

# Physik

Lehrbuch für die erweiterte Oberschule

Klasse 10 (B)



VOLK UND WISSEN

VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1967

**Die Manuskripte wurden verfaßt von**

**Josef Fischer (Optik, außer Abschnitte 2. und 4.3. bis 4.7.)**

**Rolf Grabow (Mechanische Schwingungen und Wellen, Statik der Flüssigkeiten und Gase)**

**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**

**Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als  
Schulbuch bestätigt**

**Ausgabe 1963**

**Umschlag: Werner Fahr**

**Typographische Gestaltung: Günter Runschke · Günter Wolff**

**ES 11 H · Bestell-Nr. 02 10 59-5 · Preis: 4,75 · Lizenz-Nr. 203 · 1000/66 (UN)**

**Satz: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig (III/19/203)**

**Druck: VEB Werkdruck Gräfenhainichen (IV/2/14)**

## INHALTSVERZEICHNIS

### Statik der Flüssigkeiten und Gase

<b>1. Mechanische Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase</b>	<b>8</b>
1.1. Die Aggregatzustände	8
1.2. Die Kohäsionskräfte	9
Versuche, Fragen, Aufgaben	10
<b>2. Der Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen</b>	<b>11</b>
2.1. Der Druck und seine Einheiten	11
2.2. Druckmessungen in Flüssigkeiten und Gasen	12
2.3. Die allseitige Druckausbreitung	13
2.4. Der Schweredruck in Flüssigkeiten	15
Versuche, Fragen, Aufgaben	20
<b>3. Druck in Gasen</b>	<b>21</b>
3.1. Der Luftdruck	21
3.2. Das Boylesche Gesetz	24
3.3. Vakuumpumpen	25
3.4. Geschichtliche Entwicklung	26
Versuche, Fragen, Aufgaben	30
<b>4. Der statische Auftrieb</b>	<b>31</b>
4.1. Das Archimedische Prinzip	31
4.2. Schwimmen und Schweben	34
4.3. Dichtemessung von festen Körpern und Flüssigkeiten	35
Versuche, Fragen, Aufgaben	37

### Wärmelehre

<b>1. Die Gasgesetze</b>	<b>41</b>
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
Versuche, Fragen, Aufgaben	56

<b>2. Die Grundlagen der kinetischen Gas- und Wärmetheorie</b>	<b>58</b>
2.1. Der molekulare Aufbau der Körper	58
Fragen, Aufgaben	62
2.2. Grundvorstellung und Grundgleichung der kinetischen Gastheorie	63
2.3. Die Volumenergie einer Gasmenge	68
2.4. Die Grundlagen der kinetischen Wärmetheorie	69
Versuche, Fragen, Aufgaben	72
<b>3. Hauptsätze der Wärmelehre</b>	<b>74</b>
3.1. Die spezifische Wärme	74
3.2. Erster Hauptsatz der Wärmelehre	77
Fragen und Aufgaben	82
3.3. Die Zustandsänderung eines Gases	83
3.4. Anwendung des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre	87
Fragen und Aufgaben	91
3.5. Strömungsmaschinen	93
3.6. Der Wirkungsgrad	97
Fragen und Aufgaben	100
3.7. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre	100
Fragen und Aufgaben	104
3.8. Entwicklung des Kraftmaschinenbaues	105

## Mechanische Schwingungen und Wellen

<b>1. Grundbegriffe der Schwingungslehre</b>	<b>111</b>
1.1. Die Schwingung	111
1.2. Physikalische Ursachen der Schwingung	112
1.3. Kenngrößen einer Schwingung	114
Fragen, Übungen, Aufgaben	115
1.4. Harmonische Schwingungen	116
Fragen, Übungen, Aufgaben	120
1.5. Schwingungsdauer von Fadenpendeln	120
Fragen, Übungen, Aufgaben	122
1.6. Gedämpfte Schwingungen	123
Fragen, Übungen, Aufgaben	125
<b>2. Erzwungene Schwingungen</b>	<b>126</b>
2.1. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen	126
2.2. Die Resonanz	127
2.3. Akustische Resonanz	128
2.4. Schwingungen in der Technik	128
Fragen, Übungen, Aufgaben	133

<b>3. Grundbegriffe der Wellenlehre</b>	135
3.1. Entstehung von Wellen	135
Fragen, Übungen, Aufgaben	139
3.2. Grafische Darstellung von Wellen	141
3.3. Kenngrößen einer Welle	143
3.4. Die Grundgleichung der Wellenlehre	145
Fragen, Übungen, Aufgaben	146

<b>4. Die Ausbreitung von Wellen</b>	147
4.1. Reflexion von Wellen	147
4.2. Die Brechung von Wellen	149
4.3. Das Huygenssche Prinzip	151
Fragen, Übungen, Aufgaben	155
4.4. Überlagerung zweier Wellen	157
Fragen, Übungen, Aufgaben	160
4.5. Die Bedeutung der Wellenlehre	161

## Optik

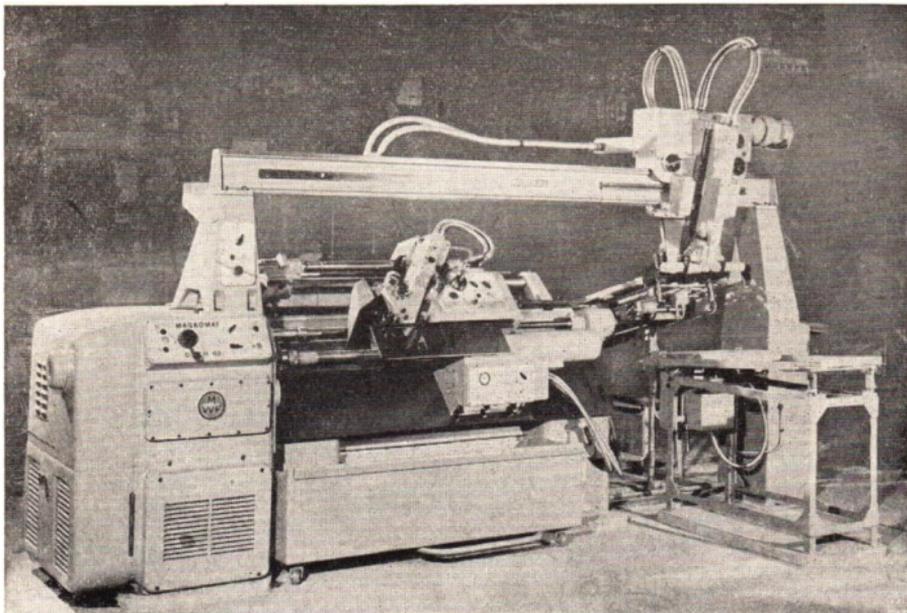
<b>1. Die Ausbreitung des Lichtes</b>	164
1.1. Lichtquellen	164
1.2. Durchsichtige, durchscheinende und lichtundurchlässige Körper	165
1.3. Die geradlinige Ausbreitung des Lichtes	165
1.4. Das Abstandsgesetz	166
1.5. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit	168

<b>2. Reflexion am Hohlspiegel</b>	171
2.1. Hohlspiegel	171
2.2. Strahlenverlauf am sphärischen Spiegel	171
2.3. Strahlenverlauf am Parabolspiegel	174
2.4. Bilder am Hohlspiegel — Abbildungsgleichung Versuche, Fragen, Aufgaben	177

<b>3. Die Lichtbrechung</b>	179
3.1. Das Brechungsgesetz	179
3.2. Lichtdurchgang durch Platten und Prismen	183
3.3. Totalreflexion	184
3.4. Atmosphärische Strahlenbrechung und Luftspiegelung Versuche, Fragen, Aufgaben	187

<b>4. Linsen und Linsenbilder</b>	191
4.1. Bildentstehung an Linsen	191
4.2. Die Abbildungsgleichung für Linsen	196
4.3. Der Fotoapparat	200

4.4. Die Lupe	200
4.5. Das Mikroskop	201
4.6. Das Keplersche Fernrohr	201
4.7. Die optische Industrie der Deutschen Demokratischen Republik	202
Versuche, Fragen, Aufgaben	204
<b>5. Dispersion</b>	<b>207</b>
5.1. Dispersion im Prisma	207
5.2. Der Spektralapparat	210
5.3. Das Emissionsspektrum	211
5.4. Das Absorptionsspektrum	212
5.5. Die Spektralanalyse	214
<b>Anhang</b>	
<b>1. Formeln</b>	<b>217</b>
<b>2. Lösungen</b>	<b>218</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>221</b>



## Statik der Flüssigkeiten und Gase

Durch die Arbeit verändern die Menschen ihre Umwelt. Anfangs verwendeten sie in der Produktion vorwiegend feste Rohstoffe. Eine Steigerung der Produktion wurde möglich, als man begann, Stoffe im flüssigen Zustand zu verarbeiten.

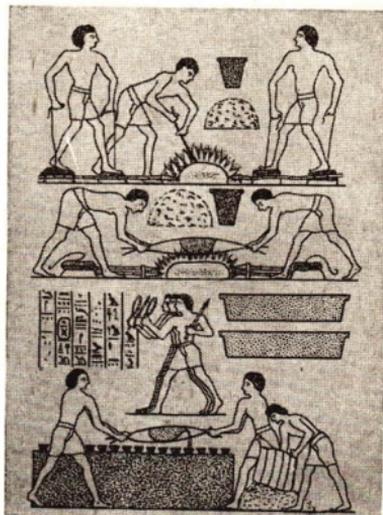
Die Verarbeitung von Stoffen im gasförmigen Zustand begann erst zu einem verhältnismäßig späten Zeitpunkt.

Nachdem durch die gemeinsame Arbeit vieler Wissenschaftler und Techniker im 18. und 19. Jahrhundert grundlegende Erkenntnisse über die Eigenschaften der Stoffe im festen, flüssigen und besonders auch im gasförmigen Zustand gewonnen worden waren, konnten auch Natur- und Rohstoffe im gasförmigen Zustand immer mehr in den Produktionsprozeß einbezogen werden. Der heutige Stand der Technik gestattet es, die Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase auch in den verschiedensten Produktionsmaschinen und Aggregaten auszunutzen. In der modernen Fließfertigung werden hydraulisch gesteuerte Kopierdrehmaschinen und pneumatisch betätigte Fördereinrichtungen wie in unserem Bild vielfach eingesetzt.

# 1. Mechanische Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase



Bereits im Altertum nutzten die Menschen die verschiedenen Eigenschaften der Stoffe aus, um die ihren Bedürfnissen entsprechenden Gebrauchsgegenstände in großer Stückzahl zu erzeugen. Auf dem Wandfries im Grabmal zu Rekhmiré in Ägypten (um 1470 v. u. Z.) finden wir Darstellungen über das Schmelzen und das Gießen von Metallen unter Verwendung verschiedener Hilfsmittel, wie Blasebalg, Gießpfanne und Gießformen.



## 1.1. Die Aggregatzustände

Die mechanischen Eigenschaften der Körper hängen vorwiegend vom Aggregatzustand<sup>1</sup> ab, in dem sie vorliegen. Die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig kann man nach äußeren Kennzeichen unterscheiden.

Tabella 1: Eigenschaften der Stoffe bei verschiedenen Aggregatzuständen\*

feste Körper	bestimmte Gestalt	bestimmtes Volumen	wenig zusammendrückbar	schwer teilbar
flüssige Körper	keine bestimmte Gestalt	bestimmtes Volumen	kaum zusammendrückbar	leicht teilbar
gasförmige Körper	keine bestimmte Gestalt	kein bestimmtes Volumen	stark zusammendrückbar	sehr leicht teilbar

### Beispiel

Natürliches Schwefelgestein hat eine bestimmte Form und auch ein bestimmtes Volumen. Es läßt sich nur mit einem größeren Kraftaufwand zerteilen. Erhitzt man Schwefelstücken, so schmelzen sie bei etwa 113 °C.

Geschmolzener Schwefel hat keine bestimmte Gestalt, er paßt sich der Gefäßform an. Der flüssige Schwefel kann mit geringem Kraftaufwand zerteilt werden. Bei weiterem Erhitzen

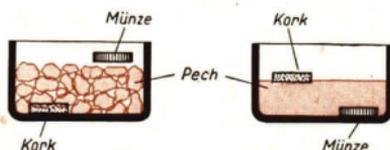
<sup>1</sup> von aggregare (lat.): hinzuscharen

bleibt er flüssig, ändert aber mehrmals seine mechanischen Eigenschaften. Oberhalb 160 °C wird er dickflüssig, bei 220 °C sehr zähflüssig wie Harz, bei 400 °C schließlich wieder dünnflüssig. (Ursache ist die unterschiedliche Anordnung der Atome im Schwefelmolekül.) Nach Überschreiten des Siedepunktes von etwa 445 °C verdampft der Schwefel. Schwefeldampf breitet sich im gesamten Raum aus, der ihm zur Verfügung steht.

Die Unterscheidung der Aggregatzustände ist auf Grund der in der Tabelle 1 zusammengestellten Merkmale manchmal schwierig. Schusterpech müßte demnach ein fester Körper sein. Versuche ergeben aber, daß Pech auch Merkmale einer Flüssigkeit aufweist (Bild 9/1). Ein ähnliches Verhalten zeigen Glas, Wachs und andere Stoffe. Sie haben keinen bestimmten Schmelzpunkt, sondern erweichen allmählich. Eine klare Abgrenzung zwischen festem und flüssigem Zustand ist daher bei solchen Stoffen nicht möglich.

Von wesentlicher Bedeutung für die Unterscheidung der Aggregatzustände ist die Bewegung der kleinsten Teilchen eines Körpers.

Bei festen Körpern haben die Teilchen eine feste Lage zueinander, sie führen aber fortwährend Schwingungen um eine Mittellage aus. Bei Flüssigkeiten sind die Teilchen nicht an eine feste Lage gebunden, sie befinden sich in unregelmäßiger Bewegung. Das gleiche gilt für Gase, bei denen die Bewegung sehr lebhaft ist.



9/1 Schusterpech läßt sich nur mit einem großen Kraftaufwand zerteilen: Es kann mit dem Hammer in kleine Splitter zerschlagen werden. Schichtet man die Pechsplitter in ein Gefäß, so vereinigen sich die Stückchen nach längerer Zeit wieder zu einer festen Masse. Eine Korkscheibe, die auf den Boden des Gefäßes gelegt wurde, ist wie in einer Flüssigkeit nach oben gestiegen. Beachten Sie: Das Pech wird nicht erwärmt!

Tabelle 2 : Unterscheidungsmerkmale der Aggregatzustände

Aggregatzustand	Kohäsionskräfte	kleinste Teilchen	Bewegung der Moleküle
feste Körper	groß	dicht gelagert	Schwingungen um Mittellage
flüssige Körper	geringer als bei festen Körpern	dicht gelagert	unregelmäßige Bewegungen
gasförmige Körper	sehr gering	durch große Zwischenräume getrennt	sehr lebhaft, unregelmäßige Bewegungen

## 1.2. Die Kohäsionskräfte

Ob sich Körper schwer oder leicht zerteilen lassen, ob sie dick- oder dünnflüssig sind, hängt von der Anordnung ihrer kleinsten Teilchen, der Atome und Moleküle, ab. Zwischen den Teilchen eines Körpers wirken Kräfte, die zum Teil elektrischer und magnetischer Natur sind. Man nennt sie **Molekularkräfte**<sup>1</sup>. Die festen Körper werden

<sup>1</sup> Manche dieser Kräfte können nur mit mathematischen Methoden der modernen theoretischen Physik gekennzeichnet werden

durch *anziehende Kräfte* zusammengehalten. Das Volumen fester und flüssiger Körper läßt sich andererseits nur unter Anwendung großer Kräfte vermindern. Zwischen den Teilchen müssen demnach auch *abstoßende Kräfte* wirken. Die Molekularkräfte sind nur im Bereich sehr kleiner räumlicher Abstände der Teilchen wirksam (etwa  $5 \cdot 10^{-5}$  mm).

Als **Kohäsionskräfte**<sup>1</sup> bezeichnet man die anziehenden Kräfte zwischen den Teilchen des gleichen Körpers, als **Adhäsionskräfte**<sup>2</sup> die anziehenden Kräfte zwischen Teilchen verschiedener Körper.

Auch zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit bestehen Kohäsionskräfte. Sie sind aber wesentlich kleiner als bei festen Körpern.

Die Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen der Gase sind sehr gering und treten bei der lebhaften Bewegung der Moleküle nicht in Erscheinung. Die Moleküle sind durch verhältnismäßig große Zwischenräume voneinander getrennt. Näheres finden Sie im Abschnitt Wärmelehre (Kinetische Gastheorie).

### Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Reinigen Sie sorgfältig mit einem Messer die Grundflächen zweier Bleizylinder, wobei darauf zu achten ist, daß sie völlig eben sind. Pressen Sie die Flächen aufeinander. Der eine Zylinder ist dabei etwas um die Längsachse zu drehen. Die Zylinder haften dann fest aneinander. Der Versuch kann auch mit zwei Parallelenmaßen ausgeführt werden. Geben Sie eine Erklärung!
2. Wie erklären Sie sich, daß Rosenduft im gesamten Zimmer wahrnehmbar ist?  
Hinweis: Dufträger sind sogenannte ätherische Öle.
3. Beschreiben Sie am Beispiel Eis-Wasser-Wasserdampf die Aggregatzustände!

### Zusammenfassung

1. Die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig können nach äußeren Merkmalen unterschieden werden.

Welche Merkmale sind Ihnen bekannt?

2. Zwischen den kleinsten Teilchen der Körper wirken Molekularkräfte (Kohäsions- und Adhäsionskräfte).

Wodurch unterscheiden sie sich?

3. Die kleinsten Bausteine aller Körper sind in dauernder Bewegung.

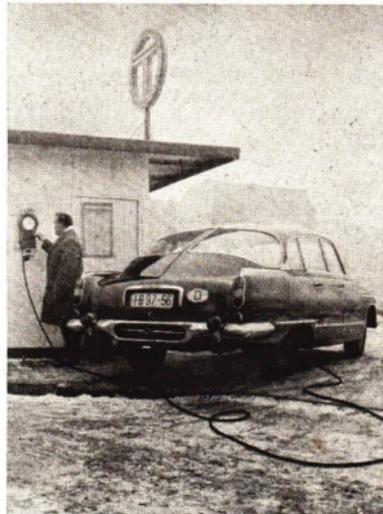
Unterscheiden Sie auf Grund der Molekularbewegung die drei Aggregatzustände!

<sup>1</sup> von cohaerere (lat.): zusammenhängen

<sup>2</sup> von adhaerere (lat.): aneinanderhaften

## 2. Der Druck in ruhenden Flüssigkeiten und Gasen

Kraftfahrzeuge besitzen Luftbereifung. Die Reifen sind durch die Reibung zwischen Reifen und Straßendecke und durch die ständige elastische Verformung sehr stark dem Verschleiß ausgesetzt. Von großer Bedeutung für eine Schonung der Reifen ist dabei der Reifendruck. Zur sorgfältigen Wartung eines Fahrzeugs gehört deshalb die ständige Überprüfung des Reifendrucks, um den Reifenverschleiß so gering wie möglich zu halten.



### 2.1. Der Druck und seine Einheiten

Bei Flüssigkeiten und Gasen ist der Druckbegriff von besonderer Bedeutung. Uns ist bereits die Definition des Druckes bekannt:

**Der Druck ist der Quotient aus der Druckkraft und der Fläche, auf der die Druckkraft senkrecht wirkt.**

$\text{Druck} = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Fläche}} \quad p = \frac{F}{A}$	(1)
--	-----

Die *Maßeinheiten des Druckes* ergeben sich stets als Quotient aus einer Kräfteinheit und einer Flächeneinheit, beispielsweise

$$\frac{1\text{ N}}{1\text{ m}^2} = 1\text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}; \quad 1\text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} = 1\text{ at.}$$

In der Physik, in der Technik und in der Wetterkunde benutzt man folgende Maßeinheiten:

Die technische Atmosphäre (at)

$$\begin{aligned} 1\text{ at} &= 10^4\text{ kp} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 1\text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} \end{aligned}$$

Die physikalische Atmosphäre (atm)

$$\begin{aligned} 1\text{ atm} &= 101\,325\text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 1,033\text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} \end{aligned}$$

Das Bar (bar)

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

Das Torr (Torr)

$$1 \text{ Torr} = 1/760 \text{ atm}$$

Das Millimeter Wassersäule (mm WS)

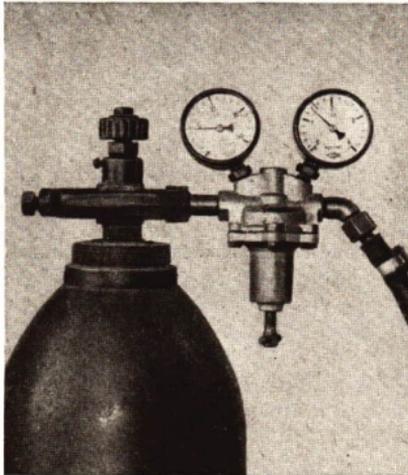
$$1 \text{ mm WS} = 10^{-4} \text{ at.}$$

## 2.2. Druckmessung in Flüssigkeiten und Gasen

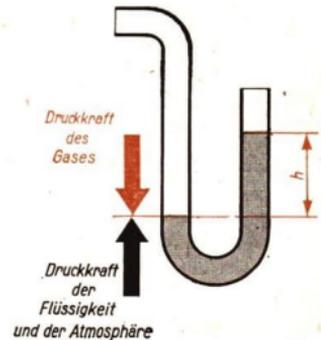
Die Messung des Druckes in Gasen und Flüssigkeiten ist in der Technik sehr wichtig. Bei hydraulischen Einrichtungen muß zum Beispiel der Druck ständig überwacht werden (vgl. 2.3.). Für die Untersuchung der Arbeitsweise von Kolbenkraftmaschinen sind die Druckverhältnisse während der einzelnen Takte von Interesse. Der Dampfkesseldruck darf einen bestimmten Betrag nicht überschreiten.

Druckmeßgeräte werden als *Manometer* bezeichnet. Die Wirkungsweise der meisten dieser Meßgeräte beruht darauf, daß sich ein Gleichgewichtszustand einstellt: Durch die Gase oder Flüssigkeiten werden Druckkräfte hervorgerufen, die durch Gegenkräfte ausgeglichen werden (Bild 12/1).

Bei den Flüssigkeitsmanometern wird die Gegenkraft durch den Schweredruck einer Flüssigkeit hervorgerufen (Bild 12/2).



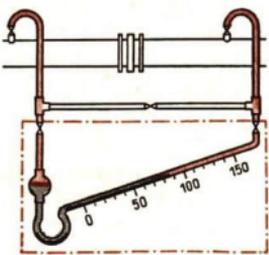
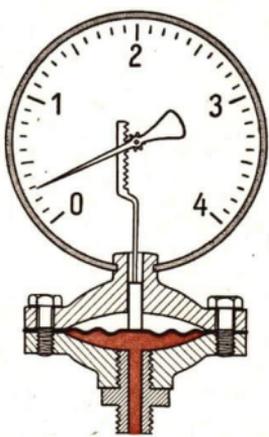
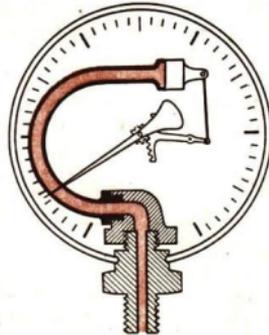
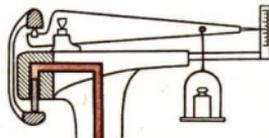
12/1 Mit Hilfe eines Manometers wird der Druck in Druckgasflaschen beim Schweißen kontrolliert und damit die Gasmenge ermittelt



12/2 Beim offenen Flüssigkeitsmanometer wird die Flüssigkeitssäule so lange verschoben, bis zwischen den wirkenden Kräften Gleichgewicht herrscht

Zur Messung besonders hoher Drücke benutzt man elektrische Meßmethoden. Bei hohem Druck ändert zum Beispiel ein stromdurchflossener Manganindraht seinen elektrischen Widerstand. Auf dieser Grundlage beruht das elektrische Widerstandsmanometer. Die Druckänderungen im Zylinder einer laufenden Kolbenkraftmaschine lassen sich mit piezoelektrischen Meßfühlern ermitteln. Man nutzt dabei die Erscheinung aus, daß an bestimmten Kristallen eine elektrische Spannung entsteht, wenn sie unter mechanischen Druck gesetzt werden.

Tabelle 3: Wichtige Manometertypen

Gegenkraft	Meßbereich	
a Schwere- druck	einige Hundert mm Ws	 <p>a Flüssigkeitsmanometer</p>
b Spannkraft	bis 500 at	 <p>b Plattenfeder- oder Membranmanometer</p>
c Spannkraft	bis 5000 at	 <p>c Röhrenfedermanometer</p>
d Gegen- gewicht	bis 12000 at	 <p>d Kolbenmanometer</p>

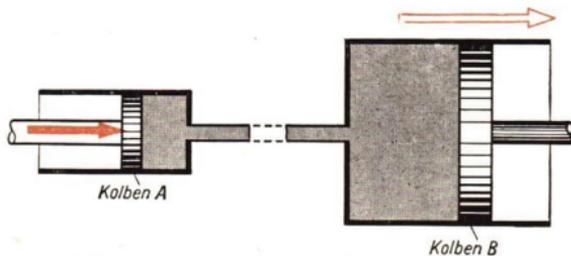
### 2.3. Die allseitige Druckausbreitung

Alle hydraulischen Anlagen nutzen die uns bereits bekannten Eigenschaften der Flüssigkeiten aus:

- Flüssigkeiten lassen sich kaum zusammendrücken, das heißt, sie sind inkompressibel.
- Die Moleküle der Flüssigkeiten sind leicht gegeneinander verschiebbar.
- In Flüssigkeiten breitet sich der Druck nach allen Seiten gleichmäßig aus.

Hydraulikanlagen werden für die verschiedensten Zwecke gebaut. Trotzdem ist ihr grundsätzlicher Aufbau stets gleich (Bild 14/1).

Durch Kraftwirkung auf einen Kolben wird im Inneren einer Flüssigkeit ein Druck hervorgerufen. Der Druck wirkt in gleicher Größe auf einen zweiten Kolben.



14/1 Prinzip aller hydraulischen Anlagen

$$F_1 : F_2 = A_1 : A_2.$$

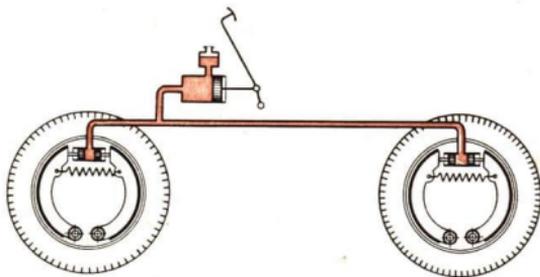
Die Druckkräfte verhalten sich wie die dazugehörigen Flächen.

Auf der Grundlage dieser Beziehung ist es möglich, mit geringem Kraftaufwand eine große Kraftwirkung zu erreichen (Bild 15/1).

Wie bei allen Maschinen kann man auch mit hydraulischen Anlagen keine Arbeit gewinnen. Die Produkte aus Kraft und Kraftweg sind stets gleich groß. Es gilt auch hier das *Gesetz von der Erhaltung der Arbeit*.

14/2 Hydraulische Bremse

14/3 Einige Beispiele aus dem großen Gebiet der Hydraulik: Geräteträger RS 09, Kopierdrehmaschine



Es gilt für die beiden Kolben:

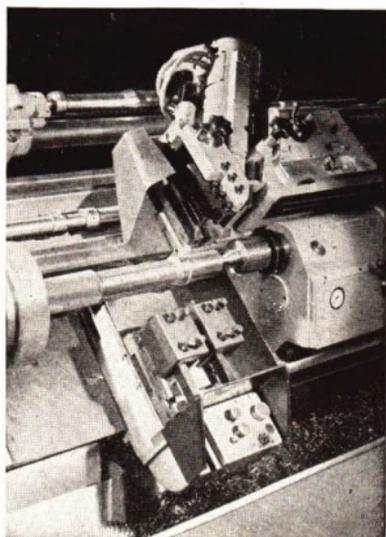
$$\frac{F_1}{A_1} = p_1 \quad \text{und} \quad \frac{F_2}{A_2} = p_2;$$

$$p_1 = p_2.$$

Durch Gleichsetzen erhält man

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

oder

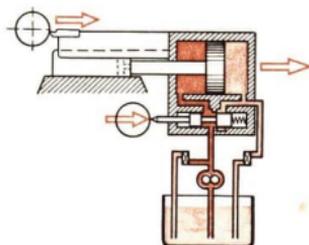


15/1 Voll hydraulisch arbeitet der Universalbagger UB 20 vom VEB Schwermaschinenbau NOBAS



15/2 Schema einer hydraulischen Kopiervorrichtung für Drehmaschinen

Wenn der Fühlstift durch die nachzuförmende Schablone (Mitte links) zurückgedrückt wird, gibt ein Kolben der Druckflüssigkeit den Weg frei zur rechten Seite des oberen Zylinders. Da der obere Kolben feststeht, wird der Zylinder mit dem Drehmeißel ebenfalls zurückgezogen.

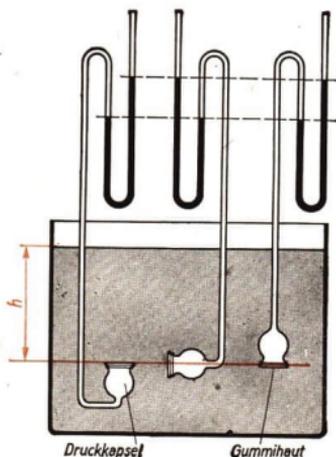


## 2.4. Der Schweredruck in Flüssigkeiten

Der *Schweredruck* in einer Flüssigkeit wird durch das Flüssigkeitsgewicht hervorgerufen. Er nimmt mit der Tiefe zu. Je nach der Richtung, in der der Schweredruck gemessen wird oder eine Wirkung hervorruft, bezeichnet man ihn als *Boden-, Seiten- oder Aufdruck*. Ein Versuch nach Bild 15/3 ergibt:

**Der Schweredruck in einer Flüssigkeit ist in der gleichen Tiefe nach allen Seiten gleich groß.**

15/3 Das Manometer zeigt in der gleichen Tiefe den gleichen Druck an, unabhängig von der Lage der Druckkapsel in der Flüssigkeit



### 2.4.1. Das Gesetz vom Schweredruck

Der Druck  $p$  in einer bestimmten Tiefe der Flüssigkeit ist gleich dem Quotienten aus dem Gewicht  $G$  der Flüssigkeitssäule und deren Grundfläche  $A$ :

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

Mit der Beziehung

$$m = V \cdot \rho$$

ergibt sich:

$$p = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{A}$$

Für das Volumen eines Kreiszyinders oder Quaders gilt:

$$V = A \cdot h,$$

so daß damit folgt:

$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

(2)

Der Schweredruck in einer Flüssigkeit ist bei konstanter Erdbeschleunigung nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule und der Dichte abhängig.

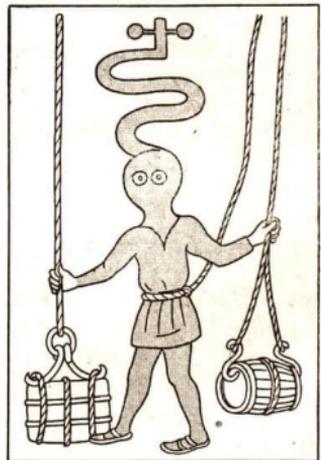
Wirkt auf eine abgeschlossene Flüssigkeitsmenge ein Kolbendruck, so setzt sich der im Innern der Flüssigkeit herrschende Druck aus dem Kolbendruck und dem Schweredruck zusammen. Den Gesamtdruck bezeichnet man als *hydrostatischen* Druck.

#### Beispiel

Bild 16/1 zeigt eine mittelalterliche Darstellung eines Tauchers. Der wasserdichte „Taucherhelm“ steht durch einen Schlauch mit der Außenluft in Verbindung, damit sich der Taucher längere Zeit unter Wasser aufhalten könne. Ist eine solche Vorrichtung überhaupt einsetzbar?

Die durch den Schlauch eingatmete Luft steht unter dem äußeren Luftdruck (etwa  $1,033 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ , vgl. 2.1.). Auf den Brustkorb wirkt der äußere Luftdruck (er breitet sich als „Kolbendruck“ auch im Wasser aus!) und zusätzlich der Schweredruck des Wassers.

Wie groß ist der Schweredruck des Wassers in einer Tiefe von  $1,5 \text{ m}$ ?



Gegeben:

$$h = 1,5 \text{ m}$$

$$\rho = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Gesucht:

$$p \text{ (in } \text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}\text{)}$$

Lösung:

$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

$$p = 1,5 \cdot \text{m} \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$p = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$p = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$p = 1,5 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die Einheiten N und m<sup>2</sup> sind umzuwandeln!

$$1\text{ N} = \frac{1}{9,81}\text{ kp}; \quad 1\text{ m}^2 = 10^4\text{ cm}^2$$

$$p = 1,5 \cdot 9,81 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{9,81}\text{ kp} \cdot 10^{-4}\text{ cm}^{-2}$$

$$p = 1,5 \cdot 10^{-1}\text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} = 0,15\text{ at}$$

Der Schweredruck in einer Wassertiefe von 1,5 m beträgt  $0,15\text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} = 0,15\text{ at}$ .

Untersuchungen haben ergeben, daß bereits bei einem *einseitig* wirkenden Überdruck von 0,1 at die Atmung außerordentlich erschwert ist. Bei längere Zeit wirkendem Überdruck treten schwere Herzschäden auf. Auf die oben genannte Weise kann also nicht getaucht werden.

- Warum dürfen „*Taucherschnorchel*“ nicht verlängert werden? Wie erfolgt die Luftversorgung bei einem modernen Taucheranzug? Der Taucher atmet Luft ein, die unter Überdruck steht. Warum treten hier keine Schäden auf?

