denkens erfahren.

Zusammenfassung

1. **Die spezifische Wärme ist eine von der Art und dem Zustand des Stoffes abhängige physikalische Größe.**

   Warum werden für Gase zwei spezifische Wärmen angegeben?

2. **Erster Hauptsatz der Wärmelehre: Mechanische Energie und Wärme sind zwei Energiearten, die sich ineinander überführen lassen.**

   Welcher Zusammenhang besteht zwischen beiden Energiearten?

3. **Es gibt vier Grundformen der Zustandsänderung eines Gases.**

   Wodurch charakterisiert man die isotherme und die adiabatische Zustandsänderung?

4. **Wärmekraftmaschinen untergliedert man in Kolbenmaschinen und Strömungsmaschinen.**

   Welche Arbeitsprinzipien liegen den beiden Kraftmaschinenarten zugrunde?

5. **Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre: Wärme geht niemals von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper über.**

   Was versteht man unter einem umkehrbaren Vorgang?
   Wie arbeitet eine Kältemaschine?

Wärmelehre

1. Die Gasgesetze 41

1.1. Die Ausdehnung der Körper 41
1.2. Die Gasgesetze von GAY-LUSSAC 44
1.3. Die allgemeine Zustandsgleichung der Gase 50
1.4. Die Gaskonstante 54
1.5. Anwendungen der allgemeinen Zustandsgleichung 55

2. Die Grundlagen der kinetischen Gas- und Wärmetheorie 58

2.1. Der molekulare Aufbau der Körper 58
2.2. Grundvorstellung und Grundgleichung der kinetischen Gastheorie 63
2.3. Die Volumenergie einer Gasmenge 68
2.4. Die Grundlagen der kinetischen Wärmetheorie 69

3. Hauptsätze der Wärmelehre 74

3.1. Die spezifische Wärme 74
3.2. Erster Hauptsatz der Wärmelehre 77
3.3. Die Zustandsänderung eines Gases 83
3.4. Anwendung des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre 87
3.5. Strömungsmaschinen 93
3.6. Der Wirkungsgrad 97
3.7. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre 100
3.8. Entwicklung des Kraftmaschinenbaus 105

Quellennachweis der Bilder

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen angefertigt von Heinz Grothmann, Berlin und Fritz Hampel, Hangelsberg.

Seifert: 41 · VEB Bergmann-Borsig: 93/2 · Volk und Wissen Archiv: 45/1; 59/1; 59/2; 63/1; 63/2; 74; 82/2; 82/4; 91/2; · Zentralbild: 77/1; 82/3.

02 10 53-2
1.10 MDN