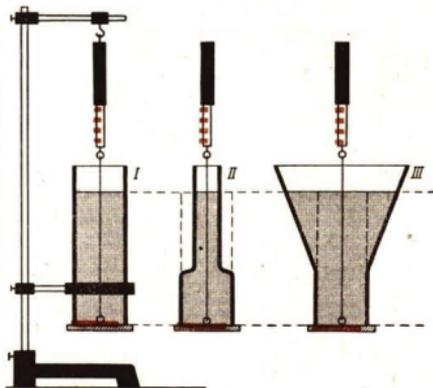
### 2.4.2. Das hydrostatische Paradoxon

Die Lehre von den Kräften und Erscheinungen in ruhenden Flüssigkeiten heißt **Hydrostatik**. Einen großen Anteil an ihrer Entwicklung hat der holländische Wasserbauingenieur SIMON STEVIN (1548 bis 1620).

Die Niederlande gehörten damals zu den Ländern, in denen die wirtschaftliche Entwicklung sehr schnell voranging. Die auf hohem Stand befindliche Schifffahrt, das Entwässerungswesen und die Schleusen, Kanäle und anderen Wasserbauten brachten viele technische Probleme mit sich, die eine Lösung erforderten. Es bestand also ein gesellschaftliches Bedürfnis für hydrostatische Untersuchungen.

Von STEVINS Arbeiten ist die über eine physikalische Erscheinung zu erwähnen, die als hydrostatisches Paradoxon<sup>1</sup> bezeichnet wird.

17/1 Alle Glasgefäße haben die gleiche Grundfläche. Durch die Federwaage wird eine Platte gegen die untere Öffnung gepreßt. Gießt man vorsichtig Wasser in die Gefäße, so beginnt das Wasser in allen Fällen bei gleicher Höhe der Wassersäule auszufließen. In diesem Augenblick sind Federkraft und Bodendruckkraft des Wassers etwa gleich groß. Die Bodendruckkraft hängt demnach nicht von der Wassermenge ab, die sich in den Gefäßen befindet. Beachtet man die Grundgesetze der Hydrostatik, so erscheint der Ausgang des Experimentes nicht paradox



<sup>1</sup> pará (griech.): gegen;  
doxa (griech.): Erwartung

Man versteht unter dem hydrostatischen Paradoxon, daß in verschieden geformten Gefäßen mit gleicher Bodenfläche und gleicher Höhe der Wassersäule die Druckkraft gegen den Boden unabhängig von der Flüssigkeitsmenge im Gefäß ist (Bild 17/1).

**Die Größe der Bodendruckkraft ist von der Gefäßform unabhängig, wenn die Grundflächen gleich groß sind.<sup>1</sup>**

Dieser Satz läßt sich durch folgende Überlegungen beweisen:

Wir denken uns ein Gefäß nach Bild 18/1 mit einer Flüssigkeit gefüllt, die in Schichten mit der gleichen *sehr kleinen* Höhe  $\Delta h$  eingeteilt ist. Zur besseren Übersicht sind nur einige dieser Schichten eingezeichnet worden.

Die oberste schraffierte Schicht mit dem Querschnitt  $A$  übt auf die darunterliegende Schicht die Kraft

$$G = m \cdot g,$$

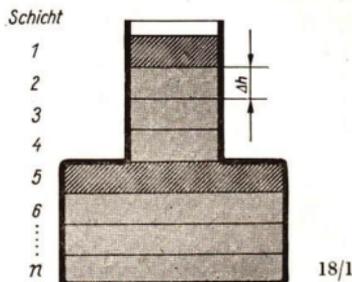
$$G = V \cdot \rho \cdot g,$$

$$G = A \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g$$

aus. Es entsteht in ihr der Druck

$$p = \frac{A \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g}{A},$$

$$p = \Delta h \cdot \rho \cdot g.$$



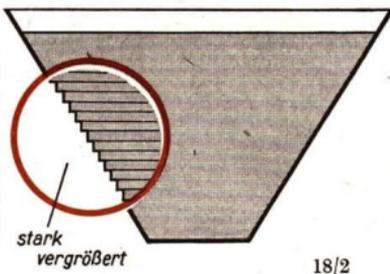
Die zweite Schicht allein ruft in der darunterliegenden Schicht ebenfalls den Druck  $p = \Delta h \cdot \rho \cdot g$  hervor. Hinzu kommt aber wegen des Gesetzes von der Druckausbreitung in Flüssigkeiten noch der von der ersten Schicht ausgeübte Druck. Die Grenzfläche erfährt demnach den Gesamtdruck  $p = \Delta h \cdot \rho \cdot g + \Delta h \cdot \rho \cdot g$ ,  $p = 2 \Delta h \cdot \rho \cdot g$ , die Grenzfläche unter der dritten Schicht den Gesamtdruck  $p = 3 \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g$ , die nächste den Gesamtdruck  $p = 4 \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g$ .

In der darunterliegenden schraffierten Schicht herrscht an *allen* Stellen dieser Gesamtdruck  $p = 4 \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g$ , auch unter dem „Vorsprung“<sup>2</sup>. Es muß Gleichgewicht bestehen, da sich sonst die Flüssigkeitsteilchen verschieben würden.

Welche Gesetzmäßigkeit liegt dem zugrunde?

Die fünfte Schicht ruft in der darunterliegenden Schicht allein den Druck  $p = \Delta h \cdot \rho \cdot g$  hervor, so daß der Gesamtdruck in der sechsten Schicht  $5 \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g$  beträgt.

Die unterste Schicht, die mit  $n$  bezeichnet wird, übt auf den Boden des Gefäßes den Druck  $p = n \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g$  aus. Das Produkt  $n \cdot \Delta h$  ist aber die Gesamthöhe  $h$ , so daß sich ergibt  $p = h \cdot \rho \cdot g$ . Auf die Bodenfläche  $A$  wirkt die Bodendruckkraft



<sup>1</sup> Das gilt nur für gleiche Flüssigkeitshöhe und gleiche Dichte

<sup>2</sup> Das gilt natürlich für alle Schichten, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit jedoch vorher nicht erwähnt

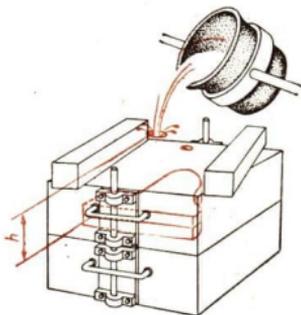
$F = p \cdot A = A \cdot h \cdot \rho \cdot g$ , die unabhängig von der Form des Gefäßes ist und nur von der Bodenfläche und der Höhe der Flüssigkeitssäule abhängt. Da  $\Delta h$  sehr klein sein soll, kann man sich jedes Gefäß aus vielen kleinen Zylindern zusammengesetzt vorstellen. Die Herleitung gilt daher für alle Gefäße (Bild 18/2).

### 2.4.3. Seitendruck, Aufdruck, Bodendruck

Die Gesetze des Schweredruckes sind vor allem bei Wasserbauwerken (Talsperren, Schleusen, Kanälen usw.) und Unterwasserfahrzeugen, aber auch im Gießereiwesen von Bedeutung.

19/1 Im Gießereiwesen wird beim Kastenformguß durch das flüssige Metall auf den Oberkasten ein Aufdruck ausgeübt. Die Kästen müssen daher beschwert werden, damit sie durch die Aufdruckkräfte nicht angehoben werden.

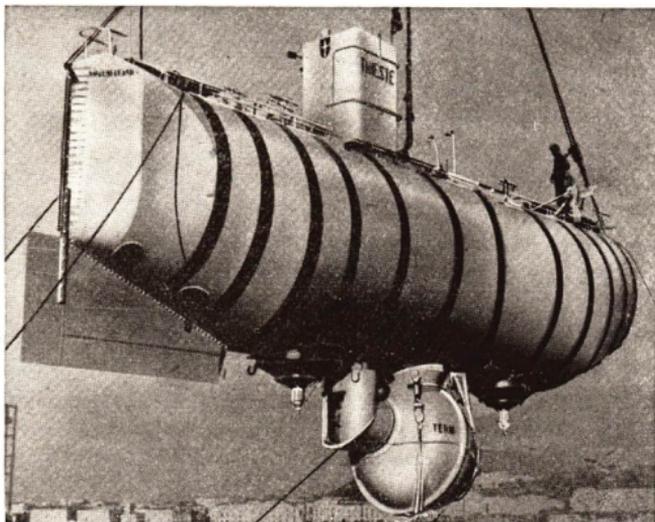
Der Formsand im Unterkasten muß fester als im Oberkasten gestampft werden, da durch das flüssige Metall ein Bodendruck ausgeübt wird, der nach unten zunimmt



#### Beispiel

Welche Gesamtdruckkraft wirkt auf die Oberfläche einer Tiefseetauchkugel von 2 m Durchmesser in 11000 m Meerestiefe? Die Dichte des Wassers soll zur Vereinfachung  $\rho = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  gesetzt werden.

19/2 Piccards Tiefseetauchapparat. Mit diesem Apparat wurde 1960 eine Tiefe von 11434 m erreicht. Bei Tiefseetauchgeräten wird der Beobachterraum als Kugel gebaut. Die Kugel widersteht am besten der allseitig wirkenden Belastung durch den Schweredruck



Gegeben:

$$h = 11000 \text{ m}$$

$$d = 2 \text{ m}$$

$$\rho = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Gesucht:

$F$  (in Mp)

Lösung:

$$F = p \cdot A \quad p = h \cdot \rho \cdot g; \quad A = 4\pi r^2 = \pi \cdot d^2$$

$$F = h \cdot \rho \cdot g \cdot \pi \cdot d^2$$

$$F = \frac{11 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \pi \cdot 4 \text{ m}^2}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$F = 44 \cdot 9,81 \cdot \pi \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Mit  $9,81 \text{ N} = 1 \text{ kp}$  ergibt sich

$$F = \frac{44 \cdot 9,81 \cdot \pi \cdot 10^6}{9,81} \text{ kp}$$

$$F \approx 138 \cdot 10^3 \text{ Mp}$$

Die Druckkraft auf die Kugeloberfläche in 11000 m Meerestiefe beträgt mindestens  $138 \cdot 10^3 \text{ Mp}$ .

Der Wert wird noch höher liegen, da die Dichte von Meerwasser größer als  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  ist und auch mit der Tiefe etwas zunimmt.

### Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Im Wetterbericht hieß es: Der Luftdruck betrug 1030 mbar = 772 Torr (1 bar = 1000 Millibar). Überprüfen Sie, ob die beiden Angaben tatsächlich gleichwertig sind! Anleitung: Wandeln Sie mbar in at und diese in Torr um! Benutzen Sie die Übersicht in 2.1. und den Rechenstab!
2. Stadtgasleitungen haben einen verhältnismäßig geringen Überdruck. Wieviel at beträgt er, wenn ein angeschlossenes Wassermanometer einen Höhenunterschied von 6 cm aufweist? Benutzen Sie die Übersicht in 2.1.!
3. Bei einer hydraulischen Presse betragen die Kolbendurchmesser 20 mm und 220 mm. Auf den kleinen Kolben wird eine Druckkraft von 50 kp ausgeübt. Welche Kraft wirkt dann auf den großen Kolben?
4. Welcher Druck herrscht am Kesselboden einer Warmwasserheizung, die in einem 15 m hohen Gebäude eingebaut ist? Die Entfernung Kesselboden–Wasserspiegel im Ausgleichsgefäß sei 13,8 m. Angabe in mm WS und at!

### Zusammenfassung

1. Der Druck ist der Quotient aus der Druckkraft und der Fläche, auf der die Druckkraft senkrecht wirkt.

Welche Maßeinheiten des Druckes kennen Sie?

2. In Flüssigkeiten und Gasen breitet sich der Druck nach allen Seiten gleichmäßig aus.

Beschreiben Sie dazu je einen Versuch!

3. Der Schweredruck in einer Flüssigkeit ist bei konstanter Erdbeschleunigung nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule und der Dichte abhängig.

Wie lautet die mathematische Formulierung dieses Gesetzes?

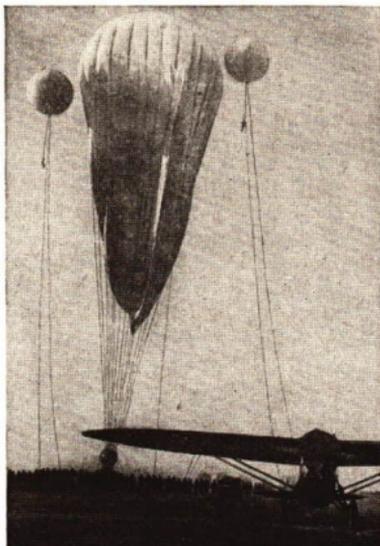
4. Die Größe der Bodendruckkraft ist von der Gefäßform unabhängig, wenn die Grundflächen gleich groß sind.

Warum ist die erste Hälfte des Satzes nicht ausreichend?

### 3. Druck in Gasen

Sowjetischer Stratosphärenballon vor dem Aufstieg, bei dem am 30. 9. 1933 eine Höhe von 19000 m erreicht wurde.

Der Freiballon war vor wenigen Jahrzehnten noch das einzige Luftfahrzeug, mit dem die Menschen die Erforschung der Stratosphäre und ihrer Erscheinungen vornehmen konnten. Die birnenförmige Gestalt des Ballons rührt von der nur teilweisen Füllung mit Gas her. Erst während des Aufstiegs erhält der Ballon Kugelform. Warum?



#### 3.1. Der Luftdruck

Gase haben mit den Flüssigkeiten die leichte Verschiebbarkeit der Teilchen gemeinsam. Daraus erklärt sich auch für beide Aggregatzustände die Gültigkeit des Gesetzes von der gleichmäßig-allseitigen Druckausbreitung.

Das Gesetz vom Schweredruck  $p = h \cdot \rho \cdot g$  ist auf Gase dagegen nicht anwendbar, da tiefer gelegene Gasschichten infolge der Volumelastizität eine größere Dichte als höher gelegene Gasschichten besitzen.

Der Schweredruck der Lufthülle unserer Erde oder kurz der *Luftdruck* nimmt mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche ab. Diese Abnahme ist aber der Höhe nicht proportional, sondern folgt komplizierteren Gesetzen (vgl. S. 23).

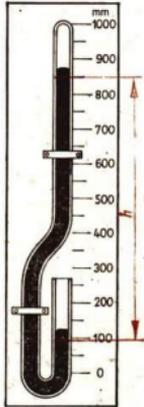
Man vermutete noch vor einem Jahrzehnt, daß die Lufthülle unserer Erde nur etwa 100 km hoch ist. Die Sputnik- und Raumschiffflüge der letzten Jahre brachten aber neue Erkenntnisse. Noch in Höhen von 300 km sind so viel Luftmoleküle vorhanden, daß sie die Bewegung der Satelliten abbremsen.

##### 3.1.1. Der Luftdruck und seine Messung

Obwohl die Dichte der Luft verhältnismäßig gering ist ( $\rho_{\text{Luft}} = 0,001293 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), ist am Grunde der Lufthülle ein erheblicher Schweredruck vorhanden. Um die Größe des Luftdrucks zu bestimmen, wendet man die gleichen Methoden an, wie sie im Abschnitt 2.2. für die Druckmessung angegeben wurden.

Luftdruckmeßgeräte heißen Barometer. Nach Aufbau und Wirkungsweise unterscheidet man *Flüssigkeitsbarometer* und *elastische Barometer*. Ein viel verwendetes Flüssigkeitsbarometer ist das Quecksilberbarometer (Bild 22/1).

Ein elastisches Barometer ist das Dosen- oder Aneroidbarometer<sup>1</sup> (Bild 22/2).



22/1

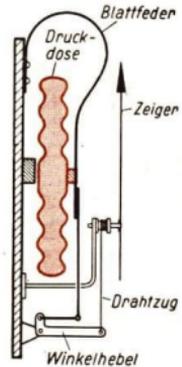
#### 22/1 Quecksilberbarometer

Der Raum über dem Quecksilber ist luftleer und enthält nur sehr wenig Quecksilberdampf, dessen Druck man vernachlässigen kann. Der Luftdruck wirkt gegen die Quecksilberoberfläche im offenen Schenkel und hält der Säule das Gleichgewicht.

Änderungen des Luftdrucks, wie sie auf Grund von Witterungseinflüssen auftreten, äußern sich daher in einer Änderung der Höhe der Quecksilbersäule

#### 22/2 Aneroidbarometer (schematisch)

Als Druckfühler enthält es eine fast luftleere Metalldose (auch Kapsel genannt) mit einem elastischen Metalldeckel. Das Ändern des Luftdrucks bewirkt ein leichtes Durchbiegen der Wände. Die Bewegung einer Wand wird durch ein Hebelwerk stark vergrößert und auf einen um eine Achse drehbaren Zeiger übertragen



22/2

Barometermessungen ergeben:

Der durchschnittliche Luftdruck in Meereshöhe ist so groß, daß er einer Quecksilbersäule von 760 mm Höhe das Gleichgewicht hält. Der Schweredruck einer Quecksilbersäule von 1 mm Höhe wird zu Ehren TORRICELLI als 1 Torr bezeichnet.

Durch Umrechnung (vgl. 2.1) erhält man:

**Der durchschnittliche Luftdruck in Meereshöhe beträgt 760 Torr gleich 1013 mbar.**

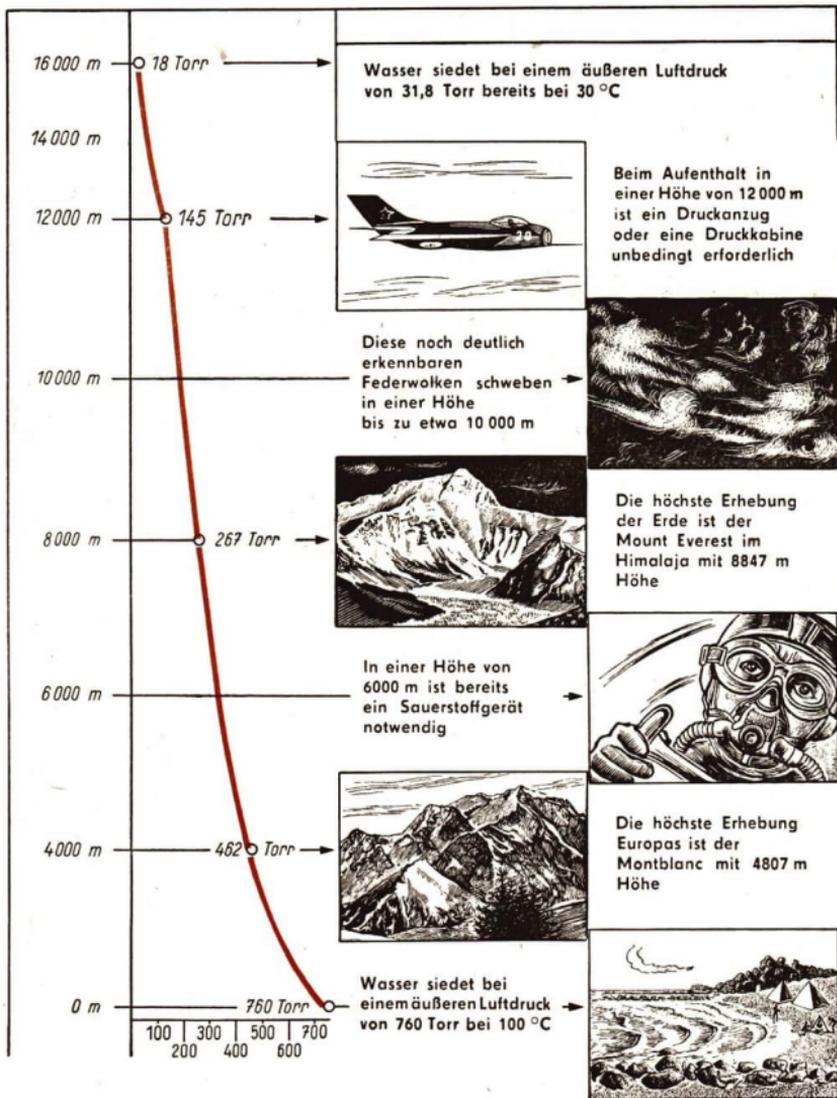
### 3.1.2. Veränderung des Luftdrucks mit der Höhe

Beobachtungen über die Druckabnahme mit der Höhe zeigen folgendes:

In den untersten Luftschichten nimmt der Luftdruck bei Erhebung um 10,5 m etwa um 1 Torr ab. In größeren Höhen ist die Höhenstufe größer, die zu einer Druckabnahme um 1 Torr erforderlich ist (Bild 23/1). Aber auch hier bestehen Gesetzmäßigkeiten. Es ist daher möglich, Dosenbarometer als Höhenmesser zu verwenden (Bild 24/2). Sie finden vor allem im Flugwesen Verwendung.

Änderungen des Luftdrucks erfolgen nicht nur bei Höhenänderungen, sondern auch dann, wenn sich die Dichte der Luft ändert. Das kann durch Temperatureinflüsse

<sup>1</sup> anerós (griech.): trocken



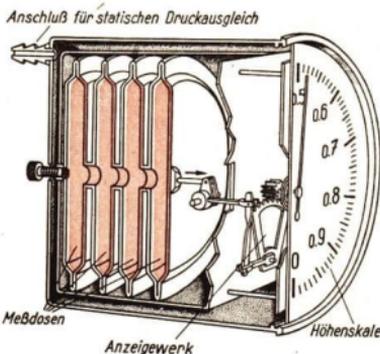
23/1 Abhängigkeit des Luftdruckes von der Höhe



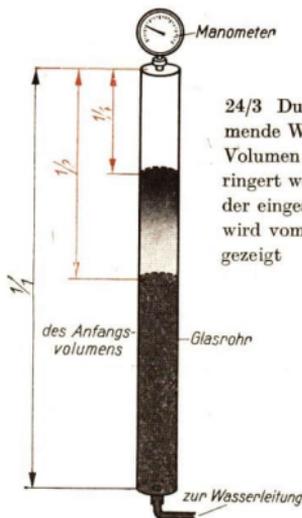
### 24/1 Flugzeugpilot im Druckanzug

Beim Aufstieg in größere Höhen bleibt das Körperinnere des Menschen unter normalem Druck. Der Außendruck nimmt dagegen beträchtlich ab. Welche Schäden können dadurch auftreten? Im Druckanzug oder in einer Druckkabine bestehen diese Gefahren nicht

und Luftströmungen geschehen (Hoch- und Tiefdruckgebiete). Die Registrierung des Luftdrucks gehört neben der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung zu den wichtigsten Beobachtungen in der Meteorologie (Wetterkunde).



24/2 Höhenmesser. Man verwendet mehrere Dosen, um die Zeigerausschläge zu vergrößern



24/3 Durch das einströmende Wasser kann das Volumen beliebig verringert werden. Der Druck der eingeschlossenen Luft wird vom Manometer angezeigt

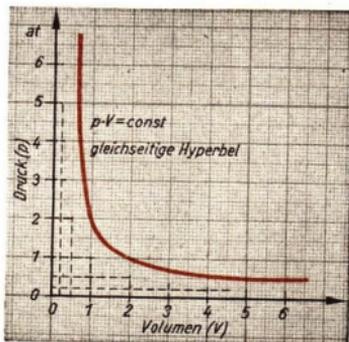
### 3.2. Das Boylesche Gesetz

Im Gegensatz zu den Flüssigkeiten lassen sich Gase stark zusammendrücken. Dabei ist die Verringerung des Volumens mit einer Druckzunahme verbunden. Die Beziehung zwischen Druck und Volumen kann man einem Versuch nach Bild 24/3 entnehmen. Uns ist bereits bekannt, daß das Produkt aus Druck und Volumen eines Gases stets gleich groß ist. Dieser Zusammenhang besteht aber nur, wenn die Temperatur des Gases konstant bleibt. Dann gilt das Boylesche Gesetz:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (3)$$

## 25/1 Diagramm zum Boyle'schen Gesetz

Neben der Forderung nach einer gleichbleibenden Temperatur muß noch eine weitere Einschränkung gemacht werden: Das Boyle'sche Gesetz gilt streng nur, wenn das Eigenvolumen der Moleküle und die Kräfte, die diese aufeinander ausüben, vernachlässigt werden. Man spricht dann von einem *idealen Gas*, das es in Wirklichkeit nicht gibt. Ein solches Gas stellt eine Modellvorstellung dar. Für Gase, die weit von ihrem Verflüssigungspunkt entfernt sind, kann das Boyle'sche Gesetz aber ohne weiteres angewandt werden. Das trifft für Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff bei normaler Zimmertemperatur zu.

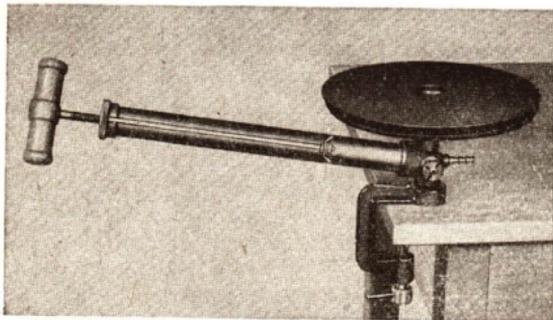


### 3.3. Vakuumpumpen

Alle Vakuumpumpen beruhen auf der Eigenschaft der Gase, den ganzen zur Verfügung stehenden Raum einzunehmen. Die ersten Versuche, ein Vakuum zu erzeugen, wurden von OTTO VON GUERICKE mit Wasser-Saugpumpen ausgeführt. Aus diesen wurde die Stiefel- oder Kolbenluftpumpe entwickelt (Bild 25/2).

#### 25/2 Stiefelluftpumpe

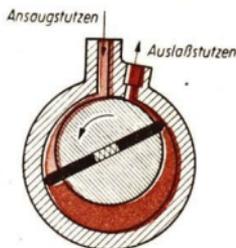
Sie besteht aus einem als Stiefel bezeichneten Zylinder mit dem Kolben und dem Dreiweghahn. Auf dem Pumpenteller kommt der Rezipient, in dem das Vakuum hergestellt werden soll. Da sich die Ausbohrungen des Hahnes und die Verbindung zum Stiefel jedesmal beim Umstellen mit Luft normalen Druckes füllen (schädlicher Raum), dringt diese immer wieder in den Rezipienten ein. Aus diesem Grunde kann auch bei längerem Pumpen ein bestimmter Druck im Rezipienten nicht unterschritten werden.



#### 25/3 Kapsel-Luftpumpe

(schematisch)

Beim Drehen des Kolbens um seine senkrecht zur Bildebene stehende Achse wird durch zwei verschiebbare, federnd gelagerte Flügel Luft vom Ansaugstutzen des Rezipienten zum Auslaßstutzen befördert.



Ein höherer Grad von Luftverdünnung wird mittels rotierender Kapselpumpen erreicht (Bild 25/3).  
Mit Pumpen, die auf anderen Prinzipien beruhen (Diffusionspumpen), können sogar Vakua bis zu  $10^{-7}$  Torr und noch weniger erreicht werden.

### 3.4. Geschichtliche Entwicklung

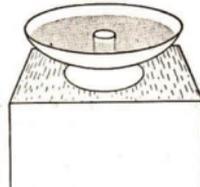
Erste wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Pneumatik<sup>1</sup> erfolgten etwa um 100 v. u. Z. in Alexandria, dem damaligen wissenschaftlichen Zentrum Ägyptens. KRATESIOS erfand die Druckpumpe und Feuerspritze, und sein Schüler HERON beschreibt eine große Anzahl pneumatischer Versuche. Es handelt sich vor allem um Geräte auf der Grundlage des Hebbers und um sogenannte „Tempelwunder“, mit denen die Priester ihre Mitmenschen täuschten, einschüchterten und in Abhängigkeit hielten (Bild 26/1 und 26/2).

Die Wirkungsweise der pneumatischen Apparate erklärt HERON mit dem sogenannten „horror vacui“<sup>2</sup>: Bei einer Pumpe würde unter dem Kolben ein leerer Raum entstehen. Die Natur habe jedoch einen Abscheu vor dem leeren Raum und erfülle ihn sofort wieder mit einem Stoff, in diesem Fall mit Wasser.

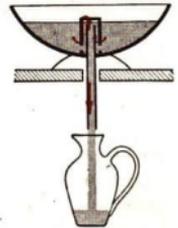
Diese Ansicht hielt sich sehr lange Zeit. Noch vor 400 Jahren bestritt man mit theologischen Argumenten das Vorhandensein des leeren Raumes: „Die Existenz Gottes läßt keinen leeren Raum zu; denn der allgegenwärtige Gott kann dort nicht wirksam sein.“ Andere dagegen behaupteten ganz einfach, daß Gott überall wirksam sei, folglich gäbe es keinen leeren Raum. Auf solche Weise ist natürlich keine Naturforschung möglich.

<sup>1</sup> pneumatisch: durch Luftdruck bewegt, von Luft erzielt

<sup>2</sup> horror vacui: soviel wie „Abscheu vor dem Leeren“



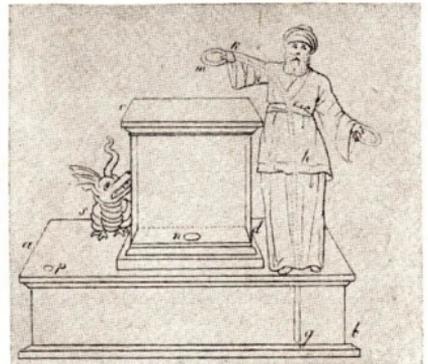
26/1



26/2

26/1 Zauberbecher. In den Becher wird so weit Wasser gefüllt, bis es die punktierte Höhe erreicht. Dann entleert sich der Becher von selbst vollständig. Das rechte Bild zeigt die Wirkungsweise. Es handelt sich um nichts anderes als um den bekannten Saugheber

26/2 Opferaltar. Wurde auf dem Altar ein Opferfeuer entzündet, dehnte sich die Luft in dem Bronzebehälter aus und drückte eine brennbare Flüssigkeit in die Figur; von da aus floß sie in das Feuer, so daß es erneut aufloderte



Erst durch experimentelle Untersuchungen im 17. Jahrhundert bekam die Aerostatik eine wissenschaftliche Grundlage. Unmittelbarer Anstoß waren Probleme der Praxis. GALILEO GALILEI untersuchte zum Beispiel folgendes Problem: „Ich sah einmal einen Brunnen, in welchem . . . ein Pumpenstock angebracht war . . ., und dieser Pumpenstock hatte einen Kolben mit einem Ventil (d. h. eine Saugpumpe) . . . Der Apparat schaffte das Wasser gut und reichlich . . ., sobald aber das Wasser unter eine gewisse Höhe sank, arbeitete die Pumpe nicht mehr. Als ich das zum erstenmal sah, glaubte ich, die Pumpe sei verdorben, ich suchte den Meister auf, damit er sie zurechtmache. Dieser aber versicherte, es fehle nichts, als daß das Wasser, welches zu tief stehe, nicht auf solche Höhen gehoben werden könne; und er fügte hinzu, daß weder mit Pumpen noch mit anderen Maschinen . . . es möglich sei, dasselbe ein Haar breit mehr als 18 Ellen (etwa 10 m) ansteigen zu lassen . . .“ (GALILEI: Discorsi). Eine richtige Erklärung für diese Erscheinung konnte GALILEI nicht geben. Er suchte die Ursache ebenfalls noch in einer Art Widerstand vor dem leeren Raum.

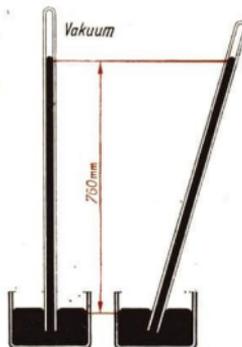
Eine Erklärung gelang erst seinem Schüler EVANGELISTA TORRICELLI (1608 bis 1647). Er kam auf den Gedanken, an einer Quecksilbersäule zu untersuchen, ob auch hier nur eine bestimmte Länge der Flüssigkeitssäule möglich ist. TORRICELLI beauftragte seinen Mitarbeiter VIRIANI, den Versuch durchzuführen (Bild 27/1).

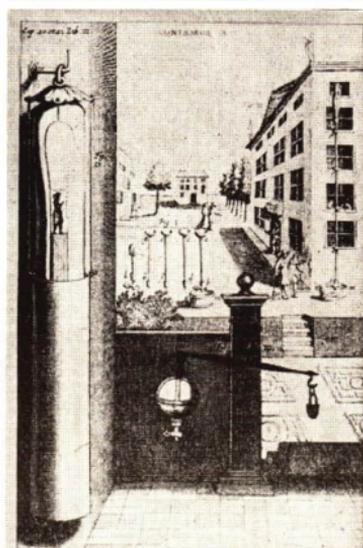
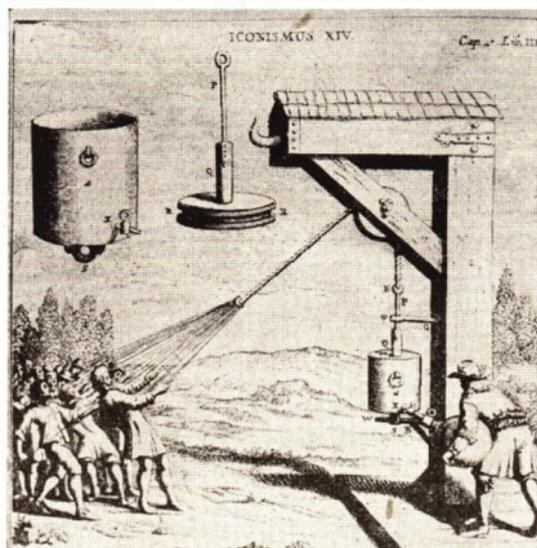
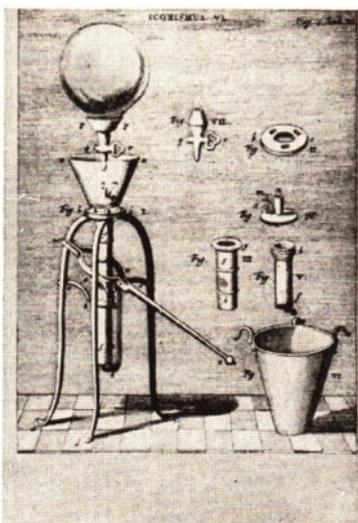
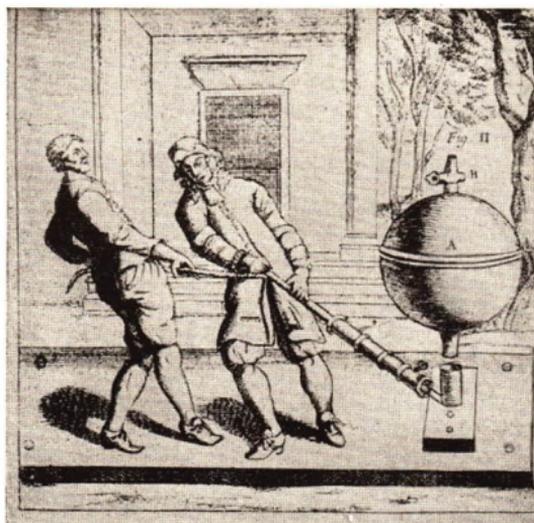
Dieser beobachtete 1643 tatsächlich, daß die Quecksilbersäule stets bis zu einer bestimmten Höhe herabsank. TORRICELLI widmete sich daraufhin selbst wieder den Versuchen. Er erkannte, daß die Länge der Quecksilbersäule geringe Schwankungen aufwies (Wetter!). Da der „horror vacui“ kaum vom Wetter abhängen konnte, verließ TORRICELLI endgültig die alten Ansichten und erklärte seine Beobachtungen unter der Annahme eines Luftdrucks. Das erscheint uns heute selbstverständlich. Damals gehörte aber sehr viel persönlicher Mut dazu, sich gegen die alten Hypothesen auszusprechen, die für Jahrhunderte die Entwicklung der Wissenschaft gehemmt hatten.

BLAISE PASCAL (1623 bis 1662) wiederholte und erweiterte die Torricellischen Versuche und vermutete, daß die Quecksilbersäule auf dem Gipfel eines Berges kürzer sei als am Fuß. Ein Versuch auf dem Puy de Dôme bei Clermont zeigte die Richtigkeit dieser Annahme (1648).

Großes Aufsehen erregten die etwa zur gleichen Zeit vorgenommenen Versuche des Magdeburgers OTTO VON GUERICKE (1602 bis 1686). GUERICKE stammte aus einer reichen Patrizierfamilie. Er studierte an verschiedenen Universitäten Jura, Mathematik, Mechanik und Befestigungslehre. Als Ratsherr seiner Heimatstadt wurden ihm daher auch Verteidigungsaufgaben übertragen, denen in den Wirren des 30-jährigen Krieges besondere Bedeutung zukam. GUERICKE war ein äußerst vielseitiger Mensch, der mitten im Leben seiner Zeit stand. Seine Wahl zum Bürgermeister brachte viele diplomatische Aufgaben mit sich, die mit weiten Reisen verbunden waren und viel Zeit beanspruchten. Um so bewundernswürdiger sind GUERICKE'S wissenschaftliche Arbeiten, die er ohne Kenntnis der Torricellischen Versuche begonnen hatte. Das beträchtliche Vermögen ermöglichte GUERICKE aber auch Versuche großen Aufwands, die von aller Welt bestaunt wurden. Man schätzt, daß er rund 50 000 Mark für die Versuche aufwandte, eine für die damalige Zeit sehr große Geldsumme.

27/1 Torricellischer Versuch — Das einseitig verschlossene Glasrohr wird mit Quecksilber gefüllt, mit dem Finger verschlossen und umgekehrt in eine Quecksilberwanne gestellt. Das Quecksilber sinkt so weit, bis zwischen dem Schweredruck des Quecksilbers und dem Luftdruck Gleichgewicht besteht





28/1 Bildseite mit Originalabbildungen aus Guericke's „Experimenta Nova“

links oben: Auspumpen einer Kupferkugel,  
rechts oben: Luftpumpe,  
links unten: Der Zylinder unter dem Kolben ist  
mit einem „luftleer“ gepumpten Gefäß ver-

bunden. Wird der Hahn B geöffnet, so entsteht  
unter dem Kolben ein luftverdünnter Raum,  
rechts unten: Wettermännchen, im Hinter-  
grund ein Wasserbarometer

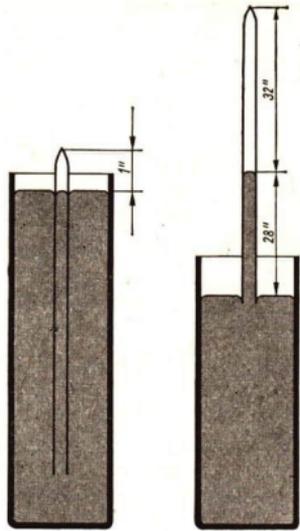
Die bekannteste Erfindung GUERICKE ist die Luftpumpe. Er hatte zur Herstellung eines luftleeren Raumes ein Faß mit Wasser gefüllt und dieses mit einer Feuerspritzenpumpe aus dem Faß zu ziehen versucht. Dabei war aber unter Pfeifen und Sausen die Luft durch die Fugen in das Faß eingeströmt. Als er den Versuch an einem Kessel aus Kupferblech wiederholte, gelang er anfangs, doch wurde plötzlich der Kessel von der äußeren Luft zusammengedrückt. GUERICKE gewann dadurch eine Vorstellung von der Größe der Druckkraft, die die Atmosphäre auf alle Körper ausübt. Im Jahre 1654 waren seine Versuche so weit gediehen, daß er mit geringer Mühe Gefäße auspumpen konnte. Auch ein Wasserbarometer von 10 m Höhe hat GUERICKE hergestellt, indem er ein Rohr, das unten in Wasser tauchte, an der Außenseite seines Hauses bis zum vierten Stockwerk führte. Oben endete das Rohr in einem Rezipienten. Pumpte GUERICKE aus diesem Luft aus, so stieg das Wasser bis zu einer bestimmten Höhe. Auf dem Wasser schwamm eine menschliche Figur, die auf am Glase angebrachte Marken deutete. Da die Wassersäule in Abhängigkeit vom Luftdruck und damit vom Wetter schwankte, nannte GUERICKE die Figur das Wettermännchen. Sehr bekannt geworden ist auch der Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln.

Die Gesetzmäßigkeiten zwischen Druck und Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge wurden um 1662 durch ROBERT BOYLE (1627 bis 1691) und seinen Schüler RICHARD TOWNLEY gefunden. BOYLE war der Sohn eines reichen irischen Adligen. Ein beträchtliches Vermögen gab BOYLE die Möglichkeit, sich ausschließlich philosophischen, naturwissenschaftlichen und religiösen Studien zu widmen. Er stellte auch andere Wissenschaftler in seinen Dienst, zum Beispiel HOOKE.

Das Boylesche Gesetz wurde an einer heberartigen Glasröhre, die am kurzen Schenkel verschlossen war, gefunden. BOYLE konnte zeigen, daß die Gesetzmäßigkeiten auch gelten, wenn die Drücke kleiner als der Atmosphärendruck sind (Bild 39/1).

Bildet man die Produkte aus der Länge des Luftvolumens und dem Druck der abgeschlossenen Luftmenge, so erhält man folgende Werte (siehe Tabelle rechts):

Die Abweichungen vom Boyleschen Gesetz bei zunehmendem Volumen sind auf den Einfluß von Wasserdampf zurückzuführen. BOYLE kannte diese Fehlerquelle jedoch nicht.



29/1 Boylescher Versuch

In der Torricellischen Röhre befindet sich etwas Luft. Die Luftmenge wird so bemessen, daß im Gefäß und in der Röhre gleicher Quecksilberstand vorliegt. Die freie Rohrlänge betrug 1'', der Außendruck entsprach der Länge einer Quecksilbersäule von  $29\frac{3}{4}$ '' (linkes Bild).

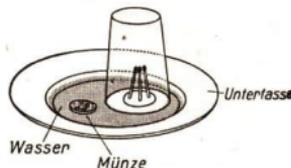
Die Röhre wurde dann so weit herausgezogen, daß dem abgeschlossenen Luftvolumen 32'' entsprachen und die Hg-Säule im Rohr eine Länge von  $28\frac{1}{2}$ '' aufwies. Der Druck der Luft im abgeschlossenen Röhrenteil betrug nur noch  $29\frac{6}{8}$ '' -  $28\frac{4}{8}$ '' =  $1\frac{2}{8}$ '' (rechtes Bild).

Kurzzeichen für Zoll: ''

Länge des Restvolumens	$p \cdot V \approx const$
1''	29,75 Einheiten
2''	28,75 Einheiten
4''	28,50 Einheiten
6''	29,25 Einheiten
8''	30,00 Einheiten
10''	30,00 Einheiten
32''	40,00 Einheiten

## Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Warum kann man mit einer Luftpumpe die Luft nicht vollständig aus einem Gefäß herauspumpen?
2. Welchen Druck besitzt eine abgeschlossene Gasmenge, wenn der äußere Luftdruck 740 Torr beträgt und ein Quecksilbermanometer einen Unterdruck von 120 Torr beziehungsweise einen Überdruck von 250 Torr anzeigt?
3. Beschreiben Sie an Hand des Bildes 24/2 die Wirkungsweise eines Höhenmessers!
4. Fertigen Sie als Anschauungsmaterial für den Unterricht Flachmodelle einer Stiefel- und einer Kapselluftpumpe an! — Verwenden Sie als Material dicke Pappe, die entsprechend zu schneiden ist und auf einem Brett festgeheftet wird.
5. Höhenpiloten tragen einen Druckanzug, der einen bestimmten Druck in den inneren Gefäßen und Organen garantiert. Warum ist diese Vorsichtsmaßnahme notwendig, obwohl sich der Pilot in einer abgedichteten Kabine befindet?
6. Füllen Sie ein Glas bis zum Rand mit Wasser und decken Sie es durch ein Blatt Papier ab. Wird das Papier gegen das Glas gedrückt und dieses umgekehrt, so fließt kein Wasser aus, wenn man die Hand vom Papier entfernt. Erklärung?
7. In einer Untertasse, die mit Wasser gefüllt ist, liegt eine Münze (Bild 30/1). Wie kann man die Münze entfernen, ohne ins Wasser greifen zu müssen?  
Man stellt eine Kartoffelscheibe mit drei Streichhölzern in die Untertasse. Zündet man die Streichhölzer an und stülpt sofort ein Glas darüber, so beobachten Sie eine interessante Erscheinung! Führen Sie den Versuch aus und erklären Sie ihn!



30/1

## Zusammenfassung

1. Der durchschnittliche Luftdruck in Meereshöhe beträgt  
 $760 \text{ Torr} = 1,033 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} = 1 \text{ physikalische Atmosphäre}$ .  
Mit welchen Geräten wird er gemessen?
2. Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche ab.  
Warum erfolgt die Druckabnahme in der Lufthülle mit der Höhe nicht linear?
3. Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus dem Druck und dem Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge konstant (Boylesches Gesetz).  
Zeichnen Sie das  $p \cdot V$ -Diagramm!

## 4. Der statische Auftrieb

Auf den Schiffswerften der Deutschen Demokratischen Republik in Warnemünde, Wismar, Rostock und Stralsund werden heute vom Fischereifahrzeug bis zum Ozeandampfer die verschiedensten Schiffstypen gebaut.

Der durchgehende Eisenbahnverkehr über die Ostsee hinweg zwischen Schweden und der DDR wird durch Fährschiffe aufrechterhalten.

Das Bild zeigt die in Warnemünde gebaute „Saßnitz“.



Bereits bei der Konstruktion eines Schiffes werden die verschiedensten Erscheinungen berücksichtigt, die sich aus der Eigenart der Wasserfahrzeuge ergeben; zum Beispiel das Verhalten beim Stapellauf, bei starkem Seegang oder gar beim Leckwerden des Schiffskörpers. Voraussetzung ist die Kenntnis der dabei wirkenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Es können verschiedene Wege beschritten werden, um Gesetzmäßigkeiten in der Natur zu erkennen:

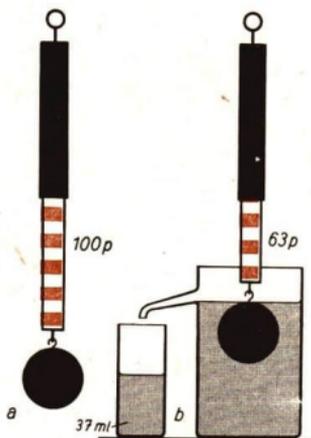
1. Aus vielen einzelnen Beobachtungen, Versuchen und Meßreihen gelangt man zu einem allgemeingültigen Naturgesetz (induktives Vorgehen).
2. Man geht von allgemeingültigen Gesetzen aus, die bereits als richtig erkannt worden sind. Diese Gesetze werden zur Erklärung der zu untersuchenden Naturerscheinung angewandt. Die theoretischen Überlegungen bestätigt man durch Experimente (deduktives Vorgehen).

Am Beispiel des Archimedischen Prinzips, eines wichtigen physikalischen Gesetzes, sollen diese beiden Wege erläutert werden.

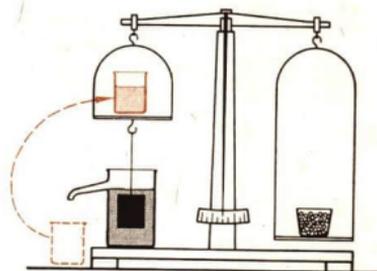
### 4.1. Das Archimedische Prinzip

Zu den Aufgaben der Rettungsschwimmerprüfung gehört auch das Herausholen eines schweren Gegenstandes aus einer bestimmten Wassertiefe. Während sich der Gegenstand im Wasser mit Leichtigkeit bewegen läßt, ist er nur mit großer Mühe aus dem Wasser zu heben. Kennen Sie andere Beispiele dieser Art?

Viele Beobachtungen scheinen zu bestätigen, daß ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper an Gewicht verliert. Da aber die Schwerkraft nach wie vor existiert, kann der



32/1 Die Aluminiumkugel hat an der Luft das Gewicht 100 p, im Wasser das Gewicht 63 p. Der Auftrieb beträgt 37 p. Die verdrängte Wassermenge von 37 cm<sup>3</sup> hat ebenfalls das Gewicht 37 p



32/2 1. Die Waage war vor dem Eintauchen des Körpers austariert, das heißt im Gleichgewicht.

2. Beim Einsenken des Körpers in Spiritus kommt die Waage aus dem Gleichgewicht. An der linken Schale wirkt zusätzlich der Auftrieb. Die verdrängte Spiritusmenge wird in das Becherglas gegossen. Die Waage kommt wieder in das Gleichgewicht. Der Auftrieb ist demnach zahlenmäßig gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit

Körper nicht leichter geworden sein. Die *scheinbare* Gewichtsverminderung ist auf das Wirken einer Kraft zurückzuführen, die dem Gewicht entgegenwirkt und **Auftrieb** heißt.

Die Größe des Auftriebs läßt sich experimentell auf verschiedene Weise bestimmen (Bild 32/1 und 32/2). Aus diesen und vielen anderen Versuchen erkennt man die als **Archimedisches Prinzip** bezeichnete Gesetzmäßigkeit:

**Der Auftrieb  $F_A$  eines Körpers ist gleich dem Gewicht  $G_{F_1}$  der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge.**

Das Gesetz des Auftriebs wurde hier nach dem induktiven Verfahren gewonnen. Man kann zur Ableitung dieses Gesetzes aber auch das deduktive Verfahren anwenden:

Im Abschnitt 2.4. wurden die Gesetzmäßigkeiten des Schweredruckes in einer Flüssigkeit erläutert. Das ist unser Ausgangspunkt.

Wir stellen uns einen Quader vor, der sich in einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Gefäß befindet (Bild 32/3). Von allen Seiten wirken auf den Quader Druckkräfte. Die Druckkräfte gegen die Seitenflächen heben einander auf, da sie in jeder Flüssigkeitsschicht gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind.

Anders ist es mit den Kräften, die auf die Grundfläche und die Deckfläche wirken. Die Kraft  $F_1$  drückt den Quader nach unten, während die Kraft  $F_2$  den Quader hebt. Da der Schweredruck mit



32/3

der Tiefe zunimmt, ist  $F_2$  stets größer als  $F_1$ . Die Differenz  $F_2 - F_1$  ist der Auftrieb  $F_A$ . Er wirkt dem Gewicht des Quaders entgegen.

Die Differenz kann berechnet werden. Der in jeder Tiefe herrschende Druck ergibt sich aus der Gleichung:

$$p = h \cdot \rho_{F1} \cdot g.$$

Andererseits gilt für den Druck auch die Gleichung:

$$p = \frac{F}{A}.$$

Durch Gleichsetzen erhält man:  $\frac{F}{A} = h \cdot \rho_{F1} \cdot g$  beziehungsweise  $F = h \cdot \rho_{F1} \cdot g \cdot A$ .

Die nach unten wirkende Druckkraft  $F_1$  beträgt:  $F_1 = h_1 \cdot \rho_{F1} \cdot g \cdot A$ .

Für die nach oben wirkende Druckkraft  $F_2$  gilt entsprechend:  $F_2 = h_2 \cdot \rho_{F1} \cdot g \cdot A$ .

Somit ergeben sich für den Auftrieb die Gleichungen:

$$F_A = F_2 - F_1$$

$$F_A = (h_2 \cdot \rho_{F1} \cdot g \cdot A) - (h_1 \cdot \rho_{F1} \cdot g \cdot A); \quad F_A = \rho_{F1} \cdot g \cdot A (h_2 - h_1).$$

$A$  ist die Grundfläche bzw. die gleich große Deckfläche und  $h_2 - h_1$  die Höhe des Quaders. Mithin ist  $A \cdot (h_2 - h_1)$ , das Produkt aus Grundfläche und Höhe, das Eintauchvolumen  $V$  des Quaders.

$$V = A \cdot (h_2 - h_1).$$

Der Auftrieb beträgt also:  $F_A = V \cdot \rho_{F1} \cdot g$ .

Das Eintauchvolumen  $V$  des Quaders ist gleich dem Volumen der vom Quader verdrängten Flüssigkeitsmenge. Da  $\rho_{F1}$  die Dichte der Flüssigkeit ist, ergibt sich unter Berücksichtigung von

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{und} \quad G = m \cdot g:$$

$$F_A = m_{F1} \cdot g$$

$$F_A = G_{F1}$$

(4)

**Der Auftrieb eines Körpers ist gleich dem Gewicht der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge.**

Die Richtigkeit des hier deduktiv gewonnenen Lehrsatzes kann durch die schon genannten Versuche für jeden Körper bestätigt werden.

### Beispiel

Welchen Auftrieb erfährt ein Sandkern beim Gießen, wenn das vom flüssigen Metall umspülte Volumen  $120 \text{ cm}^3$  und die Dichte des Gußeisens  $7,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  beträgt?

Gegeben :

$$V = 120 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{\text{Fl}} = 7,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Gesucht :

$$F_A \text{ (in N)}$$

Der Auftrieb des Kerns beträgt 0,912 kp.

Lösung :

$$F_A = V \cdot \rho_{\text{Fl}} \cdot g$$

$$F_A = 120 \text{ cm}^3 \cdot 7,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$F_A = 8,95 \cdot 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2} = 8,95 \cdot 10^5 \text{ dyn}$$

$$\underline{\underline{F_A = 8,95 \text{ N}}}$$

(Wandeln Sie diesen Wert in die Einheit kp um!)

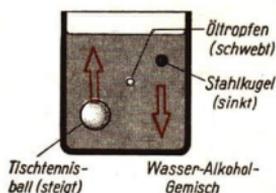
## 4.2. Schwimmen und Schweben

Das Verhalten eines vollständig in eine Flüssigkeit eingetauchten Körpers wird durch die Beziehungen zwischen Gewicht und Auftrieb bestimmt. Das Gewicht des Körpers kann größer oder kleiner als der Auftrieb sein. Selten ist der Fall, daß Gewicht und Auftrieb gerade übereinstimmen.



34/1 Taucher mit Unterwasserkamera

34/2 In einem Wasser-Alkohol-Gemisch bestimmter Konzentration kann man einen Öltröpfchen zum Schweben bringen



Ist  $G > F_A$ , so wirkt eine resultierende Kraft ( $G - F_A$ ) nach unten; der Körper sinkt zu Boden. Bei  $G < F_A$  wirkt eine resultierende Kraft ( $F_A - G$ ) nach oben; der Körper steigt empor. Für den Fall, daß  $G = F_A$  ist, hat die resultierende Kraft den Wert Null; der Körper verändert seine Höhenlage nicht, er schwebt (Bild 34/2).

Ein vollständig eingetauchter Körper  $\left\{ \begin{array}{l} \text{sinkt,} \\ \text{schwebt,} \\ \text{steigt} \end{array} \right\}$  wenn sein Gewicht  $\left\{ \begin{array}{l} \text{größer als der} \\ \text{gleich dem} \\ \text{kleiner als der} \end{array} \right\}$  Auftrieb ist.

Ist  $G < F_A$ , so steigt der Körper nach oben. Sein Auftrieb ändert sich zunächst nicht. Sobald der Körper beim Emporsteigen die Flüssigkeitsoberfläche durchstößt, wird

der Auftrieb kleiner. Er nimmt ab, bis er schließlich ebenso groß wie das Gewicht des Körpers ist. Ist dies erreicht, so schwimmt der Körper, ohne seine Höhenlage weiter zu ändern.

**Das Gewicht eines schwimmenden Körpers ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit.**

### 4.3. Dichtemessung von festen Körpern und Flüssigkeiten

Das Archimedische Prinzip bietet die Möglichkeit, die Dichte fester Körper und von Flüssigkeiten verhältnismäßig einfach zu bestimmen.

#### 4.3.1. Dichtemessung fester Körper

Die Dichte eines festen Körpers ist definiert als Quotient aus Masse und Volumen:

$$\rho_{\text{fest}} = \frac{m}{V}$$

Aus dem Archimedischen Prinzip

$$F_A = V \cdot \rho_{F1} \cdot g$$

erhält man:

$$V = \frac{F_A}{\rho_{F1} \cdot g}$$

Setzt man diesen Wert in die vorhergehende Gleichung ein, so ergibt sich für die Dichte:

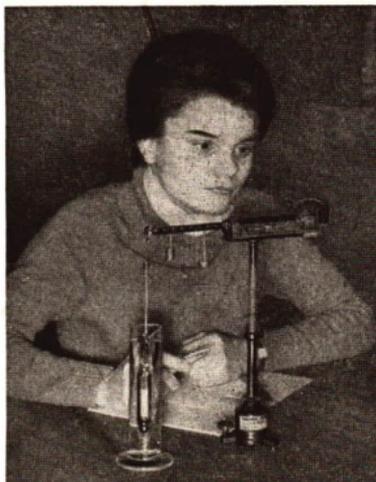
$$\rho_{\text{fest}} = \frac{m \cdot g}{F_A} \cdot \rho_{F1}$$

Das Produkt  $m \cdot g$  ist nichts anderes als das Gewicht des festen Körpers, das heißt:

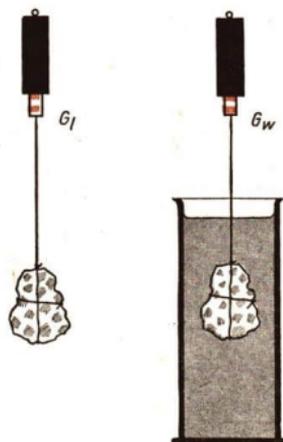
$$\rho_{\text{fest}} = \frac{G}{F_A} \cdot \rho_{F1}$$

Verwendet man als Flüssigkeit Wasser, so ist die Bestimmung der Dichte außerordentlich einfach (Bild 35/2).

$$\rho_{\text{fest}} = \frac{G}{F_A} \cdot 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$



35/1 Dichtebestimmung einer Flüssigkeit mit einer Mohr-Westphalschen Waage. Die Wirkungsweise beruht auf dem unterschiedlichen Auftrieb des Senkkörpers in Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte



35/2 Dichtebestimmung eines festen Körpers. Das Gewicht in Luft und in Wasser wird bestimmt. Die Differenz beider Werte ist der Auftrieb.  $F_A = G_L - G_W$

### Beispiel

Welche Dichte hat ein Granitstein, der an Luft 50 p, in Wasser 32 p wiegt?

Gegeben:

$$G_L = 50 \text{ p}$$

$$G_W = 32 \text{ p}$$

$$\rho_{Fl} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Gesucht:

$$\rho_{\text{test}} \text{ (in } \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)}$$

Die Dichte von Granit beträgt  $2,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Lösung:

$$\rho_{\text{test}} = \frac{G_L}{G_L - G_W} \cdot \rho_{Fl}$$

$$\rho_{\text{test}} = \frac{50 \text{ p}}{18 \text{ p}} \cdot 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\rho_{\text{test}} \approx \underline{\underline{2,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}}$$

### 4.3.2. Dichtemessung von Flüssigkeiten

Aus dem Archimedischen Prinzip  $F_A = V \cdot \rho_{Fl} \cdot g$  läßt sich auch  $\rho_{Fl}$  bestimmen, wenn man Volumen und Auftrieb eines Meßkörpers durch den Versuch (Bild 36/1) ermittelt.

$$\rho_{Fl} = \frac{F_A}{V \cdot g}$$

### Beispiel

Ein Stahlzylinder von 2 cm Durchmesser und 10 cm Länge wiegt in Luft 224 p, in Benzin 202 p. Wie groß ist die Dichte von Benzin?

Gegeben:

$$G_L = 224 \text{ p}$$

$$G_B = 202 \text{ p}$$

$$d = 2 \text{ cm}$$

$$h = 10 \text{ cm}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Gesucht:

$$\rho_{Fl} \text{ (in } \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)}$$

Lösung:

$$\rho_{Fl} = \frac{F_A}{V \cdot g}$$

$$\rho_{Fl} = \frac{G_L - G_B}{r^2 \pi h g}$$

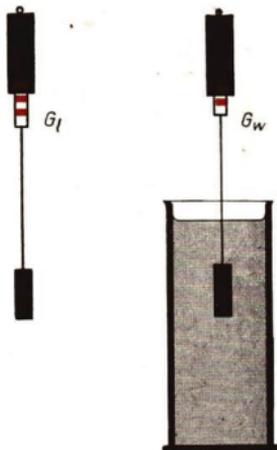
$$\rho_{Fl} = \frac{22 \text{ p} \cdot \text{s}^2}{31,4 \text{ cm}^3 \cdot 981 \text{ cm}}$$

Die inkohärente Krafteinheit Pond muß in die Krafteinheit dyn ( $\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ) umgewandelt werden:  $1 \text{ p} = 981 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$  (da  $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

$$\rho_{Fl} = \frac{22 \cdot 981 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2}{31,4 \text{ cm}^3 \cdot 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^2}$$

$$\rho_{Fl} \approx \underline{\underline{0,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}}$$

Die Dichte von Benzin beträgt etwa  $0,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .



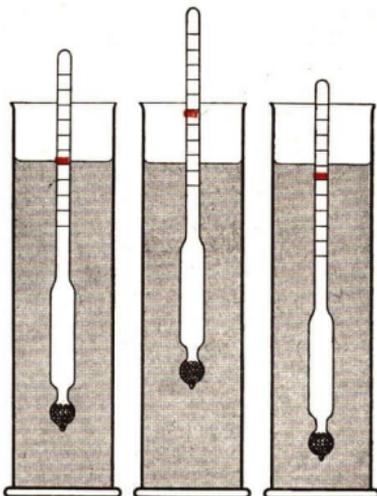
36/1 Dichtebestimmung eines flüssigen Körpers. Das Volumen des Stahlzylinders wird durch Berechnung ermittelt. Mit der Federwaage wird  $F_A$  bestimmt.  $F_A = G_L - G_W$

Die Dichtebestimmung von Flüssigkeiten ist besonders in der chemischen Industrie wichtig, aber auch in der Lebensmittelindustrie. Zum Messen der Dichte benutzt man häufig besondere Geräte, die Senkspindel oder Aräometer genannt werden (Bild 37/1).

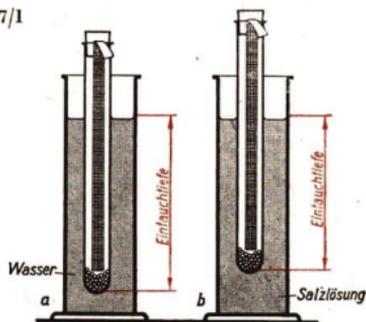
37/1 Aräometer. Die Eintauchtiefe richtet sich nach der Dichte der Flüssigkeit. Der Schwimmkörper taucht so weit ein, bis das stets gleichbleibende Gewicht und der Auftrieb gleich groß sind

### Versuche, Fragen, Aufgaben

- Ein Körper mit einem Gewicht von 100 p wiegt in Wasser 60 p, in Alkohol 68 p. Wie groß ist die Dichte von Alkohol?  
Hinweis: Das Volumen des Körpers läßt sich aus der zweiten Zahlenangabe bestimmen! Benutzen Sie den Rechenstab!
- In einem Topf schwimmt ein Spielzeugschiff aus Blech. Der Wasserstand im Topf wird markiert. Jetzt strömt durch ein Loch Wasser in den Hohlraum des Schiffchens, so daß es vollläuft und bis zum Topfboden sinkt. Wie verändert sich der Wasserstand? Steigt oder sinkt er, oder bleibt er gleich hoch? Begründen Sie Ihre Meinung nach dem Archimedischen Prinzip!
- Bauen Sie sich nach Bild 37/2 ein behelfsmäßiges Aräometer und erproben Sie es in verschiedenen Flüssigkeiten! (Salzlösungen verschiedener Konzentration!)
- Das an der Federwaage hängende Massestück wird in das Becherglas getaucht (Bild 37/3). Was geschieht? — Führen Sie den Versuch auch selbst aus und schreiben Sie ein Versuchsprotokoll. Welche Gesetzmäßigkeit erkennen Sie, wenn die Hebelwaage wieder ins Gleichgewicht gebracht wird? (3. Newtonsches Axiom!)
- König Hiero von Syrakus (etwa 250 v. u. Ztr.) gab einem Goldschmied den Auftrag, aus einer bestimmten Masse Gold eine Krone anzufertigen. Die abgelieferte Krone hatte auch tatsächlich das Gewicht des Goldes. Trotzdem argwöhnte Hiero, daß ein Teil des Goldes durch Silber ersetzt worden sei. Er beauftragte den an seinem Hof lebenden ARCHIMEDES, diesen „Kriminalfall“ zu klären. Als ARCHIMEDES eines Tages im Bad saß, kam ihm der erleuchtende Gedanke. Unter dem

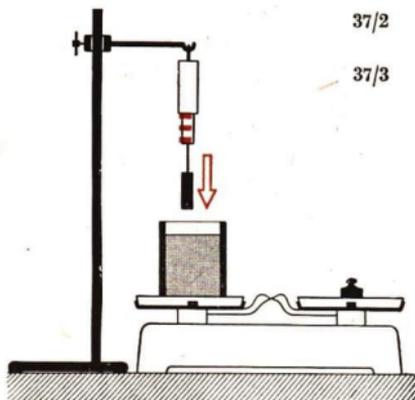


37/1



37/2

37/3



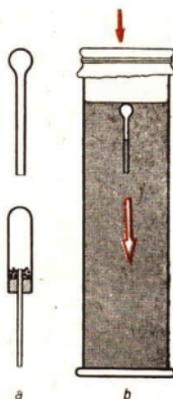
Ruf „Heureka“ (ich habe es gefunden) rannte er spornstreichs nach Hause, um einen entsprechenden Versuch auszuführen. Wie konnte ARCHIMEDES die tatsächlich begangene Fälschung entdecken? Hinweis: Der rettende Gedanke kam ihm im Bad, als er in die Wanne stieg! ARCHIMEDES hatte bei der Untersuchung die Krone und einen Goldklumpen gleichen Gewichts zur Verfügung!

(Die Echtheit dieser Erzählung ist nicht verbürgt.)

6. Bauen Sie sich einen sogenannten cartesischen Taucher nach Bild 38/1. Der „Taucher“ kommt in eine wassergefüllte Flasche, die durch ein Gummituch abgedunden wird. Drückt man auf den Gummi, so sinkt das Fläschchen nach unten. Es steigt wieder empor, wenn der Druck aufhört. Wie erklären Sie sich diese Erscheinung? Hinweis: Sollte der „Taucher“ nicht nach unten sinken, so ist etwas Wasser in das Fläschchen zu bringen, damit der „Taucher“ schwerer wird.

7. Ein Gummistopfen wird auf den Boden eines Becherglases gelegt und mit dem Finger angedrückt. Füllt man Quecksilber ein, so kann man den Stopfen loslassen, ohne daß er nach oben steigt. Die Dichte des Gummis ist aber doch viel kleiner als die des Quecksilbers! Dann müßte auch  $F_A > G$  sein! Durchdenken Sie den Sachverhalt an Hand der deduktiven Herleitung des Archimedischen Prinzips! (Wie groß ist  $F_2$ ?)

8. Schichten Sie vorsichtig reines Wasser über eine konzentrierte Kochsalzlösung. Ein gekochtes Hühnerei, das man vorsichtig in das Wasser gleiten läßt, bleibt stets in der Grenzschicht. Schwebt oder schwimmt das Hühnerei? Geben Sie eine ausführliche Erklärung!



38/1

## Zusammenfassung

1. Der Auftrieb eines Körpers ist gleich dem Gewicht der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge (Archimedisches Prinzip).

Warum steigt ein gasgefüllter Ballon in Luft empor?

2. Ein vollständig eingetauchter Körper sinkt, wenn sein Gewicht größer als der Auftrieb ist.

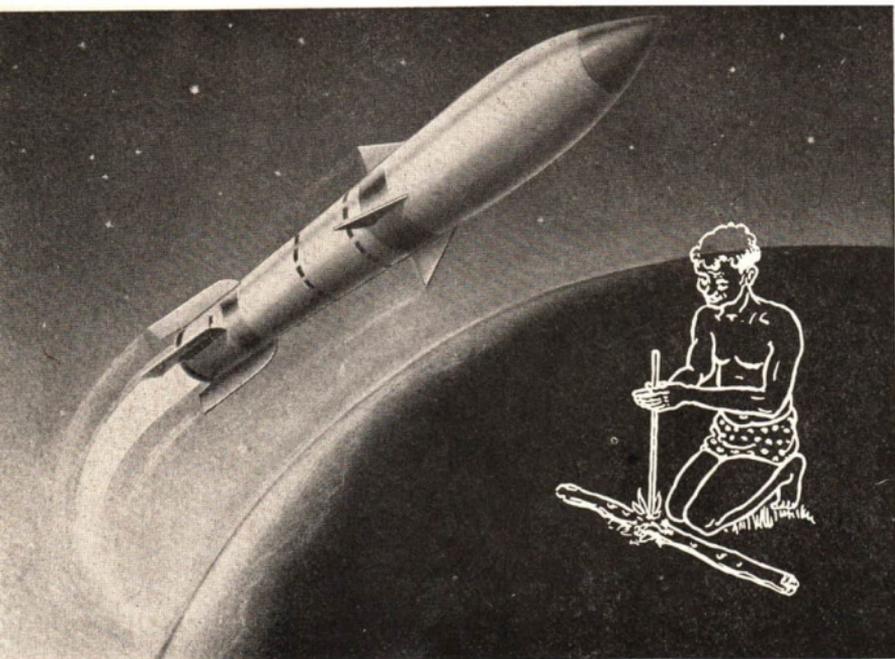
Ein vollständig eingetauchter Körper schwebt, wenn sein Gewicht gleich dem Auftrieb ist.

Ein vollständig eingetauchter Körper steigt empor, wenn sein Gewicht kleiner als der Auftrieb ist.

Nennen Sie zu jedem Satz ein Beispiel!

3. Das Gewicht eines schwimmenden Körpers ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit.

Warum schwimmen stählerne Schiffe?



## 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<sup>1</sup> 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 CLAUDIUS (1857), MAXWELL (1860) und BOLZMANN (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.



<sup>1</sup> von phlogion  
(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  $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$  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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  eine Länge von  $25\text{ m}$ . Wie groß ist die Längenänderung, wenn die Temperatur von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ansteigt und der lineare Ausdehnungskoeffizient des Stahles  $0,0000115\text{ grad}^{-1} = 1,15 \cdot 10^{-5}\text{ grad}^{-1}$  beträgt?

Lösungsweg:

Man bezeichnet die Länge der Brücke bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit  $l_0$ ,

$l_0 = 25\text{ m}$ .

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

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

$$\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

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

Zwischen den genannten Größen besteht die Beziehung

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (5)$$

Das bedeutet, daß die Längenänderung  $\Delta l$  der Länge  $l_0$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta t$  direkt proportional ist.  $\alpha$  ist der Proportionalitätsfaktor und stellt eine Materialkonstante dar, in unserem Falle für Stahl.

*Lösung des gegebenen Beispiels:*

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

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

$$\Delta l = 25 \text{ m} \cdot 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ grad}^{-1} \cdot 20 \text{ grad} \quad \Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} = 20 \text{ grad}$$

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

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  $\Delta l$  unsere gefundene Gleichung (5) ein, so ergibt sich

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

**Gleichung für die Ausdehnung fester Körper**

$$l_1 = l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (6)$$

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  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , aber auch von  $t_1 = -60 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $t_2 = -35 \text{ }^\circ\text{C}$ ). 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  $\alpha$  durch den *kubischen Ausdehnungskoeffizienten*  $\gamma$  und die Längen  $l_0$  und  $l_1$  durch die Volumina  $V_0$  (d. h. das Volumen bei  $0^\circ\text{C}$ ) und  $V_1$ .

#### Gleichung für die Ausdehnung flüssiger Körper

$$V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t) \quad (7)$$

Es gilt  $\gamma \approx 3\alpha$ . Auf den mathematischen Beweis sei an dieser Stelle verzichtet. Die Gleichung (7) gilt für die Anfangstemperatur  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . 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  $0^\circ\text{C}$ , eine Quecksilbermenge mit einem Volumen von  $0,8\text{ cm}^3$ . Wie groß ist das Volumen dieser Quecksilbermenge bei  $40^\circ\text{C}$  (für Quecksilber  $\gamma = 1,8 \cdot 10^{-4}\text{ grad}^{-1}$ )?*

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<sup>1</sup>

$$V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t) \quad (8)$$

Beachte:  $p = \text{const}$

Diese Gleichung gilt nur für eine Anfangstemperatur von  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . 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  $\Delta t$  beim Zusammenziehen einen negativen Wert annimmt.

- *Gichtgas kommt mit einer Temperatur von  $250^\circ\text{C}$  aus dem Hochofen. Welches Volumen hätte  $1\text{ m}^3$  dieses Gases, wenn es anschließend bei konstantem Druck auf  $0^\circ\text{C}$  abgekühlt würde ( $\gamma = \frac{1}{273}\text{ grad}^{-1}$ )?*

<sup>1</sup> auch Gay-Lussacsches Gesetz genannt

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

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

$$V_1 = V_0(1 - 1)$$

$$V_1 = 0.$$

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 Temperaturskala, der Kelvinskala, gemacht. Sie liegt nach genauen Ermittlungen bei  $-273,15^\circ\text{C}$ <sup>1</sup>. Dieser Ausgangspunkt der Kelvinskala heißt auch *absoluter Nullpunkt* ( $0^\circ\text{K}$ ), die Kelvinskala auch *absolute Temperaturskala*.

$^\circ\text{K}$		$^\circ\text{C}$
373,15 $^\circ\text{K}$	Siedepunkt des Wassers	100 $^\circ\text{C}$
351 $^\circ\text{K}$	Siedepunkt des Alkohols	?
273,15 $^\circ\text{K}$	Eispunkt	0 $^\circ\text{C}$
?	Schmelzpunkt d. Quecksilbers	-39 $^\circ\text{C}$
0 $^\circ\text{K}$	absoluter Nullpunkt	-273,15 $^\circ\text{C}$

44/1 Vergleich zwischen der Celsius- und der Kelvinskala

- Entnehmen Sie die Beziehungen zwischen der Celsiusskala und der Kelvinskala dem Bild 44/1!

Es gilt die Beziehung

$$T/^\circ\text{K} = 273 + t/^\circ\text{C}$$

wobei  $T$  in Grad Kelvin ( $^\circ\text{K}$ ) und  $t$  in Grad Celsius ( $^\circ\text{C}$ ) 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 ( $^\circ\text{K}$ ) 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-

<sup>1</sup> Wir werden mit  $-273^\circ\text{C}$  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:



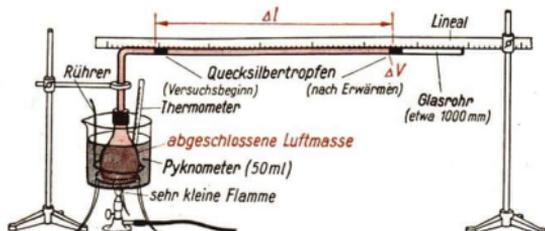
45/1  
GAY-LUSSAC (1778 bis 1850)

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).

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

### 1.2.1. Erstes Gay-Lussacsches Gesetz ( $p = \text{const}$ )

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 cm <sup>3</sup> )	$\frac{V}{T}$ (in cm <sup>3</sup> · °K <sup>-1</sup> )	$T$ (in °K)	$V$ (in cm <sup>3</sup> )	$\frac{V}{T}$ (in cm <sup>3</sup> · °K <sup>-1</sup> )
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:  $p = \text{const}$

- Stellen Sie die in der Tabelle 1 enthaltenen Werte grafisch dar! Beachten Sie, daß die Bezifferung der Koordinaten erst bei etwa 50 cm<sup>3</sup> 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*<sup>1</sup> *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:

$$\boxed{\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}} \quad (9)$$

Beachte:  $p = \text{const}$

**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 m<sup>3</sup> eines Gases mit einer Temperatur von 283 °K werden bei konstantem Druck auf 393 °K erwärmt. Wie groß ist das Volumen bei dieser Temperatur?

<sup>1</sup> isos (griech.): gleich      barys (griech.): schwer

Gegeben :

$$p = \text{const}$$

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

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

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

Gesucht :

$$V_2 \text{ (in m}^3\text{)}$$

Das Volumen beträgt etwa 4,2 m<sup>3</sup>.

● Ein Gas, das bei  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  ein Volumen von  $0,5 \text{ m}^3$  einnimmt, wird bei konstantem Druck auf  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt. Wie ändert sich das Volumen?

Lösung :

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

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

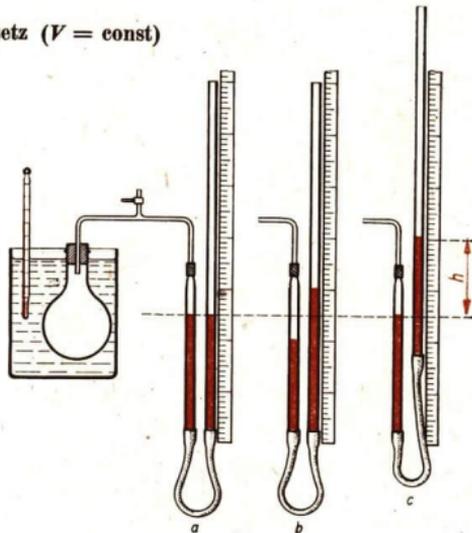
$$V_2 = \frac{3 \text{ m}^3 \cdot 393 \text{ }^\circ\text{K}}{283 \text{ }^\circ\text{K}}$$

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

### 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 Röhrenchen 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 grad. 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 grad 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 <sup>-1</sup> )	$T$ (in °K)	$p$ (in Torr)	$\frac{p}{T}$ (in Torr · °K <sup>-1</sup> )
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*<sup>1</sup> 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:

$$\boxed{\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}} \quad (10)$$

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 eingebaulten 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?

<sup>1</sup> choros (griech.): Raum

Gegeben :

$$V = \text{const}$$

$$p_1 = 130 \text{ at}$$

$$T_1 = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 298 \text{ }^\circ\text{K}$$

Gesucht :

$$p_2 \text{ (in at)}$$

Der Druck steigt auf 134,5 at.

Lösung :

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

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

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

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

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	$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta t$ $V = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$ <p style="text-align: center;"><b>1</b></p>	$p = p_0 \cdot \gamma \cdot \Delta t$ $p = p_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$ <p style="text-align: center;"><b>2</b></p>
Koeffizient	Ausdehnungskoeffizient $\gamma = \frac{1}{273} \text{ grad}^{-1}$	Spannungskoeffizient $\gamma = \frac{1}{273} \text{ grad}^{-1}$
Beziehungen unter Verwendung der Kelvinskale	$V \sim T$ <p style="text-align: center;"><b>3</b></p>	$p \sim T$ <p style="text-align: center;"><b>4</b></p>
Beziehungen unter Berücksichtigung von 2 Zuständen	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ <p style="text-align: center;"><b>5</b></p>	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ <p style="text-align: center;"><b>6</b></p>

- 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 grad 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 m<sup>3</sup> auf 2 m<sup>3</sup> (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  $T_2$ :

- Wie groß ist  $T_2$ ? Drücken Sie  $T_2$  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 ( $p_1$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ ) erreicht man den Endzustand ( $p_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ ). Durch Einsetzen des gefundenen Wertes für  $T_2$  finden wir nach Ordnen die allgemeine Zustandsgleichung der Gase.

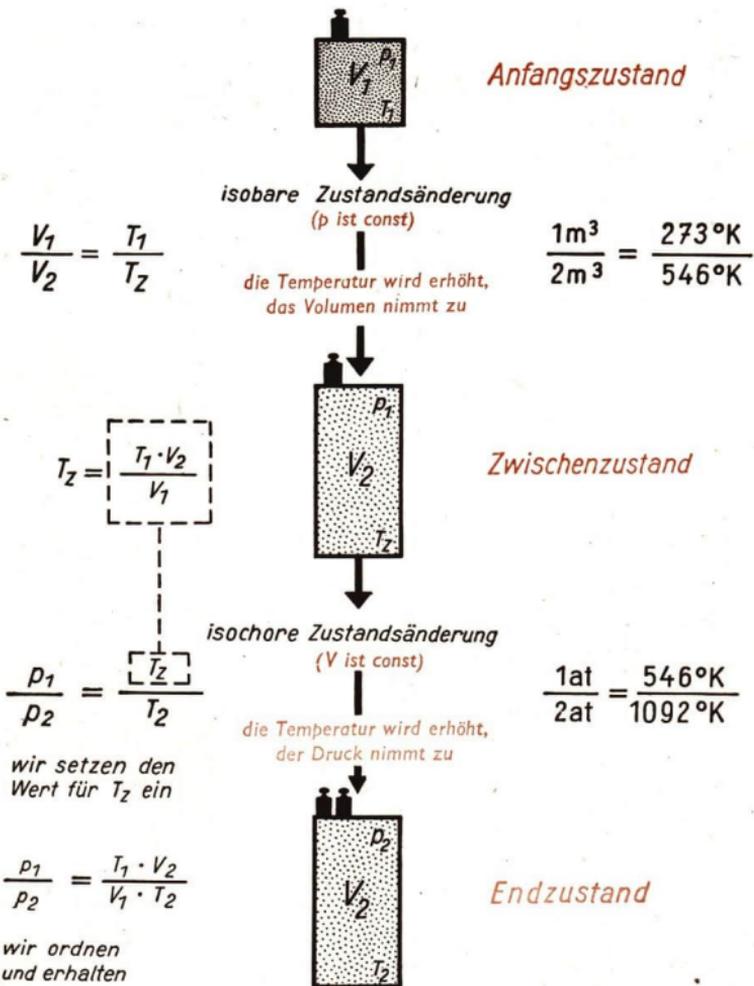
**Bei einer abgeschlossenen Gasmasse ist das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die absolute Temperatur, konstant.**

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

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?



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

**Allgemeine Zustandsgleichung der Gase**

Gegeben :

$$p_1 = 150 \text{ at}$$

$$p_2 = 2 \text{ at}$$

$$V_1 = 40 \text{ l}$$

$$T_1 = 288 \text{ °K}$$

$$T_2 = 293 \text{ °K}$$

Gesucht :

$$V_2 \text{ in Liter}$$

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  $T_2$ ):

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

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.

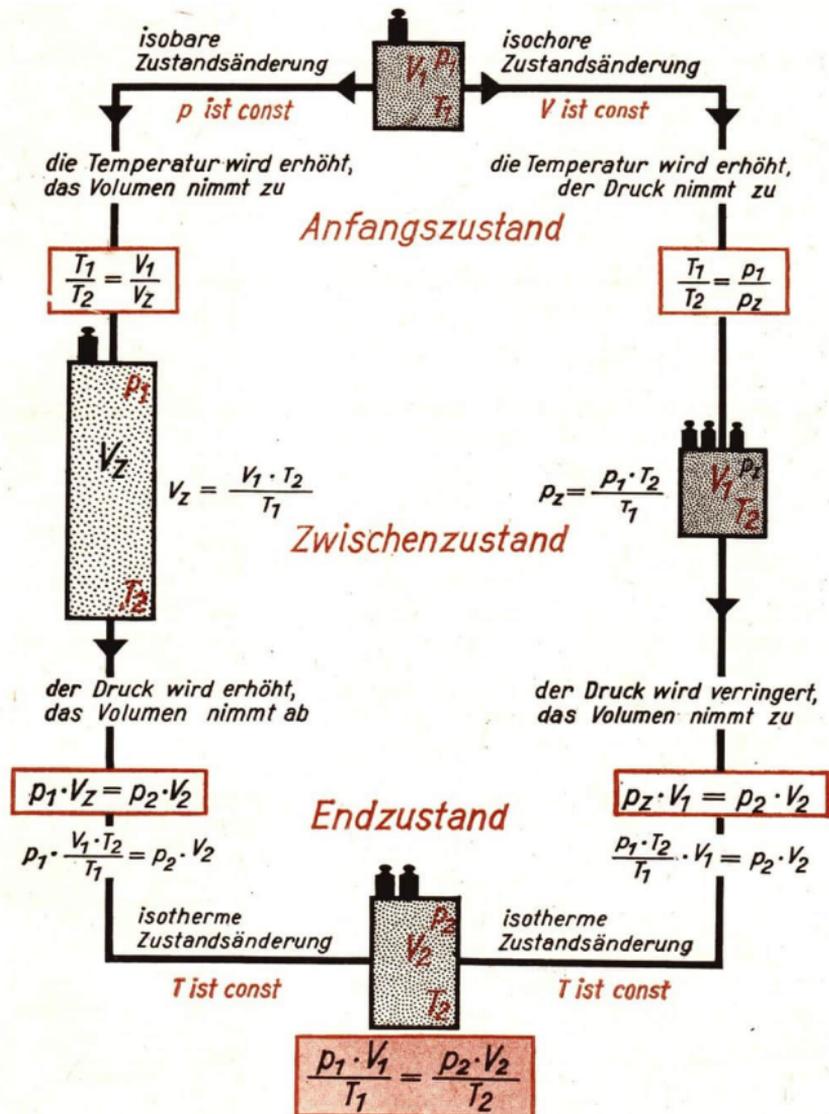
- Studieren Sie das Bild auf Seite 53!

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  $p_1, p_2, V_1, V_2$  bzw.  $p_2, p_1, V_1, V_2$ )
6. Setzen Sie in diese Gleichung für  $V_2$  bzw.  $p_2$  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!



## 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

$$p_1 \cdot V_1 = \text{const} \cdot T_1. \quad (12.1)$$

In dieser Form lautet die allgemeine Zustandsgleichung:

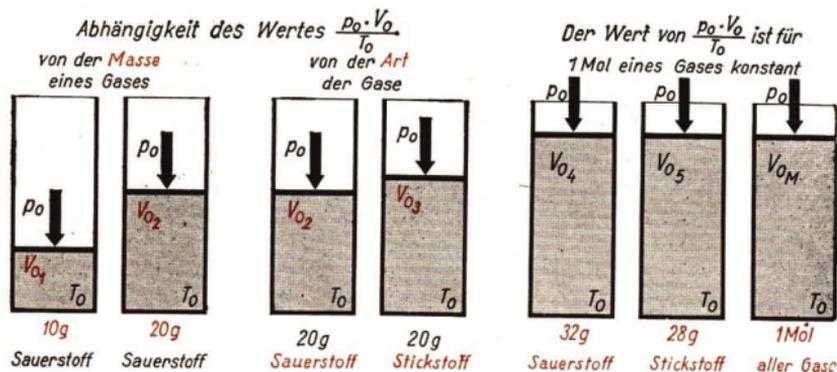
**Bei einer gegebenen Gasmasse ist das Produkt aus Druck und Volumen der absoluten Temperatur proportional.**

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  $T_0 = 273^\circ\text{K}$ . 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  $0^\circ\text{C}$   $2,688 \cdot 10^{19}$  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 Mole eines Gases betrachten, weil 1 Mol eines Gases bei 760 Torr und  $0^\circ\text{C}$  stets ein Volumen von 22,4 l hat. Wir bezeichnen diese Größe als *Molvolumen*  $V_{0M}$ .



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

universelle Gaskonstante  $R$  (nach dem französischen Physiker REGNAULT<sup>1</sup>)

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

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

$$p \cdot V_{0M} = R \cdot T \quad (12.2)$$

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

$$T_0 = 273 \text{ }^\circ\text{K},$$

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

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

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

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

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

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

Es ist dann

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

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-

<sup>1</sup> HENRI VICTOR REGNAULT (1810 bis 1878) prüfte die Ergebnisse GAY-LUSSACS experimentell nach und fand dabei, daß  $\gamma$  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  $T_0 = 273 \text{ °K}$  ( $0 \text{ °C}$ ) und bei dem Luftdruck  $p_0 = 760 \text{ Torr}$  ( $1,033 \text{ at}$ ) hat. Man nennt eine solche Angabe den *Normzustand* eines Gases. Die Umrechnung nennt man *Reduktion* (Zurückführung).

### Beispiel

Gegeben :

$$p_1 = 130 \text{ at}$$

$$T_1 = 293 \text{ °K}$$

$$V_1 = 40 \text{ l}$$

$$p_0 = 1,033 \text{ at}$$

$$T_0 = 273 \text{ °K}$$

Gesucht :

$V_0$  von Sauerstoff (in l) Die Sauerstoffflasche enthält 4690 l Sauerstoff im Normzustand.

Lösung :

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

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

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

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

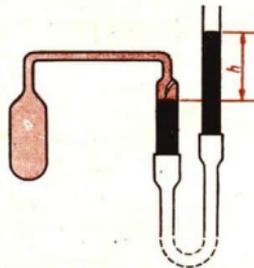
Auf gleiche Weise läßt sich das Volumen des Wasserstoffs im Normzustand ermitteln.

- Berechnen Sie den Inhalt einer 20-l-Wasserstoffflasche im Normzustand, wenn der Druck 48 at und die Temperatur  $24 \text{ °C}$  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!

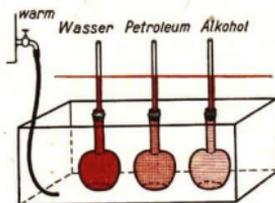
56/1 Gasthermometer. Durch Eis wird die Luft im Glasbehälter auf  $0 \text{ °C}$  gebracht. Im Manometer befindet sich Quecksilber, das genau bis an die Glasspitze im linken Manometerrohr reicht. Beim Erwärmen der Luft im Glasbehälter verändern sich die Höhen der Quecksilbersäulen. Durch Anheben des 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  $0 \text{ °C}$ . Wie groß sind Durchmesser, Höhe und Volumen des Zylinders, wenn er auf  $80 \text{ °C}$  erwärmt wird ( $\alpha_{Al} = 0,000024 \text{ grd}^{-1}$ )?
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  $80 \text{ °C}$ ! Formulieren Sie Ihre Beobachtungen! (Bild 57/1)  
Achten Sie darauf, daß alle 3 Steigrohre den gleichen Innendurchmesser haben.

- Bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  befinden sich in einem Tank  $280\text{ m}^3$  Benzol. Um wieviel nimmt das Volumen des Benzols zu, wenn es um  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  erwärmt wird? ( $p = \text{const}$ ,  $\gamma_{\text{Benzol}} = 0,001229\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Erklären Sie, warum man Behälter nicht *vollständig* mit Flüssigkeiten füllen soll!
- In den Winderhitzer eines Hochofens strömt Luft mit einer Temperatur von  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ein. Berechnen Sie die Volumänderung der Gasmasse, wenn sie den Winderhitzer mit  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  verläßt!
- Bei welcher Temperatur nimmt ein Gas bei gleichbleibendem Druck den doppelten Raum ein wie bei  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
- Eine Stahlflasche für Sauerstoff mit einem Volumen von  $40\text{ l}$  wird bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  unter einem Druck von  $150\text{ at}$  gefüllt. Wieviel Liter kann man unter einem Druck von  $1,5\text{ at}$  bei  $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  entnehmen?
- Eine 8-l-Flasche mit Kohlendioxid, wie sie in Gaststätten zum Ausschanken von Bier und Brause benutzt wird, hat bei einer Temperatur von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  einen Druck von  $12\text{ at}$ . Wie groß ist das Volumen der eingeschlossenen Gasmasse im Normzustand?
- Welchen Vorteil bringt die Verwendung von Wasserstoff statt Luft in einem Gasthermometer mit sich?



57/1

## Zusammenfassung

- 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?

- 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?

- Die absolute Temperaturskala hat als tiefste Temperatur null Grad Kelvin ( $0\text{ }^{\circ}\text{K}$ ).

Welcher Temperatur der Celsiusskala entspricht diese Temperatur?

Was versteht man unter  $T_0$ ?

- 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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  verdoppeln. Um wieviel Grad ( $^{\circ}\text{C}$ ) muß man die Temperatur der Gasmasse erhöhen?

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

Bei welcher Temperatur müßte der Druck einer Gasmasse Null werden?

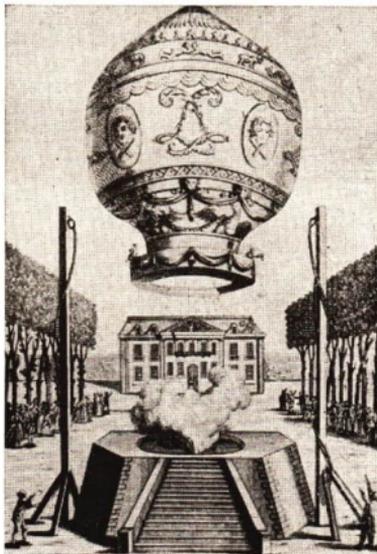
- Bei einer abgeschlossenen Gasmasse ist das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die absolute Temperatur, konstant.

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:

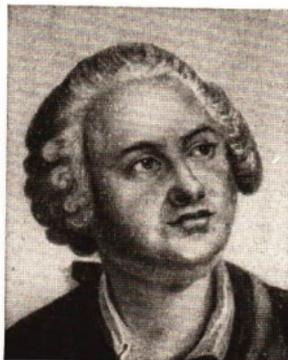
1. Wir werden zwei Betrachtungsweisen unterscheiden: die makroskopische und die mikroskopische oder molekulare Betrachtungsweise.
2. Wir werden die Körper von ihrem molekularen Aufbau her betrachten.
3. Wir werden einige Erscheinungen betrachten, die uns den Aufbau der Körper aus kleinsten Teilen erkennen 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 LUCRETIVUS 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 MICHAEL  
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  $1\ \mu\text{m}$  ausziehen (gewöhnliches menschliches Kopfhaar hat einen Durchmesser von  $67\ \mu\text{m}$ ).

2. Gold für die Vergoldung von Denkmälern usw. läßt sich auf eine Dicke von weniger als  $10\ \mu\text{m}$  ausschlagen.
3. Eine über Wasser ausgedehnte Ölhaut kann eine Dicke von  $0,1\ \text{nm}$  erreichen.
4. Unser Geruch läßt  $10^{-13}\ \text{g Moschus}$  (eine Drüsenabsonderung des Moschusochsen) und  $10^{-16}\ \text{g Alkanthiol (Mercaptan)}$ , 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*<sup>1</sup>, den kleinsten Teilen einer Verbindung, aufgebaut.

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

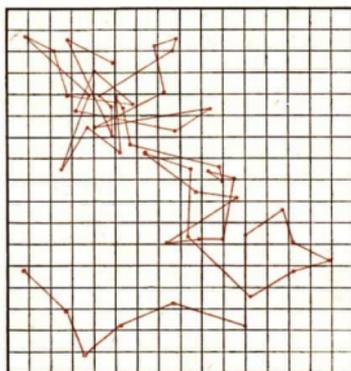
<sup>1</sup> molekula (lat.): kleine Masse

### 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 cm<sup>3</sup> 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).



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.

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

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*.

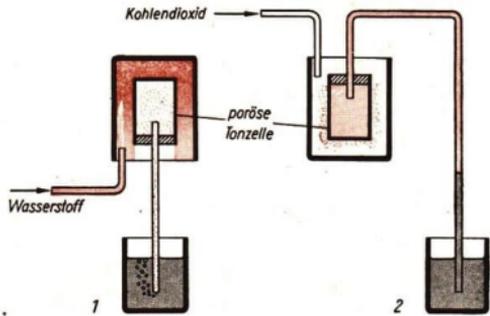
### 2.1.4. Die Diffusion

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  $\rho_1$  und  $\rho_2$ :

$$v_1 : v_2 = \sqrt{\rho_2} : \sqrt{\rho_1}.$$

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

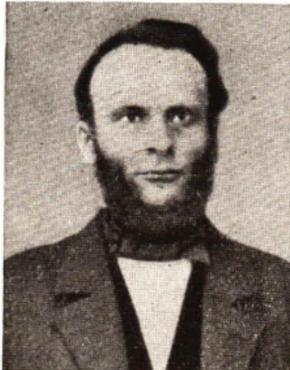
1. Suchen Sie Beispiele für die Teilbarkeit der Körper
  - 1.1. aus dem Unterrichtstag in der Produktion,
  - 1.2. aus dem Haushalt!Geben Sie Größen der Teilchen an, die auftreten können, und vergleichen Sie mit Größen von Molekülen!
2. Nennen Sie Beispiele für Diffusionsvorgänge
  - 2.1. zwischen gasförmigen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

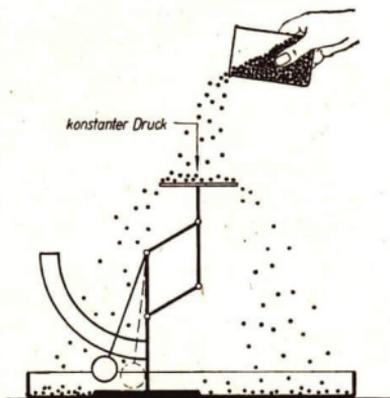
Mit der folgenden *Grundvorstellung* werden diese beiden Eigenschaften der Gase erklärt:

**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 Würfeln einmal eine *Sechs* zu werfen, beträgt  $\frac{1}{6}$ . Das heißt aber nicht, daß sich unter den ersten 6 Würfeln oder jedesmal unter 6 Würfeln der Wurf *Sechs* befindet. Es bedeutet auch nicht, daß eine *Sechs* unter 60 Würfeln 10mal, unter 120 Würfeln 20mal, unter  $n$  Würfeln  $\frac{n}{6}$  mal zustande kommt. Die Angabe der Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{6}$  hat vielmehr folgende Bedeutung: Wenn unter einer großen Anzahl  $w$  von Würfeln  $t$  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 Würfel ist.

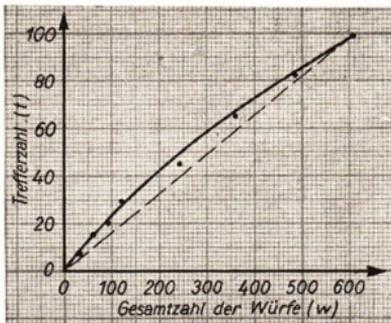
Die folgende Tabelle und das dazugehörige Diagramm (Bild 65/1) erläutern dies an einem Beispiel, bei dem 600mal gewürfelt wurde.

Tabelle 4: Häufigkeit der Treffer („Sechs“) in Abhängigkeit von der Wurfwahl

$w$	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

65/1 Trefferzahl-Gesamtzahl-Diagramm einer Folge von 600 Würfeln mit einem Würfel

Obgleich die relative Trefferhäufigkeit der ersten 120 Würfe von  $\frac{1}{6}$  stark abweicht, ist man, wie man sieht, mit 600 Würfeln der Zahl  $\frac{1}{6} = 0,166\dots$  schon sehr nahe gekommen.



Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Zustandsgrößen der Gase. Bei der großen Zahl der auch in einem kleinen Volumen enthaltenen Gasmoleküle ist es unmöglich, etwa die Zahl der einzelnen Stöße gegen die Gefäßwand festzustellen. Sie weicht aber niemals merklich von einem *Mittelwert* ab und ist somit als konstant anzusehen. Es läßt sich daraus schließen, daß die makroskopisch feststellbaren Zustandsgrößen (der Druck, das Volumen, die Temperatur) durch *Mittelwerte* der molekularen Größen, der Dichte und der Geschwindigkeit der Moleküle bestimmt werden. Sind diese Mittelwerte zeitlich konstant, so spricht man von einem *dynamischen Gleichgewicht*. Bei diesem bleiben die makroskopischen Zustandsgrößen unverändert. In diesem Zusammenhang zwischen molekularen und makroskopischen Zustandsgrößen kommt zum Ausdruck, daß aus einer Vielzahl unregelmäßiger Einzelwirkungen (hier der Moleküle) der Eindruck einer regelmäßigen Gesamtwirkung (hier des Gases) entstehen kann. Je größer die Zahl der Einzelwirkungen ist, desto größer ist im allgemeinen die Wahrscheinlichkeit für die Regelmäßigkeit der Gesamtwirkung.

### 2.2.2. Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

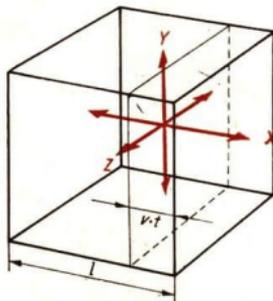
Wir wollen nun untersuchen, welche Gesetzmäßigkeit uns Aufschluß über das Verhältnis des Druckes eines Gases zu seiner Molekülanzahl und der dabei vorhandenen kinetischen Energie gibt.

Zunächst wollen wir zwei Vorgänge aus der Technik beschreiben, die uns zeigen, daß man Vorgänge vereinfachen kann, ohne das Bild einer Erscheinung zu verfälschen.

1. Auf automatischen Drehmaschinen werden zum Beispiel viele tausend Schrauben nacheinander hergestellt. Zur Qualitätsprüfung werden der Produktion jeweils nur einige Schrauben entnommen und unter anderem auf Maßhaltigkeit und Sauberkeit der Verarbeitung geprüft. Erfahrungsgemäß weisen alle nicht geprüften Schrauben fast die gleichen Qualitätsmerkmale auf wie die geprüften.
2. Bei der Prüfung des Staubgehaltes der Luft in Industriebetrieben (Brikettfabrik, Mühlen) entnimmt man der Luft nur wenige Kubikzentimeter, um den Verunreinigungsgrad der Luft zu bestimmen. Ebenso wie im ersten Beispiel kann mit Sicherheit angenommen werden, daß die nicht geprüfte Luftmenge fast die gleiche Zusammensetzung zeigt wie die geprüfte.

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:

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

Der Druck eines Gases ist gleich einem Drittel des Produktes aus der Molekülanzahl in der Volumeneinheit, 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  $l^3 \cdot v \cdot t$  sind es  $N'$  Moleküle.

$N'$  ergibt sich aus der Proportion  $N' : \frac{N}{6} = v \cdot t : l^2 : l^3$ . 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

$$F_{\text{ges}} = N'_0 \cdot F,$$

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

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

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

Für den Gasdruck ergibt sich:

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

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

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

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

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m \cdot v^2}{V} \quad (13.2)$$

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  $n$ <sup>1</sup>. 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<sub>2</sub>) gleich 32 g Sauerstoff. Das Mol eines jeden Gases nimmt bei 0 °C und 760 Torr einen Raum von annähernd 22400 cm<sup>3</sup> 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<sup>2</sup> 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 Meßgenauigkeiten bedingten Fehlern absieht, miteinander gut überein.

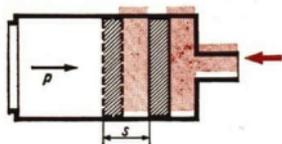
## 2.3. Die Volumenergie einer Gasmenge

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-

<sup>1</sup>  $n$  hat die Einheit m<sup>-3</sup>, dm<sup>-3</sup>, cm<sup>-3</sup> usw., da die Molekülanzahl die Dimension 1 hat.

<sup>2</sup> 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

$$W = p \cdot V. \quad (14.1)$$

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

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

Die kinetische Energie  $W_{kin}$  aller Gasmoleküle  $N$  ist

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

Aus den letzten beiden Gleichungen läßt sich dann ableiten

$$p \cdot V = \frac{2}{3} W_{kin} \quad (14.4)$$

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.**

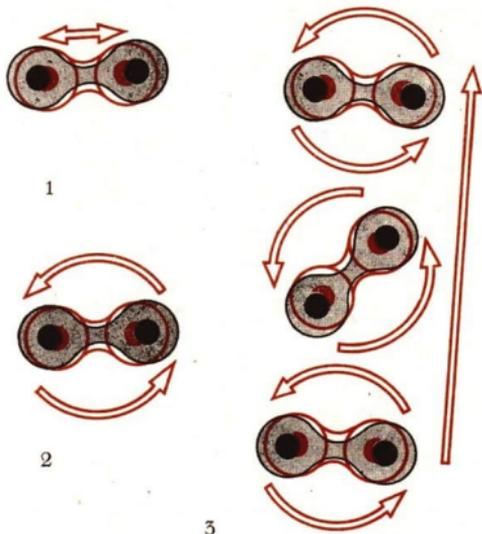
Im philosophischen Sinne bedeutet Bewegung nicht nur die Ortsveränderung eines Gegenstandes im Raum. Sie umfaßt alle vor sich gehenden Prozesse und Veränderungen.

#### 2.4.2. Der Wärmehalt 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.

*Molekular*kinetisch 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):

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

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

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

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

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

und berücksichtigt, daß das Produkt  $n \cdot V_{0M} \cdot m$  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 Gas-moleküle proportional.**

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

$$\frac{W_{kin}}{\text{Mol}} = \frac{3}{2} R \cdot T \quad (16)$$

gegeben ist.

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß bei der absoluten Temperatur  $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$  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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  die Geschwindigkeit von  $492\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Wievielmals trifft es in einer Sekunde auf dieselbe Wand eines würfelförmigen Raumes, wenn die Kantenlänge  $l$  des Raumes  $3\text{ cm}$  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 molekular-kinetisch!
9. Geben Sie eine molekular-kinetische Erklärung des Übergangs vom festen in den flüssigen Zustand beim Schmelzen von Blei!

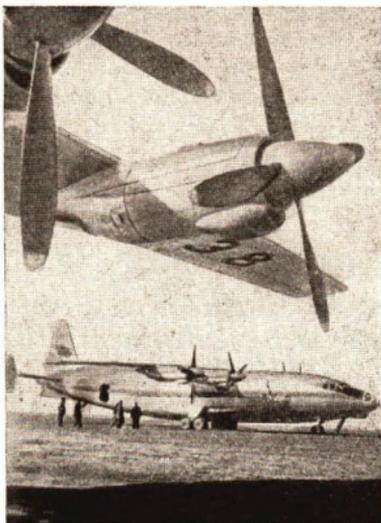
## Zusammenfassung

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 Wärmehalt dieses Körpers.**  
Welche Beziehung zwischen der spezifischen Wärme eines Körpers und seinem Wärmehalt 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  $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}$ )

$\Delta t$ : Temperaturerhöhung (in  $\text{grd}$ )

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.

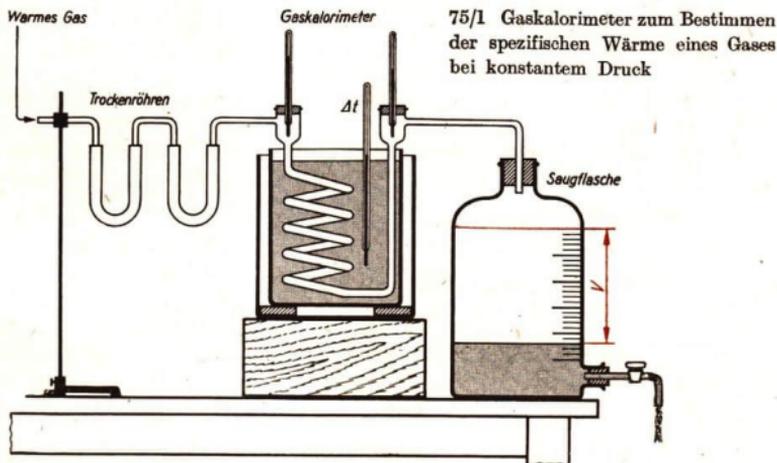
Wir werden zwei Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Wärme der Gase kennenlernen.

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.



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:

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

Kalorimeterflüssigkeit

$$c_p = \frac{W_{ges}}{m_G (T_1 - T_2)}$$

Luft

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

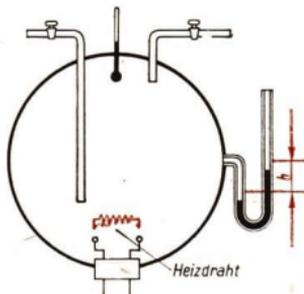
$$c_p = 0,2375 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}.$$

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.

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.



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

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  $\Delta t$  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

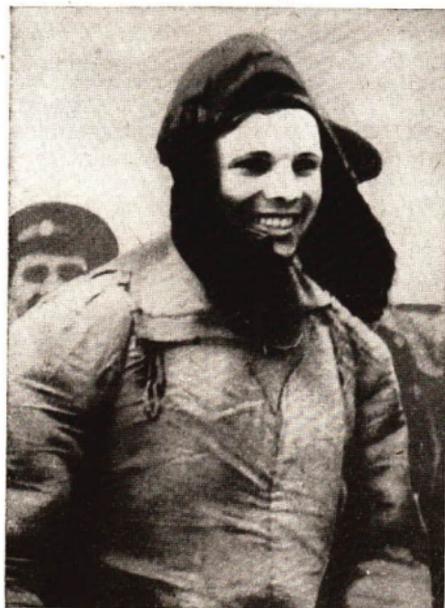
$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Diese Konstante hängt vom Aufbau der Gasmoleküle ab.

Tabelle 5: Spezifische Wärmen einiger Gase

Gas		$c_p$ (in kcal · kg <sup>-1</sup> · grd <sup>-1</sup> )	$c_v$ (in kcal · kg <sup>-1</sup> · grd <sup>-1</sup> )	$\kappa$
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  $\kappa$  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 ( $\kappa$ ) ist eine für die Berechnung von thermischen Prozessen außerordentlich bedeutungsvolle Größe.



### 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

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

die zu diesem Zwecke angebrachte Wärmeschutzschicht der Kabine infolge der frei werdenden Reibungswärme verglühte und verdampfte.

Die mechanische Arbeit, die angewendet 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 Bohrspannmenge. 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<sup>3</sup> 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<sup>-3</sup> beträgt, enthält jeder Zylinder 1,293 kg Luft.

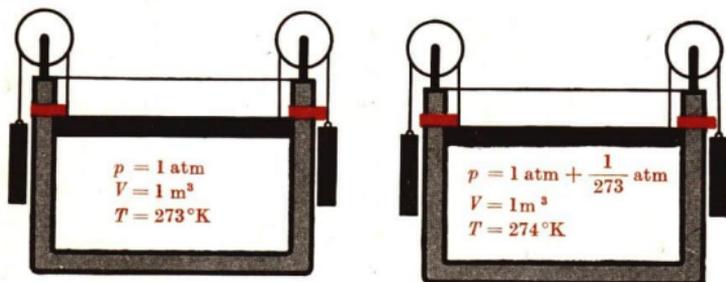
Die Luft im ersten Zylinder wird bei konstantem Volumen um 1 grad erwärmt. Hierzu ist die Wärme

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

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

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

erforderlich.



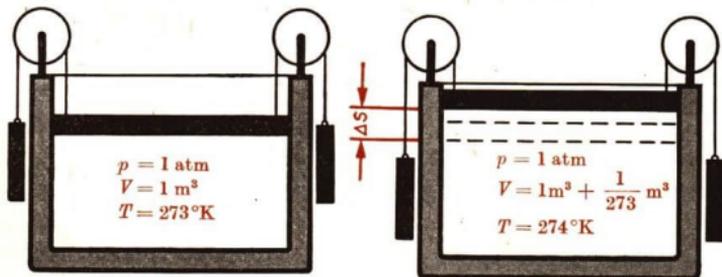
Die Luft im zweiten Zylinder wird bei konstantem Druck um 1 grad erwärmt. Hierzu ist die Wärme

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

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

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

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  $W_p - W_v = 0,088 \text{ kcal}$  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

$$W_{\text{mech}} = F \cdot s,$$

$$W_{\text{mech}} = p \cdot A \cdot s$$

$$W_{\text{mech}} = p \cdot V.$$

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

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

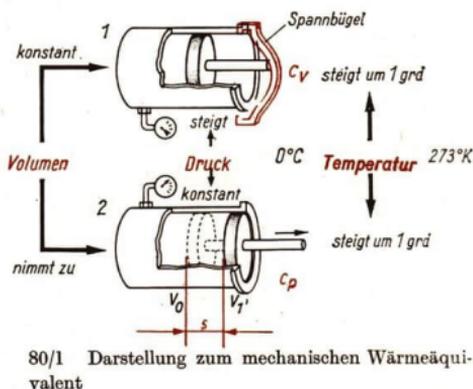
Damit erhält man für die Arbeit

$$W = 1 \text{ atm} \cdot \frac{1}{273} \text{ m}^3,$$

$$1 \text{ atm} = 10330 \text{ kpm}^{-2}$$

$$W = \frac{10330}{273} \text{ kpm},$$

$$W = 37,8 \text{ kpm}.$$



Durch Gleichsetzen der Ausdehnungsarbeit mit der Differenz der Wärmemengen ergibt sich

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

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  $1 \text{ Nm} = \frac{1}{9,81} \text{ kpm}$  eingeführt wird:

$$1 \text{ kcal} = 4187 \text{ Nm}.$$

Ebenfalls einander äquivalente Energiebeträge sind: 1 kcal = 4187 Ws

$$1 \text{ kcal} = 1,162 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}.$$

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.

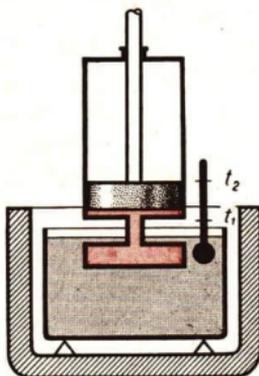
2. JOULE bestimmte das mechanische Wärmeäquivalent auch unmittelbar, indem er ein Schaufelrad durch zwei Massen in schnelle Umdrehung setzte (Bild 81/2). Das Rad lief in einem mit Quecksilber gefüllten Kalorimeter, das zur Erhöhung der Reibung radial geschlitzte Zwischenwände hatte. Die Flügel des Rades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

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

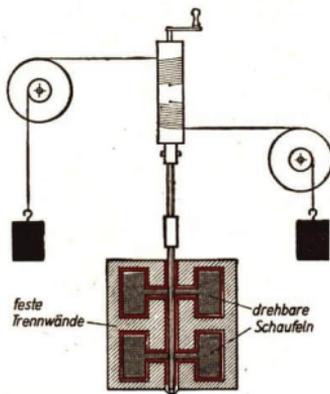
Aus der Temperaturerhöhung der Masse der Kalorimeterflüssigkeit läßt sich leicht die äquivalente Wärmemenge bestimmen. Auf diese Weise gelangte JOULE zu experimentell bestätigten Ergebnissen.

Wir erkennen:

**Wärme ist eine Energieart  
und damit anderen Energiearten äquivalent.**



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



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

- 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:

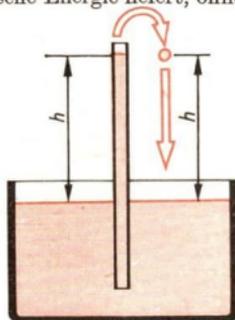
Mechanische Energie und Wärme sind zwei Energiearten, die sich ineinander überführen lassen. Bei allen Umwandlungen zwischen diesen Energien bleibt die Summe der Energiebeträge erhalten.

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.

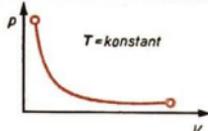
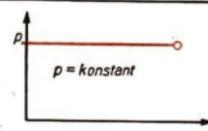
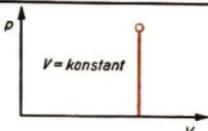
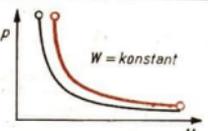
Dieser Zustand eines Gases ist stets durch drei Größen bestimmt. Es sind das:

**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	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa$	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?

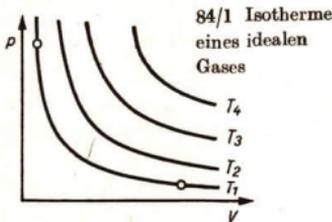
### 3.3.1. Die isotherme Zustandsänderung

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.

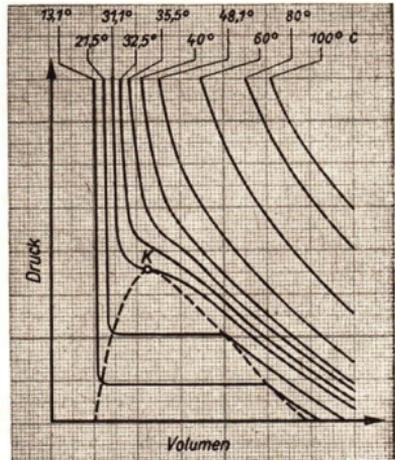
Die Temperaturänderung des Gases beim Zusammendrücken beziehungsweise Entspannen wird sehr langsam durchgeführt. Durch den Wärmeaustausch mit der Umgebung bleibt die Temperatur dabei konstant.

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.



84/2. 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.

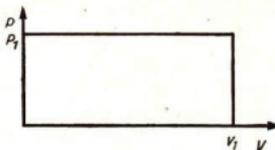
Das Produkt aus der Kraft des Kolbens und der Hubhöhe ist somit bestimmt.

$$I. W_H = F \cdot h.$$

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

Gegeben :

$$p = 1000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$V = 0,5 \text{ m}^3$$

Gesucht :

$$W_{\text{mech}} \text{ (in Nm und in kp} \cdot \text{m)}$$

Die mechanische Arbeit beträgt  $500 \text{ Nm}$ .

Berechnen Sie die Arbeit in  $\text{kpm}$ !

Lösung :

$$W_{\text{mech}} = p \cdot V$$

$$W_{\text{mech}} = 1000 \text{ Nm}^{-2} \cdot 0,5 \text{ m}^3$$

$$\underline{\underline{W_{\text{mech}} = 500 \text{ Nm}}}$$

### 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.

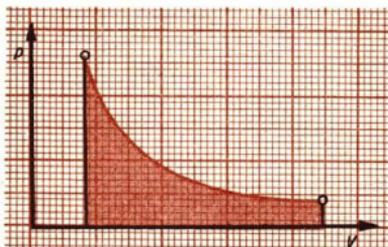
Wirkt also eine Kraft längs eines Weges in Kraftrichtung, so wird Arbeit verrichtet.

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

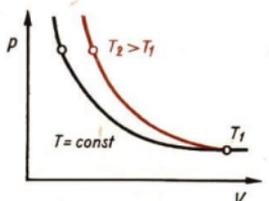
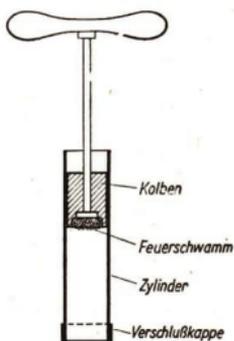


### 3.3.4. Die adiabatische Zustandsänderung des Gases

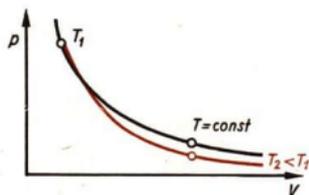
Bei der isothermen Zustandsänderung wird vom Gas Wärme aus der Umgebung aufgenommen oder an diese abgegeben. Im Gegensatz dazu steht die adiabatische Zustandsänderung.

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 Dieseldieselkraftstoff 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  $\kappa = 1,4$   $V_1 = 10 \text{ dm}^3$   
 $T_1 = 300 \text{ °K (27 °C)}$   $V_2 = 2 \text{ dm}^3$   
 $p_1 = 1 \text{ at}$

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

87/1 Beim Föhn<sup>1</sup> treten die Merkmale der adiabatischen Zustandsänderung in Erscheinung. Infolge der Kondensation bei adiab. 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 *Wärmeleistungsmaschinen*. Man kann sie unterteilen in

**Kolbenmaschinen:** Dampfmaschine, Gasmotor, Benzinmotor, Schwerölmotor.

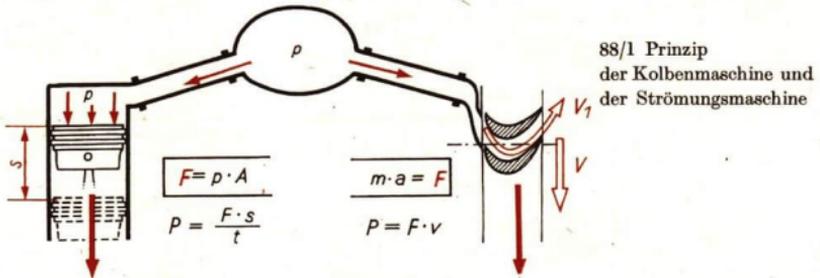
**Strömungsmaschinen:** Dampfturbine, Gasturbine, Rakete.

<sup>1</sup> 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.



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 Dampfung 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 cm<sup>2</sup> 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).

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

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

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

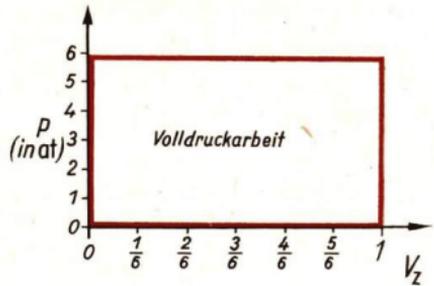
Es ist demzufolge möglich, aus der Fläche des Druck-Volumen-Diagramms durch Auszählen der Flächeneinheiten direkt auf das Arbeitsvermögen des Dampfes zu schließen.

**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)

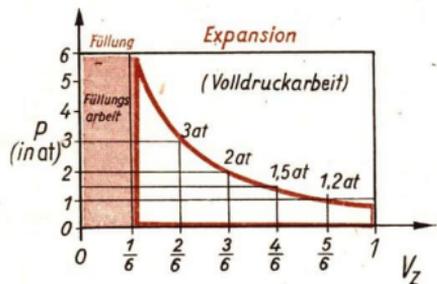
Soll der Druck des unter einem Kesseldruck von 6 at in den Zylinder einströmenden Frischdampfes unter der Annahme isothermer Zustandsänderung infolge der Expansion bis auf 1 at sinken, so muß die Füllung des Zylinders unterbrochen werden, wenn der Kolben  $\frac{1}{6}$  seines Weges zurückgelegt hat. 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



89/1 Arbeitsdiagramm einer Volldruckmaschine (schematisch)

Der Druck sinkt erst beim Ausströmen des Dampfes bis auf den Außendruck ab.



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 Volldampfzuführung 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.

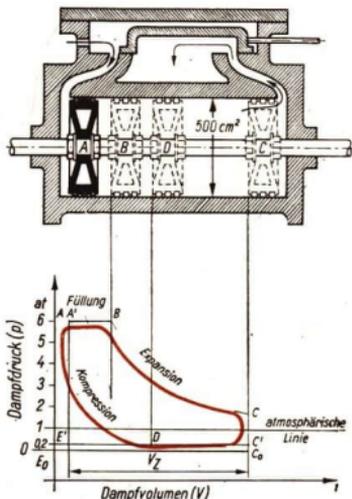
Nach der Füllung ( $A'B$ ) expandiert der Dampf ( $BC$ ) und entspannt sich am Schluß des Kolbenwegs plötzlich auf den Kondensatordruck von etwa 0,2 at ( $CC'$ ). Soll die Maschine von neuem Arbeit verrichten, so muß der Kolben wieder an den Ausgangspunkt zurückkehren. Bei seinem Rückgang schiebt er 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.

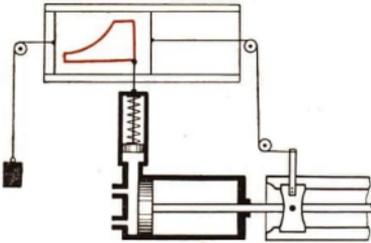
Die Arbeit des Kolbens setzt infolge des vorhandenen schädlichen Raumes nicht an der Stelle  $A$ , sondern erst an der Stelle  $A'$  ein. Da die Verdichtungsarbeit<sup>1</sup> von der Maschine aufgebracht werden muß, wird die der Maschine entnehmbare Arbeit um

<sup>1</sup> durch sie wird ein ruhigerer Lauf der Maschine erreicht.

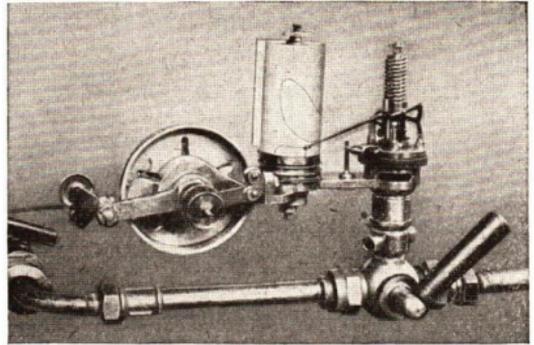
90/1 Arbeitsdiagramm einer Expansionsmaschine, bezogen auf den darüber abgebildeten Zylinder (schematisch)

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

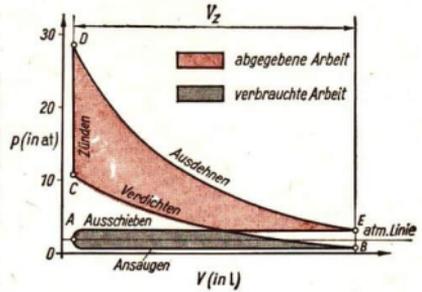
1. Schildern Sie die Wirkungsweise des Indikators und erklären Sie die Bedeutung des von ihm aufgezeichneten Arbeitsdiagramms!
2. Eine Dampfmaschine arbeitet mit einem Dampfdruck von 7 at. Der Kolbenhub beträgt 0,8 m. Zeichnen Sie auf Millimeterpapier das Arbeitsdiagramm
  - 2.1. einer Volldruckmaschine,
  - 2.2. einer Expansionsmaschine mit  $\frac{1}{4}$ -Füllung ( $\frac{1}{5}$ -Füllung), 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?

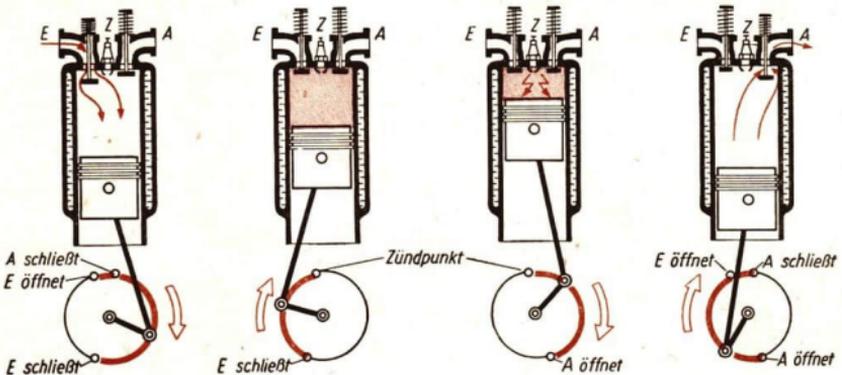
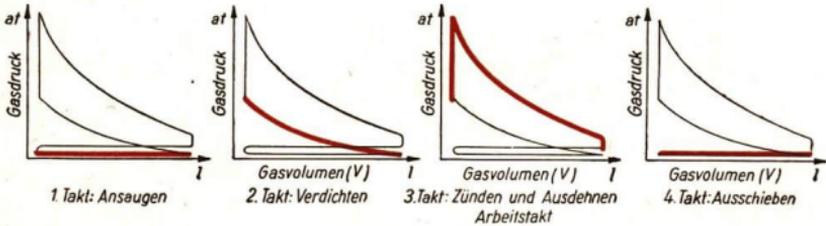
Bild 92/2 zeigt den Zusammenhang des Druck-Volumen-Diagramms mit der Stellung und der Bewegung des Kolbens eines Viertakt-Motors. Das zu einem vollständigen Arbeitsprozeß gehörige Arbeitsdiagramm stellt Bild 92/1 dar. Der Arbeits-



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.

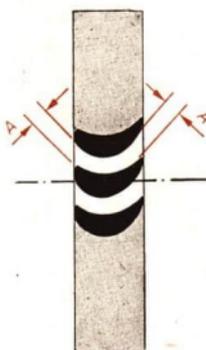
Um dieses Arbeitsdiagramm auszuwerten, muß ebenfalls die gesamte Fläche innerhalb der Kurve ausgezählt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß von der gesamten ermittelten Arbeit die für das Ausschieben und Ansaugen benötigte Arbeit zu subtrahieren ist.

### 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.

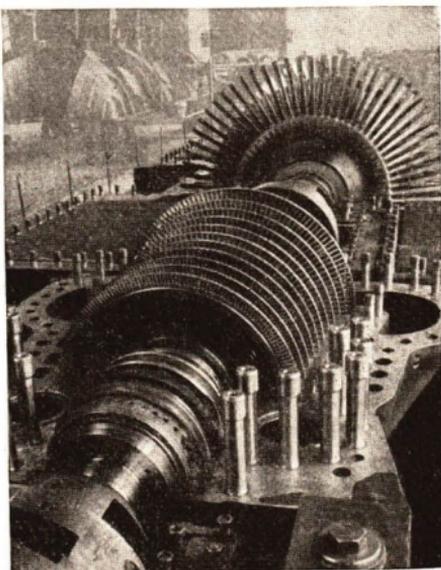
#### 3.5.1. Die Gleichdruck-Dampfturbine

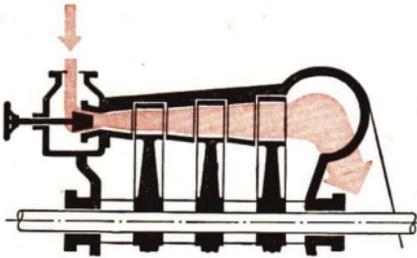
Bei Gleichdruckturbinen ist der Querschnitt zwischen den Laufradschaufeln an allen Stellen gleich groß (Bild 93/1), und damit bleibt infolge der relativ zu den Schaufeln gleichbleibenden Durchströmungsgeschwindigkeit auch der Druck zwischen den Schaufeln an allen Stellen gleich. Gegenüber dem Gehäuse 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.



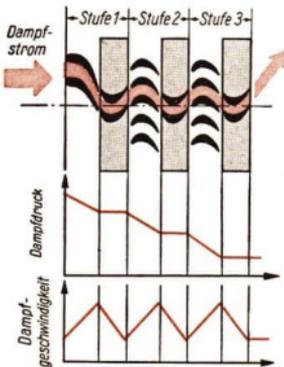
93/1 Querschnitt durch mehrere Schaufeln des Laufrades einer Gleichdruckturbine

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-Schaufelkranze gelangt der Dampf aus einer Druck-

kammer in die nächste, in der er die Schaufeln des folgenden Laufrades durchströmt. Leit- und Laufradkranze 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.

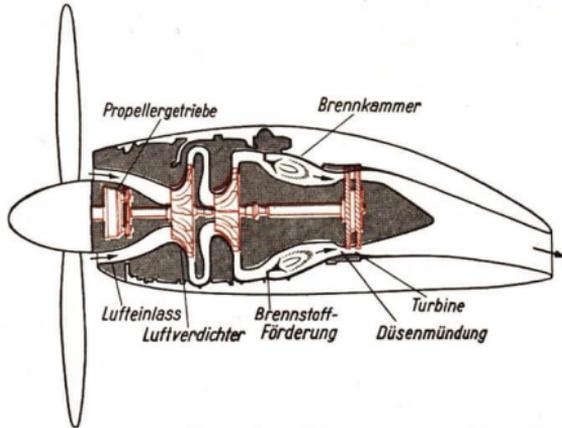
### 3.5.2. Die Gasturbine

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 grad. 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.

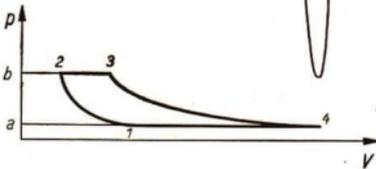
Gasturbinen arbeiten nach folgendem Prinzip:

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 Arbeits-  
diagramm einer Gasturbine

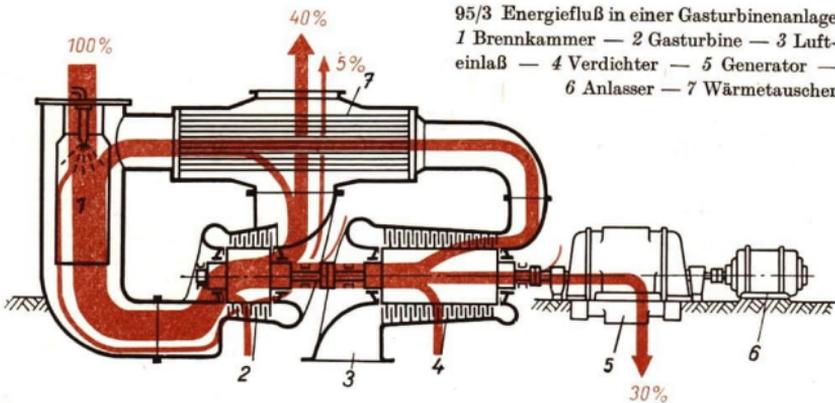


Das Arbeitsdiagramm der Gasturbine (Bild 95/2) zeigt im wesentlichen die gleichen Vorgänge, wie sie sich bei allen anderen Wärmekraftmaschinen abspielen.

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 Luft-  
einlaß — 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.

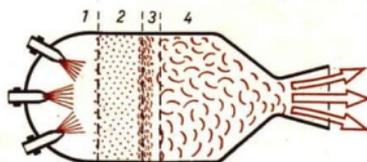
● *Untersuchen Sie die grundsätzlichen Unterschiede zwischen einem Gasturbinenkraftwerk und einem Kohle-Wärme­kraftwerk*

	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.



96/1 Raketentriebwerk

Die Art des verwendeten Treibstoffes (Feststoffrakete mit festen Treibstoffen, Flüssigkeitsrakete mit flüssigen Treibstoffen) spielt für den thermischen Prozeß eine untergeordnete Rolle.

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

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

$T$ : Temperatur in der Brennkammer

$\kappa$ : 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.

$\text{thermischer Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Energieaufwand}}$	$\eta_{th} = \frac{W}{W_1}$	(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

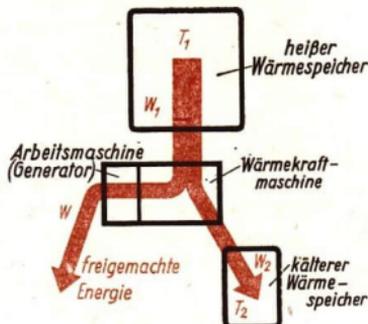
$$W = W_1 - W_2.$$

Daraus folgt

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

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

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



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  $180^\circ\text{C}$ , und im Kondensator herrscht eine Temperatur  $t_2$  von  $20^\circ\text{C}$ .

Gegeben:

$$T_1 = 453^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 293^\circ\text{K}$$

Gesucht:

$$\eta_{th}$$

Lösung:

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

$$\eta_{th} = \frac{453^\circ\text{K} - 293^\circ\text{K}}{453^\circ\text{K}}$$

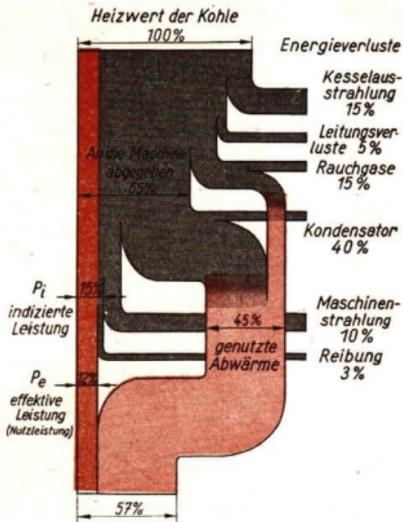
$$\eta_{th} = 0,35$$

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

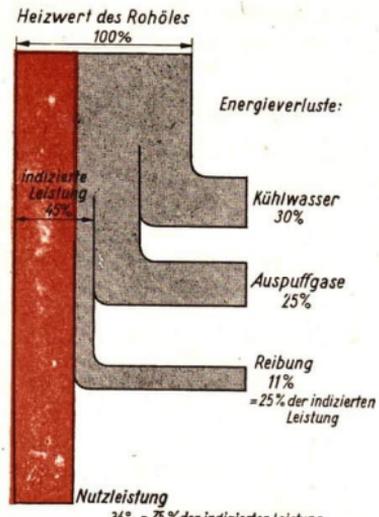
### 3.6.2. Der wirtschaftliche Wirkungsgrad

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**.

$$\eta_w = \frac{W_N}{W_M} \quad (18)$$

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 Hilfeenergie 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 Stahlfflasche unter hohem Druck in eine Stahlfflasche 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 Temperatenausgleich innerhalb des betrachteten Systems eintritt, nicht umkehrbar sind, führt zum **zweiten Hauptsatz der Wärmelehre**:

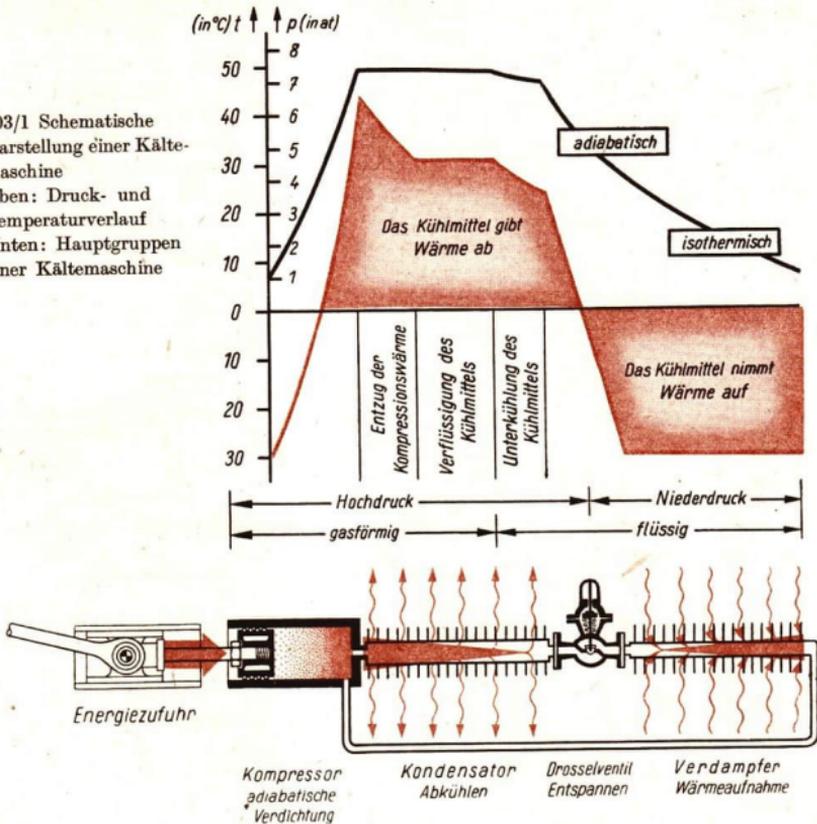
1. Wärme geht niemals von selbst ohne zusätzlichen Energieaufwand von einem kälteren zu einem wärmeren Körper über.
2. Zwischen Körpern von gleicher Temperatur entstehen niemals Temperaturunterschiede, ohne daß dauernde Veränderungen in der Umgebung hervorgerufen werden.

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.

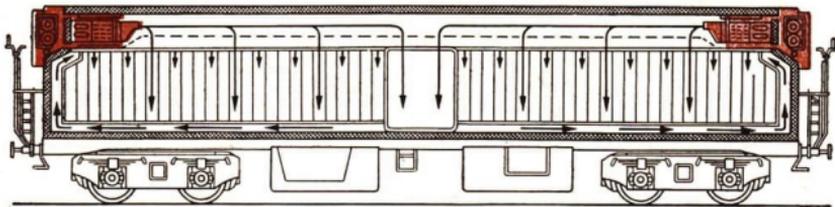
103/1 Schematische Darstellung einer Kältemaschine  
 Oben: Druck- und Temperaturverlauf  
 Unten: Hauptgruppen einer Kältemaschine



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, 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

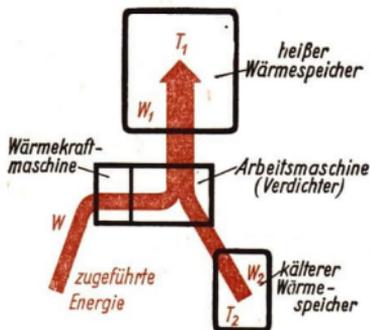
Kühlen von Gasen (Klimaanlagen, Kühlhäuser),

Kühlen von Flüssigkeiten (Molkerei, Brauerei),

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.

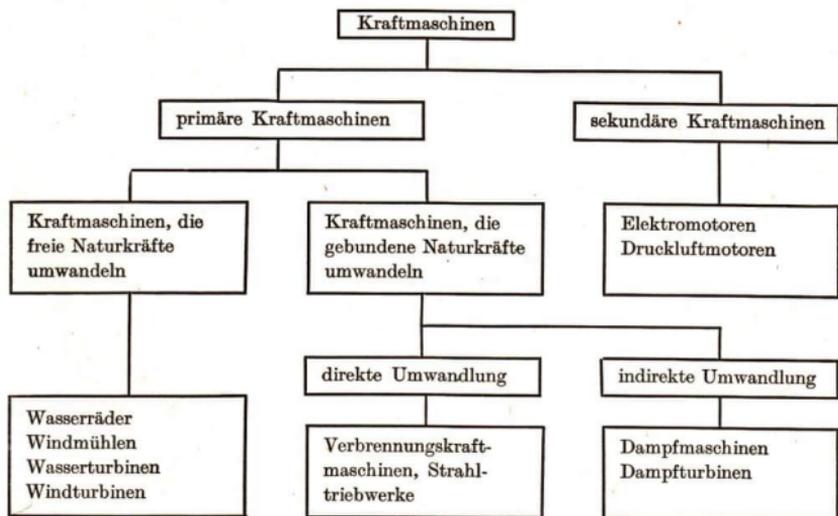
Welch ein gewaltiger Unterschied besteht zwischen dem Wasserrad des Mittelalters und einer modernen Gasturbine!

• 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 warmer 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 12000 PS

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?

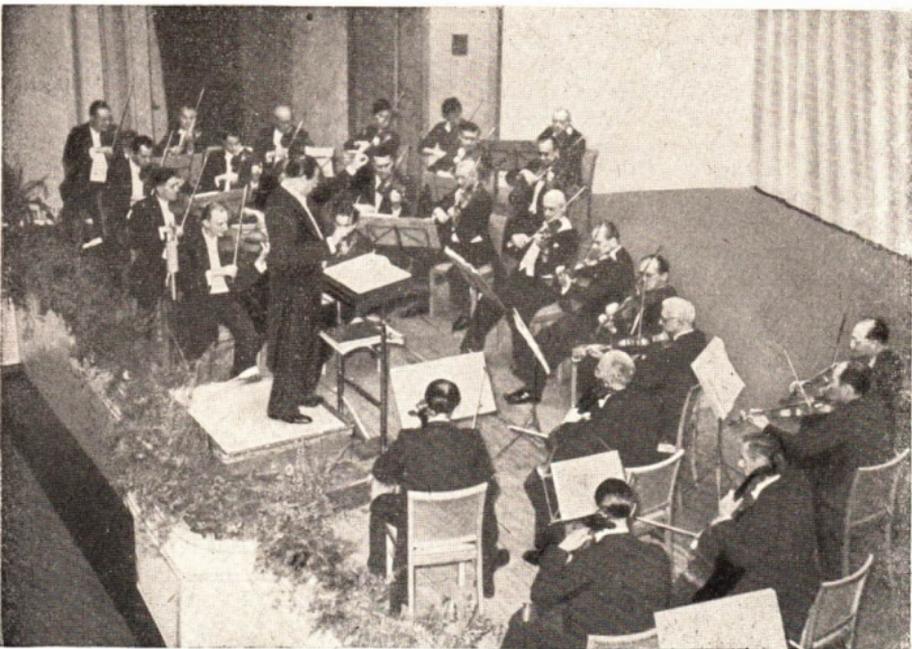
- 4. Wärmekraftmaschinen untergliedert man in Kolbenmaschinen und Strömungsmaschinen.**

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?



## Mechanische Schwingungen und Wellen

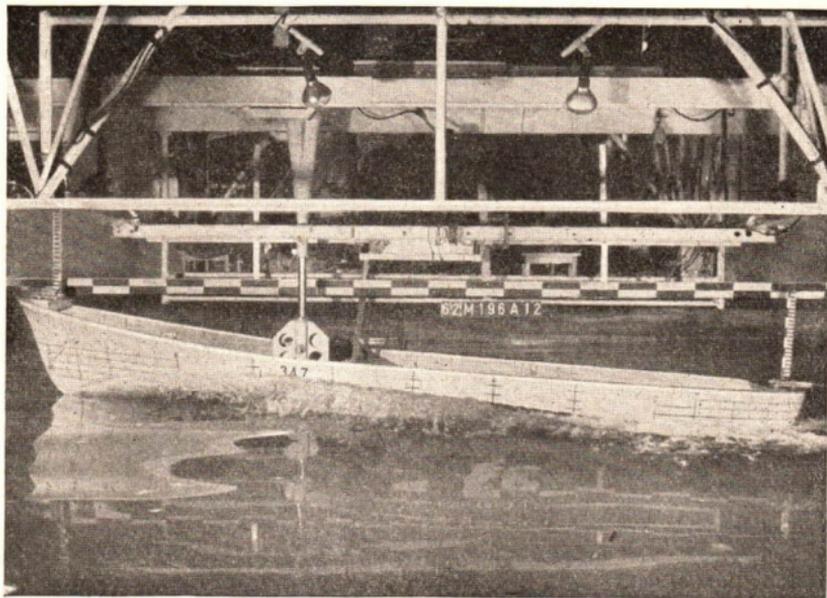
Die Musik gehört seit jeher zum Kulturgut der Menschheit. Viele Künstler erfreuen uns mit ihrem Spiel und tragen so zur Entspannung und Erholung der Menschen bei. Die Fülle der Töne und Klänge, die den Instrumenten entlockt wird und in unser Ohr dringt, ist eine akustische Erscheinung. Ihre Ursache sind die in mechanische Schwingungen versetzten Teile der Instrumente. Auf unser Gehör werden die erzeugten Schwingungen in Form von mechanischen Wellen übertragen, die sich im stoffgefüllten Raum ausbreiten.

Die Bedeutung der mechanischen Schwingungen und Wellen geht jedoch weit über das Gebiet der Akustik hinaus. Im Maschinenbau führte früher die Unkenntnis der Auswirkung von Schwingungsvorgängen sehr oft zur völlig unerwarteten Zerstörung von Achsen, Wellen, Lagern und anderer Maschinenteile. Heute nimmt die Untersuchung solcher Schwingungsercheinungen in vielen Gebieten der Technik und der Wissenschaften einen breiten Raum ein. Dadurch ist es einerseits möglich geworden,

Ermüdungsbrüche in Maschinenteilen zu vermeiden, und andererseits kann man mit Hilfe von Berechnungen den Querschnitt der durch Schwingungen beanspruchten Teile wesentlich kleiner halten, als man es früher aus Unkenntnis der auftretenden Belastungen zu tun wagte.

Zur Erforschung des Erdinnern und der Zusammensetzung unserer Erde und verschiedener Erscheinungen in der Erdrinde benutzen die Geologen Seismographen. Mit diesen Geräten werden die Erdbebenwellen registriert, und aus dem zeitlichen Nacheinander verschiedener Wellenarten wird auf den Entstehungsort der Wellen geschlossen. Diese Methode ist ein sehr wichtiges Verfahren bei der Ortsbestimmung von Kernwaffendetonationen, die an irgendeinem Punkt der Erde ausgelöst wurden. Auch im Schiffbau müssen die Gesetze der Schwingungs- und Wellenlehre berücksichtigt werden. Deshalb werden in den entsprechenden Forschungsinstituten genaue Modelle der projektierten Schiffskörper auf ihr Verhalten bei der Bewegung durch das Wasser und auf die Wellenbildung hin untersucht. Man benutzt dazu, wie in unserem Bild gezeigt, lange Schleppkanäle. Das Schiffsmodell wird, in einem Meßwagen aufgehängt, durch das Wasser geschleppt, wobei die erforderlichen Meßwerte gewonnen werden.

Schiffskörpermodell während eines Schleppversuches. Die Form der Wellen und die Größe des Bewegungswiderstandes geben Aufschluß über die hydrodynamische Güte der Form des Schiffskörpers.



## 1. Grundbegriffe der Schwingungslehre

Die Zeitmessung ist die Grundlage vieler physikalischer Messungen. Obwohl es bereits seit dem Mittelalter Räderuhren gibt, benutzte noch Galilei die genauer „gehende“ Wasseruhr. An der Räderuhr fehlte zu dieser Zeit noch eine Vorrichtung, die für einen gleichmäßigen Gang sorgte. Erst durch das Uhrenpendel wurde die Räderuhr zu einem brauchbaren Zeitmeßgerät. Das Uhrenpendel hat eine besondere Bewegungsform: es führt mechanische Schwingungen aus.



### 1.1. Die Schwingung

Mechanische Schwingungen treten in der Physik und Technik sehr oft in Erscheinung.

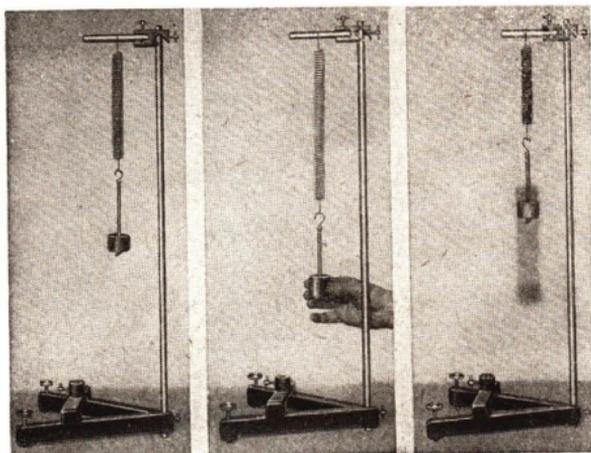
Auf Schwingungen von Saiten, Platten, Stäben und Luftsäulen beruht zum Beispiel die Wirkungsweise der Musikinstrumente. In einem Omnibus kann man gelegentlich beobachten, daß bei einer bestimmten Geschwindigkeit die ganze Karosserie in Schwingungen gerät.

- *Kennen Sie noch andere Beispiele für mechanische Schwingungen?*

Besonders einfach lassen sich mechanische Schwingungen an Federschwingern untersuchen (Bild 112/1). Dehnt man die Feder um einige Zentimeter und gibt den Körper dann frei, so beginnt er zu schwingen.

Im Gegensatz zum vertikalen Federschwinger, bei dem die Umkehrpunkte im Laufe der Zeit immer näher zusammenrücken, wiederholt sich bei einem Uhrenpendel die Bewegung in allen Einzelheiten. Die Geschwindigkeit, mit der ein bestimmter Punkt der Bahn durchlaufen wird, ist stets gleich groß. Auch die Lage der Umkehrpunkte des Pendels ändert sich nicht. Das Uhrenpendel führt eine *periodische*<sup>1</sup> Bewegung aus.

<sup>1</sup> periodisch: regelmäßig sich wiederholend



Links: Ruhelage,  
mitte: Feder gespannt,  
rechts: Feder-  
schwinger in  
Schwingung begriffen

112/1 Vertikaler Federschwinger

**Wiederholt sich eine Bewegung in gleichen Zeitabschnitten in allen Einzelheiten, dann bezeichnet man sie als periodische Bewegung oder Schwingung.**

Die Schwingungslehre untersucht alle Vorgänge, die beim Auftreten von Schwingungen zu beobachten sind. Sie beschränkt sich aber nicht auf die Mechanik. Man spricht auch dann von Schwingungen, wenn sich eine beliebige physikalische Größe periodisch ändert. So kann auch der elektrische Wechselstrom als „Schwingung“ aufgefaßt werden.

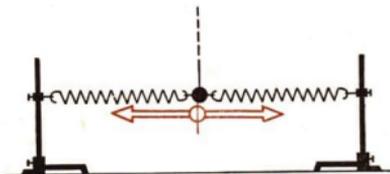
- Welche physikalische Größe ändert sich bei diesem Beispiel periodisch?

## 1.2. Physikalische Ursachen der Schwingung

Eine Masse ist zwischen zwei Schraubenfedern befestigt. Sie wird durch einen sehr langen Faden gehalten (Bild 112/2). Diese Anordnung heißt *horizontaler Federschwinger* (vgl. auch Seite 126).

Um die Masse nach links zu ziehen, ist eine bestimmte Kraft erforderlich. Dadurch wird die rechte Feder gedehnt und die linke zusammengedrückt. Die aufzuwendende Kraft hängt vom Abstand der Masse von der Ruhelage ab; sie wächst mit zunehmender Entfernung.

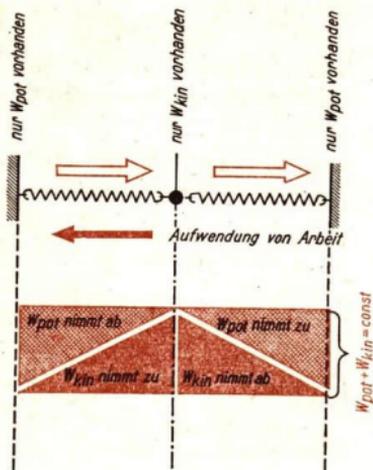
Die zum Spannen der Federn aufgewendete Arbeit ist als potentielle Energie in



112/2 Horizontaler Federschwinger

113/1 Energieumwandlungen  
beim horizontalen Federschwinger

den Federn gespeichert. Gibt man die Masse frei, so wird infolge der Elastizität der Federn die potentielle Energie in Beschleunigungsarbeit umgewandelt. Zwischen dem Freigabe- und der Ruhelage wächst die kinetische Energie des schwingenden Systems, und seine potentielle Energie nimmt ab, jedoch bleibt die Summe von potentieller und kinetischer Energie immer gleich der potentiellen Energie vor der Freigabe. Beim Durchgang durch die Ruhelage hat die Masse nur kinetische Energie, da die Federn entspannt sind (Bild 113/1). Auf Grund ihrer Trägheit kommt die Masse dort nicht zur Ruhe. Sie bewegt sich weiter; dehnt dabei die linke Feder und drückt die rechte zusammen. Dadurch wird die kinetische Energie der Masse wieder in potentielle Energie der Federn umgewandelt. Im rechten Umkehrpunkt ist schließlich nur potentielle Energie vorhanden. Nun kehrt sich der Vorgang um. Die Masse wird wieder zur Ruhelage hin beschleunigt. Die genannten Vorgänge wiederholen sich so lange, bis die ursprünglich aufgewandte Energie infolge der Reibung in Wärme umgewandelt worden ist. Die Bewegung hört dann auf. Durch periodische Energiezufuhr bleibt die Bewegung periodisch, d. h. es bleibt eine Schwingung bestehen.



Diese Vorgänge treten bei allen Schwingungen solcher Art auf. Allgemein kann gesagt werden:

**Die Schwingung ist ein zeitlich periodischer Vorgang, bei dem sich ständig Energieformen ineinander umwandeln.**

Man kann die mechanischen Schwingungen nach der Art der zur Ruhelage zurücktreibenden Kräfte unterscheiden. Sind die Kräfte durch elastische Eigenschaften der Stoffe bedingt, so spricht man von *elastischen Schwingungen*. Diese Art der Schwingungen tritt beispielsweise beim horizontalen Federschwinger auf. *Pendelschwingungen* erfolgen dagegen unter dem Einfluß der Schwerkraft. Sie ist die Ursache dafür, daß das Pendel zur Ruhelage zurückgezogen wird. Es gibt auch viele mechanische Schwingungen, bei denen beide Kräfte als Ursache auftreten. Auf einen vertikalen Federschwinger wirken beispielsweise Schwerkraft und Federkraft gleichzeitig ein.

### 1.3. Kenngrößen einer Schwingung

Will man die Schwingungen eines Körpers beschreiben, so sind bestimmte, für die Schwingung charakteristische Angaben notwendig. Man bezeichnet sie als *Kenngrößen*.

Tabelle 1: Kenngrößen der Schwingung

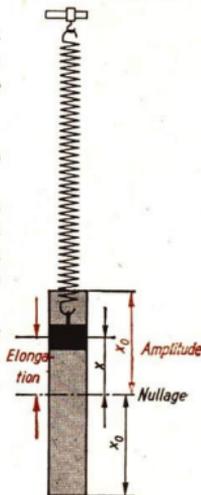
Kenngröße	Formelzeichen	Definition	Beziehungen
<b>Elongation<sup>1</sup></b> oder <b>Ausschlag</b>	$x$	Unter der Elongation versteht man den jeweiligen Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage.	—
<b>Amplitude<sup>2</sup></b> oder <b>Schwingungsweite</b>	$x_0$	Die Amplitude ist der größte Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage.	—
<b>Periode</b> oder <b>Schwingungsdauer</b>	$T$	Die Periode ist die Zeitdauer einer vollen Schwingung, d. h. eines vollständigen Hin- und Herganges. <sup>4</sup>	$T = \frac{t}{n}$ $T = \frac{1}{f}$
<b>Frequenz<sup>3</sup></b> oder <b>Schwingungszahl</b>	$f$ oder $\nu$	Die Frequenz ist die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde.	$f = \frac{n}{t}$ $f = \frac{1}{T}$

Unter der *Phase*<sup>5</sup> versteht man den Schwingungszustand zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dazu ist die Angabe der Elongation und der Richtung notwendig, in der sich der Körper bewegt.

Die Kenngrößen sollen am Beispiel des vertikalen Federschwingers erläutert werden:

Zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet sich die Masse 2 cm von der Ruhelage entfernt (Bild 114/1). Gibt man den Abständen von der Ruhelage aus nach oben ein positives, nach unten ein negatives Vorzeichen, so beträgt im genannten Beispiel die

114/1 Elongation und Amplitude am vertikalen Federschwinger



<sup>1</sup> elongatio (lat.): Ausweichung

<sup>2</sup> amplitudo (lat.): die Weite

<sup>3</sup> frequentia (lat.): häufige Wiederholung

<sup>4</sup> n: beliebige Zahl von Schwingungen, t: dazugehörige Zeit

<sup>5</sup> phasis (griech.): Erscheinung

Elongation +2 cm. Die größte Entfernung, die die Masse vom Nullpunkt einnimmt, ist die Amplitude, zum Beispiel 4 cm.

Die Periode  $T$  kann aus einer beliebigen Anzahl von Schwingungen  $n$  und der dabei verflissenen Zeit  $t$  bestimmt werden:

$T = \frac{t}{n}$ . Sie ist gleich der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden *gleichgerichteten* Durchgängen durch einen beliebigen Punkt der Bahn (Bild 115/1).

Führt der Federschwinger in der Zeit  $t = 40$  s insgesamt  $n = 50$  Schwingungen aus, so ergibt sich:

$$T = \frac{t}{n},$$

$$T = \frac{40}{50} \text{ s},$$

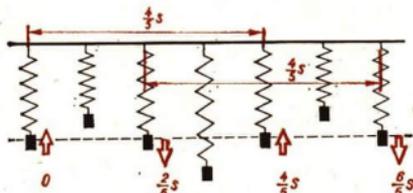
$$T = \frac{4}{5} \text{ s}.$$

Die Frequenz  $f$  des gleichen Schwingers ist der Quotient aus der Anzahl  $n$  der vollen Schwingungen und der dabei verflissenen Zeit  $t$ :

Das gewählte Zahlenbeispiel ergibt:

$$f = \frac{n}{t},$$

$$f = \frac{5}{4} \text{ s}^{-1}.$$



115/1 Nach je  $\frac{1}{5}$  Sekunden erfolgt ein gleichgerichteter Durchgang der Masse durch einen bestimmten Punkt der Bahn. Demnach ist

$$T = \frac{4}{5} \text{ s}$$

Die Gleichungen  $T = \frac{t}{n}$  und  $f = \frac{n}{t}$  zeigen, daß  $f$  der Kehrwert von  $T$  ist.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{und} \quad T = \frac{1}{f}.$$

Zu Ehren des großen deutschen Physikers HEINRICH HERTZ benutzt man für die Maßeinheit  $\text{s}^{-1}$  die Kurzbezeichnung **Hertz (Hz)**.

$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$  Größere Frequenzeinheiten sind das

Kilohertz:  $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$

Megahertz:  $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$

Gigahertz:  $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$

Diese Einheiten werden meist in der Hochfrequenztechnik verwendet.

### Fragen, Übungen, Aufgaben

- Beschreiben Sie die Energieumwandlungen am vertikalen Federschwinger!
- Stellen Sie aus einem Gummifaden und einem Wägestück einen vertikalen Federschwinger her!
  - Ermitteln Sie dessen Periode und Frequenz (Sekundenzeiger der Armbanduhr!)
    - Wie ändern sich diese Kenngrößen, wenn Sie den Gummifaden verkürzen?
    - Wie ändern sich diese Kenngrößen, wenn Sie den Gummifaden unverändert lassen und unterschiedliche Wägestücke verwenden?
- Eine Stimmgabel hat die Frequenz 440 Hz. Wie lange dauert eine Schwingung?
- Warum ist die Bewegung des vertikalen Federschwingers keine periodische Bewegung? Wodurch könnte sie zur periodischen Bewegung gemacht werden?

## 1.4. Harmonische Schwingungen

### 1.4.1. Die Aufzeichnung von Schwingungen

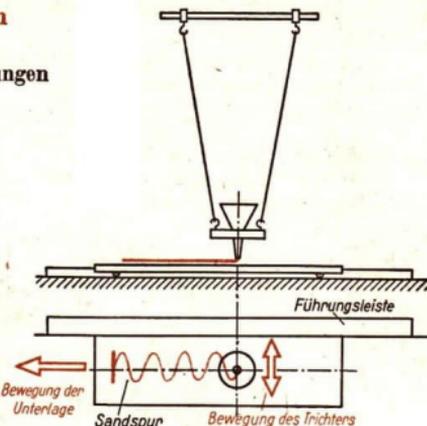
Um Art und zeitlichen Verlauf von Schwingungen genauer zu erkennen, ist eine Aufzeichnung notwendig.

Das Verfahren läßt sich an einem Versuch erläutern:

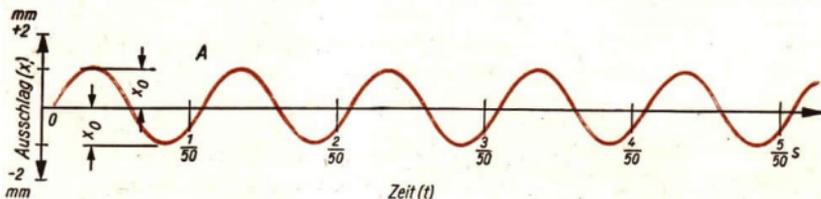
Man benutzt ein Sandpendel nach Bild 116/1. Es ist an zwei Fäden, oder wie man auch sagt, *bifilar* aufgehängt, damit es nur in einer Ebene schwingen kann. Bei schwingendem Pendel hinterläßt der ausfließende Sand geradlinige Spuren, die aber einander überdecken. Es ist deshalb notwendig, die einzelnen Schwingungen entsprechend dem Zeitablauf räumlich zu trennen:

Wird die Unterlage mit gleichförmiger Geschwindigkeit unter dem Pendel hinweggezogen, so entsteht statt der geradlinigen Spur auf der Unterlage eine Wellenlinie.

Auch mit einer Stimmgabel kann man Schwingungen aufzeichnen. Dazu befestigt man an einer Zinke der Stimmgabel ein dünnes, vorn zugespitztes Federstahlblech. Die Spitze zieht man nach dem Anschlagen der Stimmgabel gleichförmig über eine beruhte Glasplatte. Es entsteht wiederum eine Wellenlinie (Bild 116/2).



116/1 Sandpendel



116/2 Zeichnerische Wiedergabe einer Stimmgabelschwingung

Die Bewegungsrichtung der Stimmgabel soll mit der positiven Richtung der Abszissenachse zusammenfallen. Beträgt die Frequenz der Stimmgabel 50 Hz, so entspricht der Strecke  $\overline{OA}$  die Zeit  $\frac{1}{50}$  s; denn in dieser Zeit erfolgt eine Schwingung. Die Ordinatenwerte geben die Elongation der Schreibspitze zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Die Elongation ändert sich mit der Zeit.

Die Elongation einer Schwingung ist eine periodische Funktion der Zeit,

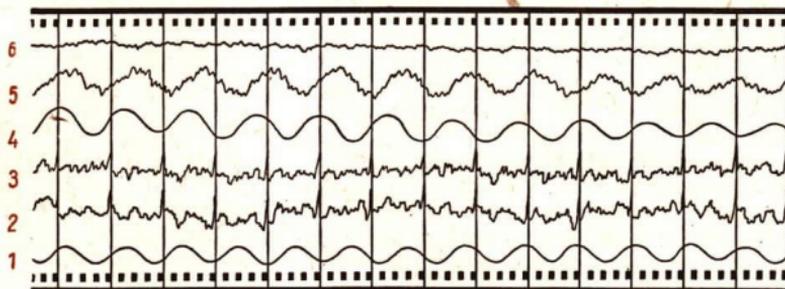
$$x = f(t)$$

Lötet man an die Messingsaite eines Monochords<sup>1</sup> eine Schreibspitze, so lassen sich auch die Schwingungen einer angezupften Saite auf einer Glasplatte festhalten.

In der Technik wendet man neben mechanischen Verfahren oft solche an, bei denen mechanische Schwingungen in elektrische Schwingungen umgewandelt werden. Sie können auf dem Bildschirm von Katodenstrahloszillographen beobachtet werden.

### 1.4.2. Die harmonische Schwingung

Die Schwingungen von Pendeln und Federschwingern lassen sich besonders einfach beschreiben.



117/1 Der Meßstreifen enthält die Aufzeichnung sechs verschiedener Schwingungen. Den einfachsten Verlauf haben die Schwingungen 1 und 4. Während bei Schwingung 1 die Amplitude konstant bleibt, nimmt sie bei Schwingung 4 allmählich ab. Diese beiden Schwingungen sind harmonische Schwingungen. Die anderen Schwingungen sind nicht-harmonisch oder anharmonisch.

Beim Federschwinger ist nach dem Hookeschen Gesetz die Dehnung proportional der wirkenden Kraft. Mit zunehmender Elongation wächst also die Kraft, die die Masse zur Nullage zurücktreibt. Es gilt die Beziehung

$$F = -k \cdot x,$$

wobei  $F$  die zurücktreibende Kraft,  $x$  die Elongation und  $k$  ein Proportionalitätsfaktor ist. Das Minuszeichen zeigt an, daß die rücktreibende Kraft der Elongation stets entgegengesetzt gerichtet ist. Die Bewegung eines Schwingers, für den diese Aussage gültig ist, heißt *harmonische Schwingung*. Diese Bezeichnung ist darauf zurückzuführen, daß bei vielen Musikinstrumenten derartige Schwingungen auftreten. Auch die Schwingung einer Stimmgabel ist harmonisch.

**Bei einer harmonischen Schwingung ist die rücktreibende Kraft der Elongation proportional.**

<sup>1</sup> monos (griech.): allein, einzeln; chorde (griech.): Darm, Saite

Mit dem 2. Newtonschen Prinzip  $F = m \cdot a$  oder  $a = \frac{F}{m}$  erhält man durch Einsetzen

$$a = -\frac{k}{m} \cdot x.$$

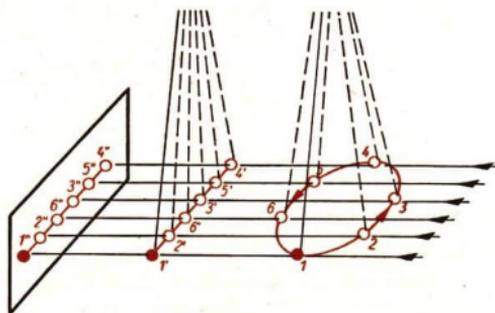
Der Faktor  $-\frac{k}{m}$  ist bei einem bestimmten Schwinger konstant. Daraus folgt

$$a \sim x.$$

Man erkennt: Die Beschleunigung ist bei der harmonischen Schwingung der jeweiligen Elongation proportional. Für  $x = x_0$ , das heißt, wenn die Elongation gleich der Amplitude ist, erreicht sie ihren größten Wert. Für  $x = 0$  (Durchgang durch die Nullage) ist die Beschleunigung Null.

### 1.4.3. Die grafische Darstellung

Projiziert man die Bewegung eines Fadenpendels, das einen Kegelmantel beschreibt, mit Hilfe von Lichtstrahlen auf eine Wand, so erkennt man, daß die Bewegung des Kugelschattens der Bewegung eines in einer Ebene schwingenden langen Fadenpendels entspricht (Bild 118/1).



118/1 Projektion eines Kegelpendels und eines in einer Ebene schwingenden Fadenpendels

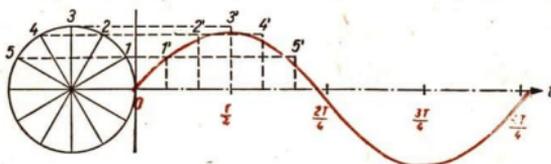
Der Vergleich zwischen der Bewegung eines Fadenpendels und dem Projektionsbild des schwingenden

Kegelpendels bietet eine einfache Möglichkeit, eine harmonische Schwingung grafisch darzustellen und mathematisch zu untersuchen:

Die Projektion des Kegelpendels wird punktwise in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt:

Man zeichnet einen Kreis mit der Amplitude  $x_0$  als Radius und teilt seinen Umfang in gleiche Abschnitte (Bild 118/2). Der waagerechte Durchmesser des Kreises wird verlängert und dient als Zeitachse.

Senkrecht dazu werden die Elongationen für verschiedene Zeitpunkte abgetragen. Bei entsprechender Einteilung der Achsen (die Strecke vom Ursprung 0 bis  $T$  sei gleich dem Kreisumfang  $2\pi x_0$ ) ergibt die grafische Darstellung ein Weg-Zeit-Diagramm, wie



118/2 Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer harmonischen Schwingung

wir es schon bei der Schwingung einer Stimmgabel kennenlernten (vgl. Bild 116/2). Es ist daher anzunehmen, daß beide Vorgänge auch mathematisch durch den gleichen funktionalen Zusammenhang ausgedrückt werden können.

Für einen vollen Umlauf (sie entspricht einer Schwingung des Fadenpendels) benötigt das Kegelpendel die Zeit  $T$ . Der dabei überstrichene Winkel beträgt in Bogenmaß  $2\pi$ . Während der Zeit  $t$  wird entsprechend der Winkel  $\hat{\varphi}$  überstrichen. Es gilt folgende Proportion:

$$\hat{\varphi} : 2\pi = t : T$$

oder

$$\hat{\varphi} = \frac{2\pi}{T} \cdot t.$$

Aus Bild 119/1 erkennt man, daß gemäß der Definition trigonometrischer Funktionen

$$\sin \hat{\varphi} = \frac{x}{x_0}$$

ist. Löst man nach der Elongation  $x$  auf, so erhält man

$$x = x_0 \cdot \sin \hat{\varphi}$$

oder unter Benutzung der oben hergeleiteten Beziehung

$$x = x_0 \cdot \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot t \right).$$

Den Ausdruck  $\frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$  bezeichnet man als **Kreisfrequenz**.

Da die Projektion des schwingenden Kegelpendels als harmonische Schwingung aufgefaßt werden kann, ergibt sich als **Weg-Zeit-Funktion** der harmonischen Schwingung folgender Ausdruck:

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (19)$$

Die grafische Darstellung einer harmonischen Schwingung ergibt eine Sinuskurve.

### Beispiel

Welche Elongation besitzt ein Federschwinger mit der Frequenz  $f = 2$  Hz und der Amplitude  $x_0 = 3$  cm zum Zeitpunkt  $t = 4$  s? (Zum Zeitpunkt  $t = 0$  sei die Elongation  $x = 0$ !) Die Schwingung soll periodisch sein!

Gegeben:

$$f = 2 \text{ Hz} = 2 \text{ s}^{-1}$$

$$x_0 = 3 \text{ cm}$$

$$t = 4 \text{ s}$$

Gesucht:

$$x \text{ (in cm)}$$

Lösung:

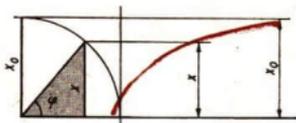
$$x = x_0 \sin(\omega \cdot t)$$

$$x = x_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$x = 3 \text{ cm} \cdot \sin(2\pi \cdot 2 \text{ s}^{-1} \cdot 4 \text{ s})$$

$$x = 3 \text{ cm} \cdot \sin(16\pi)$$

Der Sinus des Winkels  $16\pi$  ist Null, so daß die Elongation zum angegebenen Zeitpunkt ebenfalls Null ist.



119/1

## Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Bauen Sie sich ein Sandpendel! Der Trichter ist anfangs mit einem Rundholz von oben zu verschließen und wird mit trockenem Sand gefüllt.  
Der Pendelkörper soll möglichst schwer sein (zusätzliche Beschwerung).
2. Zeichnen Sie nach dem in Bild 118/2 beschriebenen Verfahren den zeitlichen Verlauf einer Sinusschwingung mit  $x_0 = 2,5$  cm! Teilen Sie den Kreis mit dem Zirkel in 12 gleiche Teile ein!
3. Zeichnen Sie das Bild der Funktion  

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$
 mit  $x_0 = 3$  cm und  $f = 0,5$  Hz für  $t = 0, \frac{1}{4}, \frac{2}{4}, \frac{3}{4}, \frac{4}{4}, \dots, \frac{8}{4}$  s!
4. Welche Elongation besitzt ein Pendel zu den Zeitpunkten  $\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2$  s, wenn die Periode  $T = 1$  s und die Amplitude 20 cm betragen?  
Zum Zeitpunkt Null sei die Elongation Null!

## 1.5. Schwingungsdauer von Fadenpendeln

Ein beliebig geformter Körper, der so aufgehängt ist, daß er infolge der Schwerkraft um eine stabile Gleichgewichtslage schwingen kann, wird als Pendel bezeichnet. Denkt man sich die gesamte Pendelmasse in einem Punkt, dem Massenmittelpunkt, vereinigt, so erhält man ein *mathematisches Pendel*. Es wird annähernd verwirklicht durch einen kleinen, schweren Körper, der an einem dünnen Faden aufgehängt ist, durch ein sogenanntes *Fadenpendel*.

Befestigen Sie an einer Haltevorrichtung ein Fadenpendel und bestimmen Sie mit einer Stoppuhr oder Armbanduhr mit Sekundenzeiger die Schwingungsdauer  $T$  aus jeweils 10 bis 20 Schwingungen. Die Meßwerte tragen Sie in Tabellen ein.

### Versuchsreihe 1 – Pendellänge und Schwingungsdauer

Ermitteln Sie  $T$  für fünf verschiedene Pendellängen! Die Pendelmasse ist dabei nicht zu verändern, die Auslenkung aus der Vertikalen soll  $5^\circ$  nicht überschreiten.

Pendelmasse	Pendellänge	Zahl der Schwingungen	Gesamtzeit	Schwingungsdauer	Quotient
$m$	$l$	$n$	$t$	$T = \frac{t}{n}$	$\frac{T}{\sqrt{l}}$

Stellen Sie  $T = f(\sqrt{l})$  grafisch dar!

### Versuchsreihe 2 – Masse und Schwingungsdauer

Führen Sie den gleichen Versuch für drei verschiedene Massen bei gleicher Pendellänge aus! Die Auslenkung soll wieder kleiner als  $5^\circ$  sein.

Pendellänge	Pendelmasse	Zahl der Schwingungen	Gesamtzeit	Schwingungsdauer
$l$	$m$	$n$	$t$	$T$

### Versuchsreihe 3 – Auslenkung und Schwingungsdauer

Für ein Pendel mit konstanter Masse und Länge werden die Perioden bei verschiedener Auslenkung aus der Ruhelage bestimmt. (Winkelmesser an der Aufhängung befestigen!) Wählen Sie als Winkel gegenüber der Vertikalen etwa  $2^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ !

Pendellänge $l$	Pendelmasse $m$	Auslenkung $\alpha$	Zahl der Schwingungen $n$	Gesamtzeit $t$	Schwingungsdauer $T$

Der zweiten Meßreihe kann man entnehmen, daß die Schwingungsdauer unabhängig von der Masse des Pendelkörpers ist. Die dritte Meßreihe zeigt uns, daß die Periode nicht von der Auslenkung abhängt, wenn der Winkel zwischen dem Pendelfaden und der Vertikalen kleiner als etwa  $5^\circ$  ist. Aus der letzten Spalte der ersten Tabelle und einer grafischen Darstellung  $T = f(\sqrt{l})$  folgt schließlich, da  $T \sim \sqrt{l}$  ist:

**Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ist der Quadratwurzel aus der Pendellänge proportional.  $T = k \sqrt{l}$**

Der Proportionalitätsfaktor hat den Wert  $k = \frac{2\pi}{\sqrt{g}}$ , wie hier nicht näher nachgewiesen werden soll ( $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

- Berechnen Sie  $k$  und vergleichen Sie den Wert mit Ihren Ergebnissen aus der ersten Meßreihe (letzte Spalte!)

Solche Untersuchungen von Pendelschwingungen wurden erstmals von GALILEO GALILEI vorgenommen. Er soll dazu schon als Jüngling durch Beobachtung der Kronleuchterschwingungen im Dom zu Pisa angeregt worden sein. CHRISTIAN HUYGENS setzte diese Untersuchungen fort und formulierte auf Grund theoretischer Überlegungen 1673 das Pendelgesetz:

Bei kleinen Pendelausschlägen ist die Schwingungsdauer eines mathematischen Pendels der Quadratwurzel aus der Pendellänge direkt und der Quadratwurzel aus der Schwerebeschleunigung umgekehrt proportional.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (20)$$

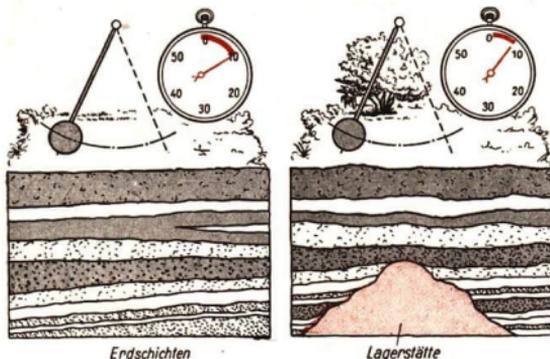
1672 entdeckte der französische Astronom RICHER, daß die Schwingungsdauer des gleichen Pendels vom Ort der Beobachtung abhängt. Die Ursache vermutete er in einer Ortsabhängigkeit der Schwerebeschleunigung  $g$ .

Da Längen und Zeiten verhältnismäßig genau zu messen sind, bietet das Pendelgesetz eine einfache Möglichkeit, die Schwerebeschleunigung zu bestimmen. Aus dem Pendelgesetz ergibt sich

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (21)$$

Bei Verwendung eines Fadenpendels weicht der gefundene Wert vom tatsächlichen Wert etwas ab, da die benutzte Formel theoretisch nur für ein mathematisches Pendel gültig ist. Genauere Werte für die Schwerebeschleunigung liefern Versuche mit physikalischen Pendeln. Ein physikalisches Pendel ist jeder starre Körper, der außerhalb seines Schwerpunktes aufgehängt wird. Für physikalische Pendel gelten aber andere Formeln.

Von der Ortsabhängigkeit der Schwingungsdauer des gleichen Pendels machte man bei geologischen Erkundungen Gebrauch. Die Schwerebeschleunigung ändert sich nicht nur mit der geographischen Breite und der Höhe über dem Meeresspiegel. Sie ist auch davon abhängig, welche Stoffe sich unter der Erdoberfläche befinden. Über Lagerstätten schwerer Erze schwingt ein Pendel schneller, da die Schwerebeschleunigung größer geworden ist. Entsprechendes gilt für Lagerstätten leichter Mineralien, über denen das Pendel langsamer schwingt (Bild 122/1). Heute ist dieses Verfahren durch andere Meßmethoden ersetzt worden.



122/1 Die Schwingungsdauer des gleichen Pendels ändert sich über Lagerstätten von Mineralien

### Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Bei einem Federschwinger läßt sich die Schwingungsdauer nach der Gleichung

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$m$ : Masse  
 $k$ : Federkonstante

berechnen. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, daß die Feder masselos sei.

1.1. Stellen Sie sich einen Federschwinger nach Bild 112/1 her.

1.2. Bestimmen Sie die Masse  $m_1$  des Massstückes, die Masse  $m'$  der Feder.

1.3. Ermitteln Sie die Federkonstante  $k$  nach dem Hookeschen Gesetz ( $k = \frac{F}{s}$ ).

1.4. Berechnen Sie mit  $k$  und  $m_1$  die Schwingungsdauer  $T$ .

1.5. Bestimmen Sie die Schwingungsdauer  $T$  experimentell.

1.6. Setzt man in der Gleichung für die Schwingungsdauer für  $m = m_1 + \frac{m'}{3}$ , so wird die

Abweichung zwischen den Ergebnissen von 1.4. und 1.5. geringer. Was wird dadurch berücksichtigt? Kontrollieren Sie die Behauptung!

2. Welche Länge muß ein Fadenpendel haben, das die Schwingungsdauer  $T = 2$  s aufweisen soll?

Kontrollieren Sie Ihre Berechnung durch einen Versuch!

3. Bestimmen Sie die Schwingungsdauer eines Pendels von 50 cm Länge, indem Sie die Zeit für 20 Schwingungen messen,
  - 3.1. für eine Auslenkung des Pendels um etwa  $5^\circ$  gegenüber der Vertikalen,
  - 3.2. für eine Auslenkung des Pendels um etwa  $20^\circ$ !
  - 3.3. Welche Ursachen haben die Abweichungen von der errechneten Schwingungsdauer? Beachten Sie den Wortlaut des Pendelgesetzes!
4. Ermitteln Sie, die Schwerkbeschleunigung  $g$  mit Hilfe eines Fadenpendels!
5. Welchen Einfluß haben Temperaturänderungen auf den Gang einer Pendeluhr und wie werden sie ausgeglichen?
6. Drei vollkommen gleiche Pendeluhren werden am 45. Breitengrad auf die gleiche Zeit gestellt. Je eine der Uhren wird in das Polargebiet bzw. in die Äquatorgegend gebracht. Bei erneutem Vergleich mittels Radiosignal zeigen die Uhren unterschiedliche Zeiten an. (Die Temperatur soll überall gleich sein! Die Uhr am 45. Breitengrad soll normal gehen!)
  - 6.1. Geben Sie dafür eine Erklärung!
  - 6.2. Welche Uhr geht vor, welche Uhr geht nach?
7. Der im Bild 112/2 beschriebene horizontale Federschwinger ist genaugenommen zugleich auch ein Fadenpendel. Untersuchen Sie, welchen Einfluß die Pendellänge auf den Versuch hat.

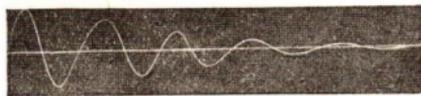
## 1.6. Gedämpfte Schwingungen

Bei allen Schwingungen, die bisher betrachtet wurden, nahmen die Amplituden mit der Zeit ab. Solche Schwingungen nennt man *gedämpfte Schwingungen*. Alle im Abschnitt 1.4.1. beschriebenen Schwingungen sind genaugenommen gedämpft. Befestigt man an den Tragschnüren eines Sandpendels eine große Pappscheibe, dann wird die Dämpfung besonders groß. Zieht man eine schwingende Blattfeder mit Schreibspitze über eine beruhte Glasplatte, so zeichnet sie eine gedämpfte Schwingung auf (Bild 123/1).

Die Ursache der Amplitudenabnahme bei den mechanischen Schwingungen ist die allmähliche Umwandlung der mechanischen Energie in Wärmeenergie durch den Luftwiderstand, die Reibung an den Aufhängestellen usw.

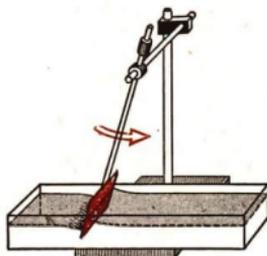
**Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, heißen gedämpfte Schwingungen.**

Die Dämpfung hat einen wesentlichen Einfluß auf den Schwingungsverlauf, wie man einem Versuch nach Bild 123/2 entnehmen kann.

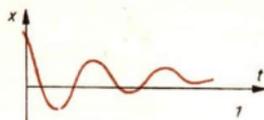


123/1

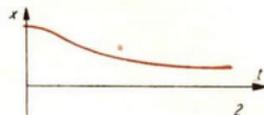
123/2 Die Dämpfungsscheibe des Pendels kann verschieden tief in die Flüssigkeit eintauchen. Welchen Einfluß hat die Eintauchtiefe?



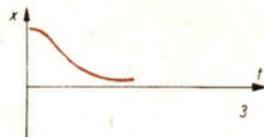
Befindet sich das Pendel vollständig in der Luft, so ist die Dämpfung gering. Die Schwingungsamplitude nimmt nur langsam ab, die Schwingung selbst ist bei kleinen Pendelausschlägen annähernd harmonisch (Bild 124/1.1).



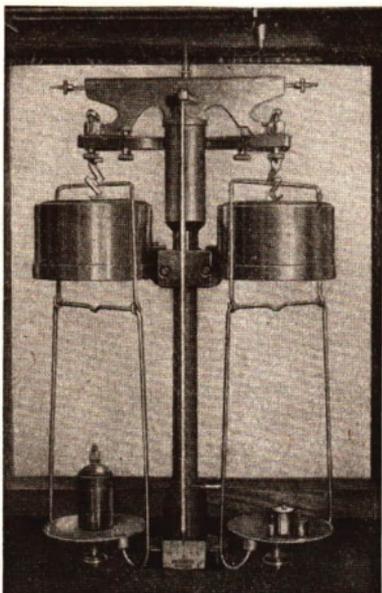
Taucht man die Dämpfungsscheibe vollständig in die Flüssigkeit ein, so ist die Dämpfung sehr groß. Das ausgelenkte Pendel kehrt nur ganz langsam in die Ruhelage zurück, ohne diese zu überschreiten. Man bezeichnet diese Art der Bewegung als **aperiodisch**<sup>1</sup>. Es kommt keine echte Schwingung mehr zustande (Bild 124/1.2). Infolge der quantitativen Änderung einer Größe, in diesem Falle der Dämpfung, wird eine Eigenschaft, eine Qualität, geändert, das heißt, es findet keine Schwingung mehr statt.



Bei einer mittleren Dämpfung, wenn das Pendel nur zum Teil in die Flüssigkeit eintaucht, erfolgt die aperiodische Rückkehr in die Ruhelage am schnellsten. Man spricht dann von dem **aperiodischen Grenzfall** (Bild 124/1.3).



124/1



Besonders stark ist die Dämpfung, wenn man zähe Flüssigkeiten verwendet, beispielsweise Öl oder Glycerin. Die Teilchen dieser Flüssigkeiten haben eine größere innere Reibung als Wasser und lassen sich schwer verdrängen.

Lang andauernde mechanische Schwingungen sind in der Technik oft störend und müssen daher vermieden werden. Man vergrößert deshalb die Dämpfung auf verschiedene Weise. Zum Beispiel wird bei elektrischen Meßinstrumenten eine auf Induktion beruhende Wirbelstrombremse eingebaut. Auch Luftdämpfungen sind gebräuchlich (Bild 124/2).

<sup>1</sup> aperiodisch: nicht periodisch

124/2 Um ein langwährendes Pendel einer Analysenwaage zu vermeiden, werden die Schwingungen gedämpft. Ein Kolben, der am Waagebalken befestigt ist, gleitet mit geringem Spiel in einem Zylinder. Es erfolgt eine Luftdämpfung, hervorgerufen durch den Luftwiderstand

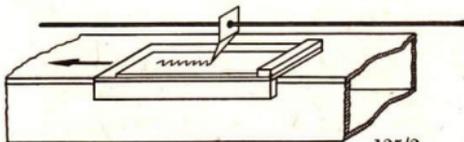


125/1 Dämpfung eines elektrischen Meßgeräts. Bei dieser Dämpfungsart bewegt sich eine Metallscheibe in einer Kammer. Die Luft kann bei der Verdrängung durch die Scheibe nur langsam entweichen. Der Zeiger kommt schnell zur Ruhe, so daß das Ablesen erleichtert wird

Motorräder sind oft mit einer Teleskopfederung versehen. Mit ihrer Hilfe werden Fahrbahnstöße gemildert. Je besser die Federung ist, um so längere Zeit würde der Rahmen mit dem Fahrersitz schwingen. Daher ist die Teleskopfederung, mit einer Öldämpfung versehen. Sie dämpft die Amplitude der Schwingungen, so daß sie schnell kleiner wird.

### Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Beschreiben Sie die Art der Bewegung, die eine Haustür ausführt, wenn der Türschließer mit einer Öldämpfung versehen ist!
2. Worauf beruht die Wirkung des Dämpfers beim Klavier?  
Bestimmen Sie, wie lange eine Saite mit beziehungsweise ohne Dämpfung schwingt!
3. Untersuchen Sie die Dämpfung eines vertikalen Federschwingers in Luft, Wasser oder Öl! Befestigen Sie zu diesem Zweck auf der schwingenden Masse eine Kreisscheibe aus dünnem Blech!
4. Untersuchen Sie mit einem selbstgebauten Monochord entsprechend Bild 125/2 die Schwingungen gezupfter oder mit einem Geigenbogen angestrichener Metallsaiten!



125/2

Als Schreibfläche verwenden Sie am besten eine berußte Glas- oder Metallscheibe.

Sind die aufgezeichneten Schwingungen harmonisch? Sind sie periodisch? Wie ändert sich das Schwingungsbild mit veränderlicher Saitenspannung? Hat der Durchmesser der Saite einen Einfluß?

Entwerfen Sie ein Versuchsprogramm, führen Sie die entsprechenden Versuche durch, und stellen Sie die Ergebnisse in einer kleinen Arbeit zusammen!

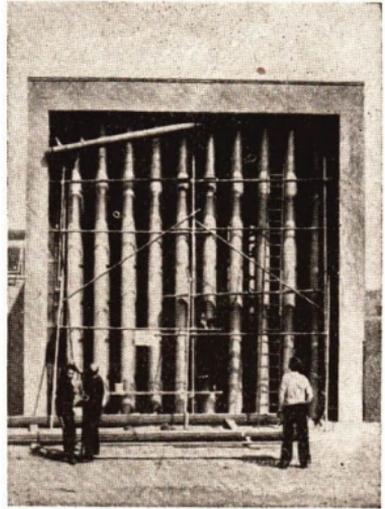
5. Warum werden die Wände in Sende- und Zuschauerräumen mit dicken Stoffen bespannt? (Vgl. Abschnitt 4.5.)
6. Beschreiben Sie die gedämpfte Schwingung unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes!

## 2. Erzwungene Schwingungen

126/1

Die Prüfstände der Motorenwerke sind eine starke Lärmquelle. Deshalb werden diese Motorenprüfstände mit besonderen Schalldämpfern ausgestattet.

Der entstehende Lärm rührt her von den Schwingungen einzelner Körper (Fenster-scheiben, Hauswände, Luftmassen), denen die Druckschwankungen im Auspuff und in den Ansaugkanälen der Triebwerke auf-gezwungen werden. Man bezeichnet sie als erzwungene Schwingungen.



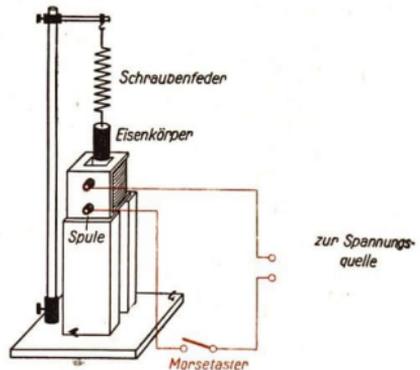
### 2.1. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen

Ein Federschwinger kann durch einen einmaligen Anstoß in Schwingungen versetzt werden. Er hat eine bestimmte Frequenz, die **Eigenfrequenz**  $f_0$ . Sie ist unabhängig von der Stärke des Anstoßes, aber abhängig von der Federbeschaffenheit und der Masse des schwingenden Körpers.

Ein schwingungsfähiger Körper führt nach einmaligem Anstoß **Eigenschwingungen** aus. Die dabei auftretende Frequenz heißt **Eigenfrequenz**  $f_0$ .

Eine Erregung des Federschwingers ist auch auf andere Weise möglich (Bild 126/1): Mit Hilfe einer Morsetaste kann die unter dem Eisenkörper befindliche Spule periodisch ein- und ausgeschaltet werden. Der Eisenkörper wird dadurch periodisch angezogen; er führt *erzwungene Schwingungen* aus.

126/1 Federschwinger mit magnetischer Anregung

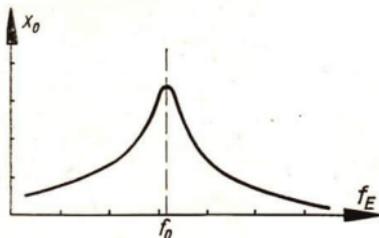


Wird beispielsweise der Schalter in einer Minute 30mal geschlossen und geöffnet, so beträgt die Schaltfrequenz  $f = \frac{n}{t} = 0,5$  Hz. Man bezeichnet die Schaltfrequenz als Erregerfrequenz  $f_E$ .

Die Frequenz einer erzwungenen Schwingung stimmt mit der Erregerfrequenz überein.

## 2.2. Die Resonanz

Erregt man den Federschwinger mit einer kleinen Erregerfrequenz  $f_E$ , so ist die Amplitude der Schwingung nur klein. Vergrößert man allmählich die Erregerfrequenz, so wird die Amplitude größer. Bei einer bestimmten Frequenz wird die Amplitude am größten. Dies ist dann der Fall, wenn  $f_E \approx f_0$  ist. Bei weiterer Erhöhung der Erregerfrequenz nimmt die Amplitude wieder ab. Stellt man die Amplitude des Federschwingers in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz graphisch dar, so erhält man eine besondere Kurve (Bild 127/1). Das starke Mitschwingen des Federschwingers bei übereinstimmender Eigen- und Erregerfrequenz heißt **Resonanz**<sup>1</sup>. Der Federschwinger ist in diesem Fall der *Resonator*, die im Bild 127/2 gezeichnete Kurve ist die *Resonanzkurve*.

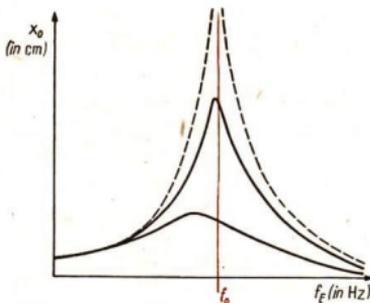


127/1 Der Resonanzkurve kann man folgenden Sachverhalt entnehmen: Mit zunehmender Erregerfrequenz  $f_E$  (auf der Abszisse aufgetragen) nimmt die Amplitude der dadurch hervorgerufenen erzwungenen Schwingungen allmählich zu und dann wieder ab. Besonders große Amplituden treten bei solchen Erregerfrequenzen auf, die sich wenig von der Eigenfrequenz  $f_0$  unterscheiden. Die Amplitude hat ihr Maximum bei  $f_E = f_0$ , wenn die Dämpfung sehr klein ist

Ein schwingungsfähiger Körper wird durch regelmäßige Anstöße in heftige Schwingungen sehr großer Amplitude versetzt, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Körpers übereinstimmt.

Der Verlauf der Resonanzkurve hängt von der Dämpfung des schwingenden Systems ab. Je größer die Dämpfung, um so kleiner ist die Resonanzamplitude. Außerdem verschiebt sich das Maximum nach Frequenzen, die kleiner als  $f_0$  sind.

127/2 Resonanzkurve einer Schwingung bei verschiedener Dämpfung. Erklären Sie die Kurven entsprechend der Bildunterschrift von Bild 127/1



<sup>1</sup> resonare (lat.): widerhallen

Die Resonanzamplitude ist um so größer, je geringer die Dämpfung ist. Bei fehlender Dämpfung würde die Amplitude immer weiter anwachsen (Bild 127/2), wenn der Schwinger nicht vorher zerstört würde. Das ist aber stets der Fall. Man spricht dann von einer Resonanzkatastrophe. Sie kann zum Beispiel eintreten, wenn ein Sprungbrett im Schwimmbad durch *Aufschaukeln* bis zum Bruch beansprucht wird.

- Welche Beispiele zur Resonanz kennen Sie?

## 2.3. Akustische Resonanz

Resonanz läßt sich auch an Schallschwingungen nachweisen. Nach Bild 128/1 wird ein Glasrohr, das beiderseits offen ist, in einen hohen, mit Wasser gefüllten Zylinder eingetaucht. Über das Rohr hält man eine schwingende Stimmgabel, die als Erreger dient. Durch Heben und Senken der Röhre kann die Länge der einseitig abgeschlossenen Luftsäule geändert werden. Sie wird auf die Erregerfrequenz abgestimmt. Bei einer bestimmten Länge wird der Stimmgabelton sehr laut: Die Luftsäule schwingt mit der Stimmgabel in Resonanz.

Wenn man eine schwingende Stimmgabel mit dem Stiel auf eine Tischplatte aufsetzt, so vernimmt man einen lautereren Ton als wenn man die Stimmgabel frei in der Hand hält. Im ersten Falle wird die Unterlage zu erzwungenen Schwingungen angeregt und die Schallenergie daher von einer größeren Fläche abgestrahlt. Die Dämpfung der Stimmgabel ist jedoch in diesem Falle größer, so daß die Stimmgabel schneller zur Ruhe kommt. Es handelt sich bei diesem Beispiel nicht um Resonanz, denn die Eigenfrequenzen der Stimmgabel und der Tischplatte stimmen nicht überein. Von dieser *Schallverstärkung* macht man bei vielen Musikinstrumenten Gebrauch. Schwingende Saiten übertragen auf Grund ihrer geringen Masse und kleinen Berührungsfläche die Schwingungsenergie nur sehr schlecht auf die umgebende Luft.

Bei allen Saiteninstrumenten werden deshalb die Saiten auf einer hölzernen Unterlage, dem sogenannten Resonanzboden, ausgespannt. Der Resonanzboden muß so beschaffen sein, daß seine Eigenfrequenz *nicht* mit der Frequenz der erzeugten Saitenschwingungen übereinstimmt, da sonst Resonanz auftritt.

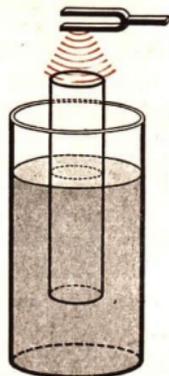
- Wie würde sich das äußern?

## 2.4. Schwingungen in der Technik

Mechanische Schwingungen treten in der Technik äußerst häufig auf. In vielen Fällen sind sie nicht beabsichtigt und stören, in anderen Fällen werden sie für bestimmte technologische Zwecke bewußt hervorgerufen.

### 2.4.1. Frequenzmessung

Um störende Schwingungen beseitigen zu können, muß man ihre Frequenzen genau kennen. Diesem Zweck dient der *Zungenfrequenzmesser*. Er besteht aus einer Reihe



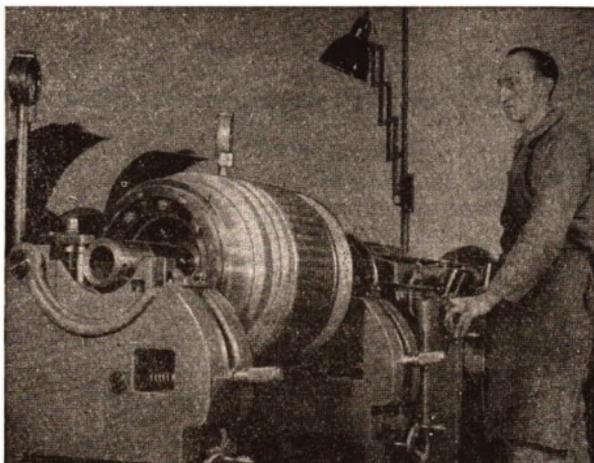
128/1 Resonanz zwischen einer Stimmgabel und einer Luftsäule





### 131/1 Auswuchten eines Elektromotorenankers

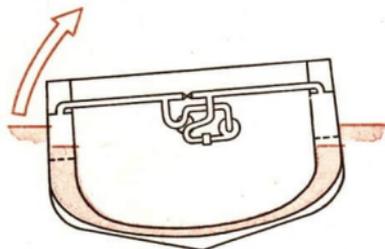
Um störende Schwingungen durch schnell laufende Maschinenteile zu vermeiden, müssen diese ausgewuchtet werden



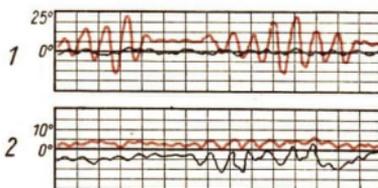
Drehzahlen auch nach dem Auswuchten bestehen. Man muß deshalb darauf achten, daß die kritischen Drehzahlen möglichst schnell „durchfahren“ werden oder daß sie in einem Bereich auftreten, der außerhalb der Betriebsdrehzahlen liegt.

Die Schwingungen der Maschinen werden auf Fundamente und andere Bauteile übertragen. Um diese Übertragung zu mindern, werden Dämpfungen angebracht. Dies kann durch Zwischenlagen dämpfender Werkstoffe, wie Gummi und Kork, erfolgen. Die Blattfedern der Fahrzeuge dämpfen auftretende Schwingungen infolge der zwischen den einzelnen Federblättern vorhandenen Reibung.

Eine weitere Schwingungserscheinung ist das Schlingern von Schiffen, das man mit Hilfe von Schlingertanks zu beseitigen sucht. Dabei wird eine Wassermasse im Schiffskörper im gleichen Rhythmus des Schlingerns, aber mit entgegengesetzter Elongation, so bewegt, daß die Schlingerbewegung fast völlig unterdrückt wird (Bilder 131/2 und 131/3).



131/2 Schlingertankanlage in einem Fahrgastschiff



131/3 Schlingerbewegung eines Schiffes bei Seegang (Neigung in Grad)  
1 ohne Schlingertank, 2 mit Schlingertank  
rot: Schiffsbewegung  
schwarz: Bewegung des Schlingertankinhalts

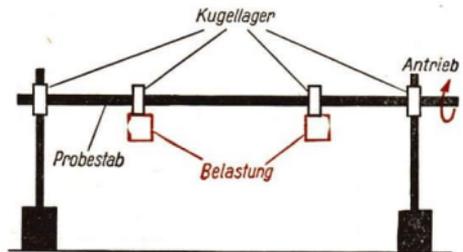
In der Luftfahrttechnik treten ebenfalls Schwingungen auf.

Beim Überschreiten der Schallgeschwindigkeit werden zum Beispiel sehr große Energiebeträge auf das Flugzeug übertragen. Bei den ersten Versuchen, die sogenannte „Schallmauer“ zu durchbrechen, sind viele Flugzeuge durch die auftretenden Schwingungen in der Luft zerstört worden, weil die Tragflächen, Steuerorgane, Triebwerke oder andere Flugzeugteile durch Resonanz zu Bruch gingen.

Bei der Untersuchung von Strahltriebwerken mit hohen Ausströmgeschwindigkeiten ist es wichtig, daß der austretende Gasstrahl nicht in einen ungünstigen Schwingungszustand gerät, da jede Schwingung Energieaufwand bedeutet, der der Vortriebswirkung verlorengeht.

Ähnliche Erscheinungen, die für die Leistungsabgabe entscheidend sind, treten auch bei Kolbenmotoren auf. Die Ausschubarbeit für die Verbrennungsgase wird dann ein Minimum, wenn die Länge der im Auspuff schwingenden Luftsäule in Übereinstimmung mit der Schwingungszahl, in diesem Falle mit der Drehzahl des Motors, steht.

Ein willkürliches Verändern der Auspuffanlage, ohne Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge, führt meist zu einem Mißerfolg. Erst genaue Berechnungen, die nur mit den Meßwerten der physikalischen Größen vorgenommen werden können, führen zu neuen Erkenntnissen.



#### 2.4.4. Schwingungserzeugende Geräte

Bei der Werkstoffprüfung benutzt man sehr oft den Dauerschwingversuch, um die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes gegen wechselnde Beanspruchungen zu untersuchen (Bild 132/1).

Geräte, die in Kraftfahrzeugen, Flugzeugen und anderen Verkehrsmitteln eingebaut sind, werden durch Erschütterungen beansprucht. Sie müssen deshalb vor dem Einbau auf ihre Verwendungsmöglichkeit überprüft werden. Zu diesem Zwecke werden sie auf sogenannten

#### 132/1 Dauerschwingversuch

Ein Probestab ist zwischen Kugellagern drehbar gelagert. Durch die belasteten inneren Kugellager wird der Stab durchgebogen. Bei jeder Umdrehung erfolgt eine Schwingung. Man beobachtet etwa  $10^6$  bis  $10^7$  solcher „Lastspiele“

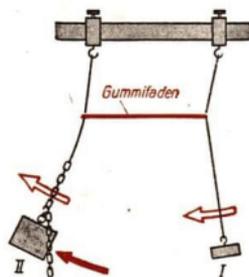
132/2 Schwingtisch ST 300, hergestellt im VEB Geräte- und Regler-Werk Teltow. Der Prüfling wird auf dem Schwingtisch eingespannt. Ein Elektromotor versetzt über einen Exzenter den Tisch in Schwingungen



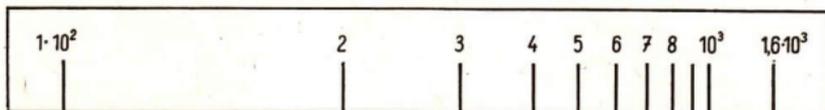
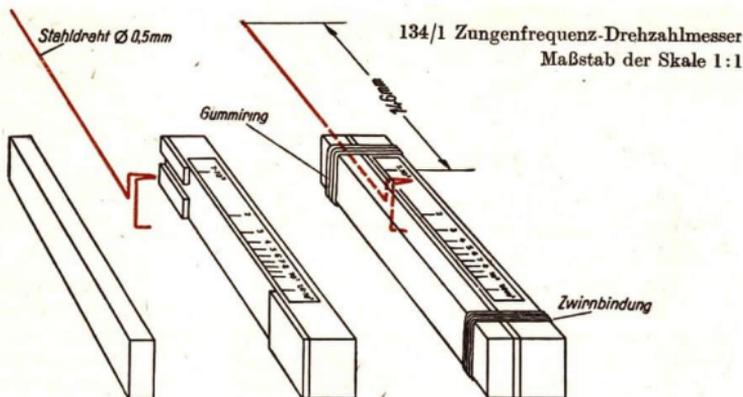
Schwingtischen angebracht, die auf eine Frequenz von 20 Hz bis 1000 Hz eingestellt werden können (Bild 132/2). Dadurch werden die Vorgänge denen der Praxis künstlich nachgeahmt. Auf Grund dieser Untersuchungen können entsprechende Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

### Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Setzen Sie das Hinterrad eines herumgedrehten Fahrrades in sehr schnelle Drehungen! Welche Beobachtung machen Sie? Warum werden vor allem Rennräder zentriert? Wie geschieht das?
2. Zwei Stimmgabeln gleicher Frequenz, die auf einseitig offenen Holzkästen bestimmter Abmessungen (dadurch Resonanz zwischen Stimmgabel und Luftsäule im Kasten!) befestigt sind, werden in geringer Entfernung voneinander aufgestellt. Schlägt man die eine Stimmgabel an, so beginnt die andere ebenfalls zu schwingen. Man kann dies nachweisen, indem man die erste Stimmgabel festhält. Man nimmt dann den von der zweiten Stimmgabel abgestrahlten Ton wahr. Ändert man die Eigenfrequenz der einen Stimmgabel durch Aufschrauben einer kleinen Masse, so schwingt die andere Stimmgabel nicht mit. Beschreiben Sie unter Verwendung der Begriffe *Erreger*, *Resonator*, *Eigenfrequenz*, *Erregerfrequenz* und *Resonanz* den gesamten Versuch und seine Ergebnisse in Form einer Niederschrift!
3. GALILEO GALILEI schreibt in seinen Untersuchungen über die Pendelschwingungen: „... einem ruhenden noch so schweren Pendel können wir durch bloßes Anblasen eine Bewegung erteilen, und zwar eine recht beträchtliche, wenn wir ...“  
Setzen Sie den Gedankengang fort!
4. Warum sollen Marschabteilungen über leichte Brücken, vor allem über Hängebrücken, nicht im Gleichschritt marschieren?
5. Stellen Sie nach Bild 133/1 eine Versuchsanordnung zusammen! In welcher Höhe muß das Wägestück II befestigt werden, damit Resonanz herrscht?
6. Eine Stimmgabel mit der Frequenz  $f = 440$  Hz wird einer Stimmgabel mit der Frequenz  $f = 280$  Hz gegenübergestellt und angeschlagen. Erfolgt ein Mitschwingen? Begründen Sie Ihre Antwort!
7. Auf welche Weise dämpft man die Schwingungsübertragung vom Kraftwagenmotor auf den Fahrzeughahmen?
8. Untersuchen Sie in ihrem Ausbildungsbetrieb, auf welche Weise die Ausbreitung störender Schwingungen auf die Gebäudeteile vermindert wird!
9. Berichten Sie über Beobachtungen, die Sie zu Hause machen, wenn schwere Fahrzeuge vorüberfahren!
10. Warum müssen PKW-Räder sorgfältig ausgewuchtet sein? Welche Gefahrenquellen ergeben sich durch nicht ausgewuchtete Räder?
11. Warum sitzt das Orchester im Konzertsaal auf einem Holzpodium?
12. Informieren Sie sich über den Aufbau und die Wirkungsweise eines Schalldämpfers bei einem Motorrad!



133/1



13. Bauen Sie sich einen Drehzahlmesser für Flugmodellmotoren, der als Zungenfrequenzmesser die Zahl der Arbeitstakte anzeigt (Bild 134/1).
14. Beschreiben Sie an einem Gerät oder einer Maschine, auf welche Weise Schwingungen erzeugt werden (z. B. Kartoffelsortierer!)

## Zusammenfassung

1. Die Schwingung ist ein periodischer Vorgang, bei dem sich ständig Energieformen ineinander umwandeln.

Erläutern Sie den Satz am Beispiel eines schwingenden Fadenpendels!

2. Elongation, Amplitude, Periode und Frequenz sind die Kenngrößen einer Schwingung.

Wie sind diese Kenngrößen definiert?

3. Für die Weg-Zeit-Funktion der harmonischen Schwingung gilt folgender Ausdruck:  

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Was bedeuten die Formelzeichen? Wie läßt sich die Funktion grafisch darstellen?

4. Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, heißen gedämpfte Schwingungen.

Welche Voraussetzungen sind notwendig, damit eine Schwingung wenig gedämpft oder ungedämpft verläuft?

5. Ein schwingungsfähiger Körper wird durch regelmäßige Anstöße in heftige Schwingungen sehr großer Amplitude versetzt, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Körpers übereinstimmt (Resonanz).

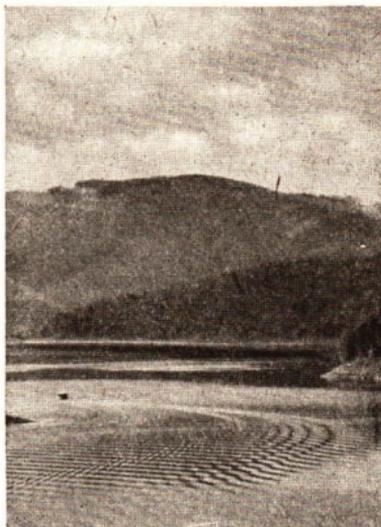
Welche Bedeutung hat die Resonanz in der Technik?

### 3. Grundbegriffe der Wellenlehre

In schneller Fahrt durchschneidet das Motorboot den glatten Wasserspiegel auf der Saalealsperre. Dabei hinterläßt es weithin sichtbare Wellen. Die aufzuwendende Energie stammt von der Antriebsenergie des Bootes.

Außer solchen *Wasserwellen* gibt es noch andere Beispiele für Wellen.

Der Startschuß beim sportlichen Wettkampf dringt durch *Schallwellen* an unser Ohr. *Elektromagnetische Wellen* übertragen die Bilder der sowjetischen Kosmonauten zur Erde.



#### 3.1. Entstehung von Wellen

Neben Wasserwellen, Schallwellen und anderen mechanischen Wellen sind vor allem elektromagnetische Wellen von besonderer Bedeutung. Sie können im allgemeinen von unseren Sinnesorganen nicht unmittelbar wahrgenommen werden. Licht- und Wärmewellen bilden eine Ausnahme. Man erklärt deshalb die bei elektromagnetischen Wellen (Lichtwellen, Rundfunkwellen, Röntgenwellen usw.) auftretenden Erscheinungen oft unter Verwendung mechanischer Wellen, wobei jedoch zu beachten ist, daß die Wellenvorgänge einander nicht ohne weiteres gleichgesetzt werden dürfen. Man benutzt die Erscheinungen der mechanischen Welle nur als Modell.

Die allen *Wellen* gemeinsamen Merkmale und Erscheinungen werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

##### 3.1.1. Kopplung schwingungsfähiger Systeme

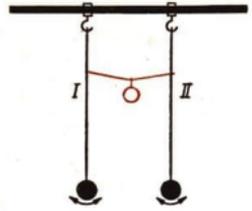
Damit ein Schwingungserreger auf einen anderen Körper einwirken kann, muß zwischen beiden eine Verbindung bestehen. Sie müssen miteinander *gekoppelt* sein.

###### Beispiel

Hängt man zwei Fadenpendel gleicher Länge nebeneinander auf und stößt das eine an, so bleibt, wie zu erwarten, das andere in Ruhe. Die Fadenpendel werden dann durch einen dünnen Faden miteinander verbunden (Bild 136/1).

Man bezeichnet eine solche Verbindung als *Kopplung*. Stößt man jetzt das eine Pendel an, so gerät auch das zweite Pendel in Schwingungen. Die Amplitude des zuerst erregten Pendels nimmt dabei immer mehr ab. Dagegen wird die Amplitude des anderen Pendels größer. Ist das ursprünglich erregte Pendel zur Ruhe gekommen, dann hat die Amplitude des anderen Pendels ihren größten Wert erreicht.

Die Energie des ersten Schwingers ist auf den anderen Schwinger übertragen worden. Dann kehrt sich der Vorgang um, und das erste Pendel beginnt wieder zu schwingen. Die wechselnde Energieübertragung dauert so lange an, bis sich durch Dämpfung die gesamte Schwingungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt hat.



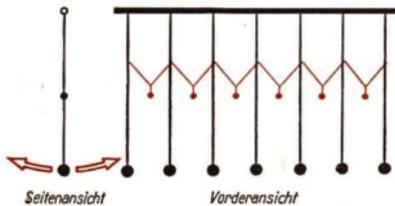
136/1 Kopplung zweier Fadenpendel

**Durch Kopplung kann Energie von einem schwingenden Körper auf einen anderen schwingungsfähigen Körper übertragen werden.**

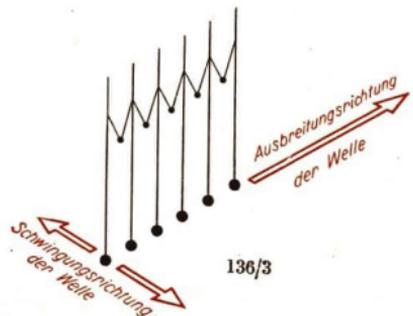
Belastet man den Verbindungsfaden mit einem kleinen Wägestück, so wird die Energie auf das andere Pendel in kürzerer Zeit übertragen. Man spricht von *fester Kopplung*, wenn die Energieübertragung schnell vor sich geht, und von *loser Kopplung*, wenn sie langsam verläuft. Je straffer der Faden gespannt ist, um so fester ist die Kopplung.

**Bei fester Kopplung wird die Energie schneller ausgetauscht als bei loser Kopplung.**

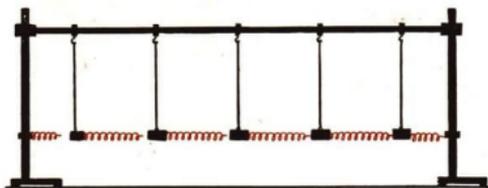
Wenn man eine größere Zahl gleich langer Fadenpendel so aufhängt, daß alle Pendel durch gespannte Fäden miteinander gekoppelt sind (Bild 136/2), dann läßt sich an dieser Anordnung erkennen, wie eine Schwingung übertragen werden kann. Wird das Pendel am linken Ende dieser *Pendelkette* einmalig angestoßen, so führt es um die Ruhelage gedämpfte Schwingungen aus. Durch die Kopplung werden die Schwingungen auf die benachbarten Pendel übertragen; der Schwingungsvorgang wandert von links nach rechts. Man spricht von einer *fortschreitenden Welle*. Vom Ende der Pendelkette läuft der Vorgang wieder zurück und wiederholt sich dann. Die zugeführte Energie wird durch Reibung allmählich in Wärme umgewandelt bzw. auf die umgebende Luft übertragen.



136/2 Pendelkette zur Erzeugung einer Welle. Die einzelnen Pendel schwingen senkrecht zur Zeichenebene



136/3



137/1 Federschwingerkette  
 Wird die linke Feder einmalig gespannt oder zusammengedrückt und dann freigegeben, so läuft eine Welle durch die Kette nach rechts und kehrt von dort wieder zurück.  
 Die Kopplung erfolgt hierbei durch Federn

Ähnlich verhält sich auch eine *Federschwingerkette* (Bild 137/1).

- *Vergleichen Sie eine Federschwingerkette mit einem anfahrenden Eisenbahnzug!*

### 3.1.2. Wellenarten

Zwischen den Wellen in einer Pendelkette und in einer Federschwingerkette besteht ein wesentlicher Unterschied:

Die Pendel schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Bild 136/3); bei den Federschwingern fallen dagegen Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung zusammen.

Man unterscheidet deshalb *Transversalwellen*<sup>1</sup> und *Longitudinalwellen*<sup>2</sup>.

Eine Welle, bei der sich die gekoppelten Schwinger senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle bewegen, nennt man eine *Transversal- oder Querwelle*.  
 Eine Welle, bei der sich die gekoppelten Schwinger in der Ausbreitungsrichtung der Welle bewegen, nennt man eine *Longitudinal- oder Längswelle*.

Ähnliche Vorgänge wie in Schwinger- und Pendelketten treten auch in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern auf. Die Schwinger, man nennt sie auch *Oszillatoren*<sup>3</sup>, sind hierbei die kleinsten Teilchen der Stoffe selbst. Zwischen den Molekülen wirken elastische Kopplungskräfte (vgl. Statik der Flüssigkeiten und Gase, Seiten 9 bis 10), die die Schwingung übertragen.

Es kann allgemein gesagt werden: Voraussetzung für das Entstehen einer fortschreitenden Welle ist eine Anzahl von Oszillatoren, die miteinander gekoppelt sind. Ihre Gesamtheit nennt man das *Medium*<sup>4</sup> der Welle.

**In einem Medium entsteht eine fortschreitende Welle dadurch, daß gekoppelte Oszillatoren zeitlich nacheinander gleichartige Schwingungen ausführen.**

Schlägt man mit einem Hammer gegen die Endfläche eines Stahlstabs, der an einem Stativ festgeklemmt ist, so läuft eine Longitudinalwelle durch den Stab. Die Stahlkugel (Bild 138/1) wird weggeschleudert.

<sup>1</sup> transversus (lat.): quer

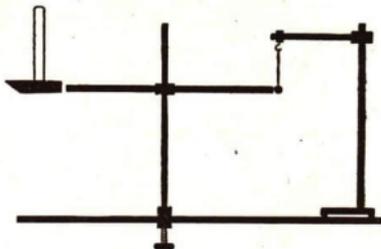
<sup>2</sup> longitudo (lat.): Länge

<sup>3</sup> oscillare (lat.): pendeln

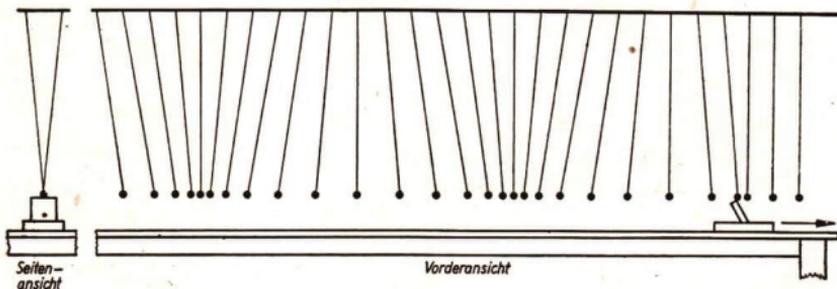
<sup>4</sup> medium (lat.): das Mittel

Die Vorgänge im Stab können durch einen Modellversuch veranschaulicht werden. Man benutzt dazu die in Bild 138/2 wieder-gegebene Wellenmaschine. Eine Anzahl bifilarer Pendel ist so in einer Reihe angeordnet, daß alle Pendel nur in Richtung dieser Reihe schwingen können. Da sie nicht miteinander gekoppelt sind, entsprechen die im folgenden beschriebenen Vorgänge nur in ihrer äußeren Erscheinung den Longitudinalwellen. Gesetzmäßigkeiten dürfen daher aus solchen Modellversuchen nicht abgeleitet werden.

Alle Pendel werden nacheinander angestoßen, indem man mit einem kleinen Brett leicht streifend unter den Pendelkörpern entlangfährt. Man sieht eine Stelle durch die Reihe hindurchlaufen, an der sich die Pendelkörper zusammendrängen. Ihr folgt eine Stelle, an der der Abstand der Pendelkörper stark vergrößert ist. Es laufen also Verdichtungen und Verdünnungen hintereinander durch die Reihe.



138/1 Ausbreitung einer Longitudinalwelle in einem Stahlstab



138/2 Modellversuch zur Longitudinalwelle

### Beispiel

Befestigen Sie ein Seil von mehreren Metern Länge an einem Wandhaken und lassen Sie es lose durchhängen. Lenken Sie es durch einen leichten Schlag seitlich aus: Durch das Seil läuft eine Transversalwelle (Bild 157/1).

### 3.1.3. Energieübertragung durch Wellen

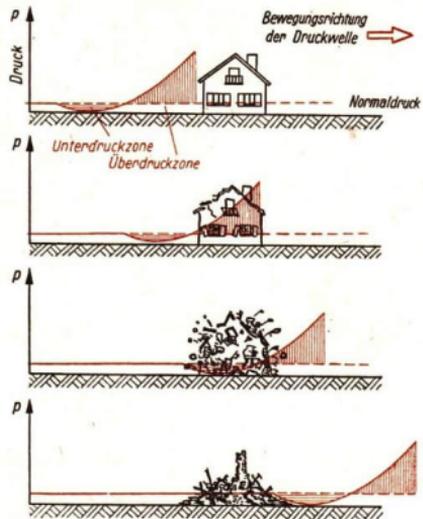
Seit Jahren versucht die Sowjetunion, mit den imperialistischen Staaten ein Abkommen über die Einstellung von Kernwaffenversuchen zu vereinbaren, um die Gefahr eines atomaren Krieges zu bannen. Zur Kontrolle über die Einhaltung eines solchen Abkommens wird unter anderem vorgeschlagen, automatische Stationen zu errichten, die die von einer Atomwaffenexplosion herrührenden Erschütterungen des Erdballes registrieren können.

### 139/1 Schema der Druckwellenwirkung

Solche Druckwellen, deren Ursache die bei der Explosion frei werdende Energie ist, laufen auch durch die Luft.

Im Zentrum der Detonation<sup>1</sup> entsteht ein gewaltiger Überdruck, der sich auszugleichen sucht. Dadurch wird die umgebende Luft komprimiert. Diese Zone hohen Druckes breitet sich mit großer Geschwindigkeit aus. Auf die Druckwellenfront folgt ein Gebiet geringeren Druckes, die Unterdruckzone (Bild 139/1).

Noch in größerer Entfernung vom Detonationszentrum kommt es durch die Druckwelle zu Zerstörungen. Es gelangen aber nicht etwa Gasteilchen vom Detonationszentrum bis zu diesem Ort. Vielmehr wird die Energie in Form der Welle vom Zentrum aus übertragen.



**Mit der Ausbreitung von Wellen ist eine Energieübertragung verbunden.**

Diese Energieübertragung durch Wellen läßt sich bei allen Wellenarten beobachten:

Um das erste Pendel einer Pendelkette zum Schwingen anzuregen, muß ihm Energie zugeführt werden. Diese Energie überträgt sich durch die Kopplung auch auf die anderen Pendel; denn diese beginnen nun auch zu schwingen.

Beim Erdbeben breitet sich der Schwingungsvorgang ebenfalls als Welle aus. Die Energie der Erdbebenwellen ist auch in großer Entfernung vom Ort des Bebens noch beträchtlich. Erdbebenwellen werden mit Hilfe sehr schwerer Pendel, sogenannter Seismographen, aufgezeichnet.

### 3.1.4. Periodische Wellen

Das Bild auf Seite 135 zeigt die Wellenbildung hinter einem Boot. Diese Wellen breiten sich ständig vom Boot fortlaufend aus. Dazu folgender Versuch:

An dem einen Ende eines langes Seiles werden durch *dauerndes* Hin- und Herbewegen Wellen hervorgerufen, die durch das Seil wandern. Es entstehen periodische Wellen, in diesem Fall *periodische Transversalwellen*. Die von der Welle übertragene Energie wird hierbei durch die Reibung im Seil in Wärme umgewandelt bzw. auf die Luft übertragen.

*Periodische Longitudinalwellen* entstehen um einen Lautsprecher, der einen Ton gleichbleibender Frequenz abstrahlt. Die Schwingungen der Lautsprechermembran werden auf die umgebende Luft übertragen. Die Luft wird fortlaufend komprimiert und entspannt sich wieder. Es breiten sich Druckschwankungen aus, die wir als periodische Schallwellen bezeichnen.

<sup>1</sup> Detonation: Knall, Entzündung

In beiden Beispielen wird ständig Energie vom Erregungszentrum an die angrenzenden Oszillatoren weitergegeben.

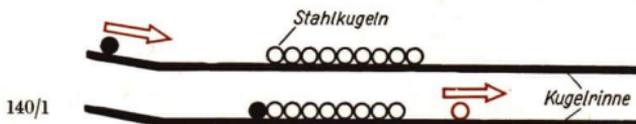
**In einem Medium entstehen periodische Wellen, wenn die Oszillatoren im Erregungszentrum durch ständige Energiezufuhr zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.**

Beachten Sie unbedingt: Die Oszillatoren führen nur Schwingungen um ihre Ruhelage aus. Sie verschieben sich also nicht mit der Welle!

Die hier beschriebenen periodischen Wellen werden allgemein als Wellen bezeichnet. Diese Wellen werden in den weiteren Abschnitten betrachtet.

### Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Welcher Vorgang wird durch einen Versuch nach Bild 140/1 modellmäßig wiedergegeben?

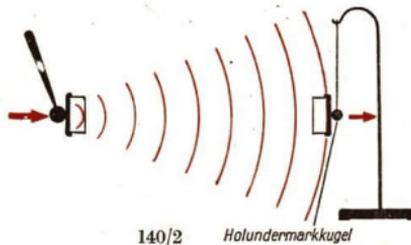


2. Veranschaulichen Sie sich eine Welle, indem Sie die Wagen einer Spielzeugeisenbahn durch Schraubenfedern koppeln.  
3. Erklären Sie die Begriffe Transversalwelle, Longitudinalwelle, Oszillator, Kopplung!  
4. Legen Sie ein Lineal flach auf den Tisch. An das eine Ende wird eine Münze herangeschoben. Gegen das andere Ende „schnippen“ Sie eine andere Münze. – Erklären Sie Ihre Beobachtungen!

5. Von zwei Konservenbüchsen werden Deckel und Boden entfernt. Die Büchsen werden einseitig durch gespanntes Pergamentpapier verschlossen. Führen Sie damit einen Versuch nach Bild 140/2 aus.

Was beobachten Sie, wenn Sie gegen die eine Membran schlagen? Geben Sie eine Erklärung!

6. Welches Merkmal einer Welle fehlt bei einem windbewegten Ährenfeld?  
Mit welchem Versuch läßt sich der Vorgang vergleichen?



7. Warum können bei Explosionen noch in größerer Entfernung die Fensterscheiben zerstört werden?

8. Unterirdische Atombombenversuche können selbst auf größere Entfernungen noch sicher festgestellt werden. Welches Verfahren kann man dazu verwenden? Informieren Sie sich an Hand populärwissenschaftlicher Literatur!

### 3.2. Grafische Darstellung von Wellen

Auch in einer Pendelkette lassen sich periodisch Wellen hervorrufen, wenn man das erste Pendel zu erzwungenen Schwingungen anregt (Bild 141/1). Durch die Pendelkette laufen dann dauernd *Wellenberge und Wellentäler*.

141/1 Die Pendelkörper bestehen aus Eisenkugeln. Die Anregung erfolgt durch einen Elektromagneten (vgl. Bild 126/1). Damit die Wellen vom anderen Ende der Pendelkette nicht zurückkehren, werden die letzten Pendel stark gedämpft, indem man sie in einem ölgefüllten Gefäß schwingen läßt

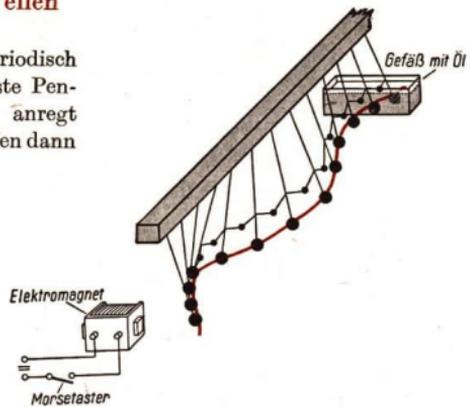
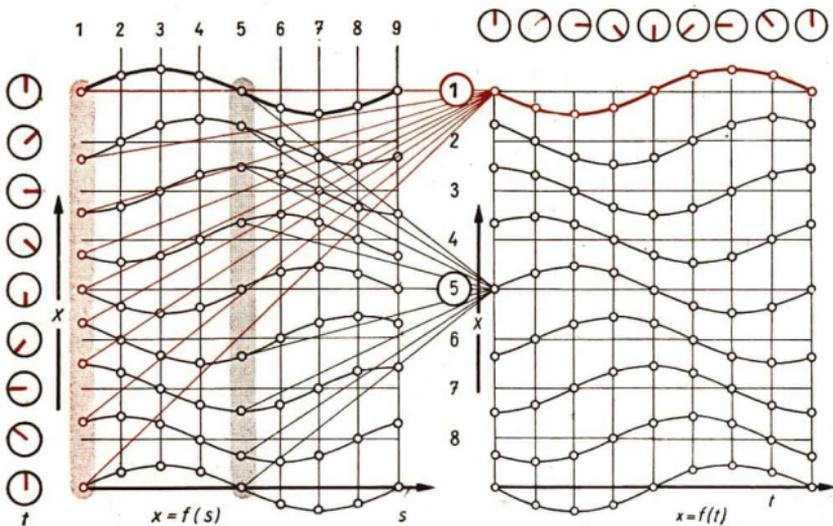


Bild 141/2 links zeigt die Pendelkette zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten in der Draufsicht. Es handelt sich gewissermaßen um Momentbilder der Welle in sehr kurzen Zeitabständen. Allen Einzelbildern ist zu entnehmen, daß sich die Oszillatoren auf einer Wellenlinie anordnen, die sinusförmig ist. In aufeinanderfolgenden Bildern ist die Elongation jedes einzelnen Schwingers etwas verändert: die Wellenlinie verschiebt sich dadurch nach rechts.



141/2

Eine fortschreitende Transversalwelle erkennt man daran, daß sich die Wellenlinie gleichförmig in Ausbreitungsrichtung der Welle verschiebt.

Aus den Momentbildern (die Zeit ist für alle Schwinger gleich!) erkennt man folgende Gesetzmäßigkeit:

Die jeweilige Elongation der Oszillatoren ändert sich mit der Entfernung vom Erregungszentrum.

In mathematischer Darstellung schreibt man dafür:

$$x = f(s), \quad t = \text{const.}$$

Diese Feststellung reicht jedoch nicht aus. Den Weg-Zeit-Diagrammen der einzelnen Oszillatoren (Bild 141/2 rechts) entnimmt man eine weitere Gesetzmäßigkeit:

Die Elongation des einzelnen Oszillators (d. h. die Entfernung  $s$  wird konstant gehalten) ändert sich mit der Zeit.

Dafür läßt sich schreiben:

$$x = f(t), \quad s = \text{const.}$$

Beide Aussagen kann man zusammenfassen:

Eine Welle ist ein Vorgang, bei dem sich die Elongation der Oszillatoren örtlich und zeitlich ändert und bei dem Energie übertragen wird.

$$x = f(s, t)$$

Wellen lassen sich aus diesem Grunde in einem einzigen Diagramm nicht vollständig darstellen. Meist gibt man Transversalwellen durch Momentaufnahmen zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder.

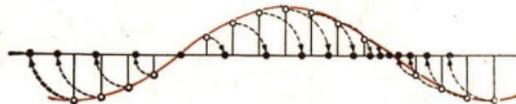
Um eine Longitudinalwelle grafisch darzustellen, geht man von der Darstellung einer Transversalwelle aus. Die einzelnen Elongationen sind hier senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufgetragen. Klappt man nunmehr die einzelnen Elongationen um  $90^\circ$  rechtsdrehend um ihre Fußpunkte, so erhält man ein Bild der Anordnung der Teilchen bei einer Longitudinalwelle (Bild 142/1).

Das Fortschreiten der Longitudinalwelle kann ebenfalls durch mehrere Momentbilder veranschaulicht werden (Bild 142/2).

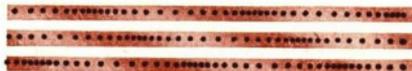
Im allgemeinen breiten sich Wellen in einer Ebene oder räumlich aus.

- Wie breiten sich Wasserwellen, Schallwellen und Rundfunkwellen aus?

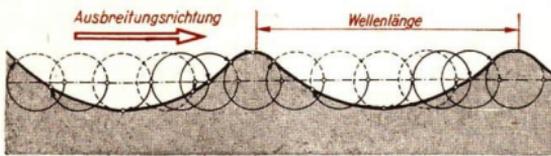
142/1 Zeichnerische Darstellung einer Longitudinalwelle aus einer Transversalwelle



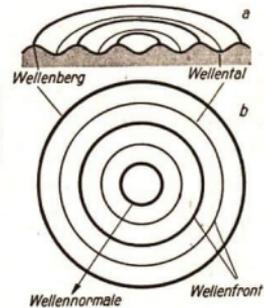
142/2 Zeichnerische Darstellung einer fortschreitenden Longitudinalwelle (Momentbilder)



Wasserwellen könnte man auf den ersten Eindruck hin ebenfalls für Transversalwellen halten. Die Wasserteilchen an der Oberfläche der Flüssigkeit führen jedoch kreisende Bewegungen aus (Bild 143/1), es entstehen Oberflächenwellen.



143/1 Oberflächenwelle im senkrechten Schnitt



143/2 Zeichnerische Darstellung einer Oberflächenwelle (Momentbild, vereinfacht)

Bei Transversalwellen erfolgen dagegen die Bewegungen der Teilchen geradlinig. Man benutzt Wasserwellen oft, um bestimmte Gesetzmäßigkeiten darzustellen, die bei allen Wellen auftreten (vgl. Seite 149). Bild 143/2 zeigt einen Schnitt durch eine Wasserwelle. Alle Teilchen, die sich auf konzentrischen Kreisringen befinden, weisen zu einem bestimmten Zeitpunkt der Beobachtung den gleichen Schwingungszustand auf. Die Linien, die phasengleich schwingende Teilchen miteinander verbinden, heißen *Wellenfronten*. Wellenfronten stellt man zeichnerisch dar, indem man sie auf eine Ebene projiziert. Man zeichnet nur die Wellenberge, die Wellenbergen oder Wellentälern entsprechen. Bei Schallwellen bezeichnet man die Stellen der Verdichtung und der Verdünnung als die Wellenfronten. Die auf der Wellenfront errichtete Senkrechte gibt die Richtung an, in der sich die Welle ausbreitet. Sie heißt *Wellennormale*.

**Auf einer Wellenfläche oder in einer Wellenfront befinden sich alle Teilchen im gleichen Schwingungszustand. Die Wellennormale gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Sie steht senkrecht auf der Wellenfläche oder Wellenfront.**

### 3.3. Kenngrößen einer Welle

Die Wellen werden ebenso wie die Schwingungen durch bestimmte Größen charakterisiert. Es sind dies die Frequenz, die Amplitude, die Phase, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die **Frequenz  $f$**  einer Welle ist gleich der Schwingungsfrequenz der einzelnen Teilchen. Sie wird ebenfalls in Hertz gemessen.

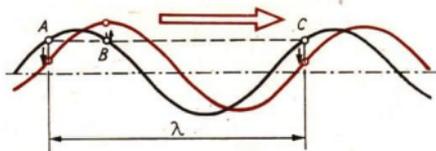
Die **Amplitude  $x_0$**  einer Welle ist gleich der Amplitude der einzelnen schwingenden Teilchen.

Mit der Entfernung vom Entstehungsort nimmt die Amplitude der fortschreitenden Welle allmählich ab. Die Abnahme ist von der Dämpfung abhängig. Bei großer Dämpfung nimmt die Amplitude der Welle sehr schnell ab.

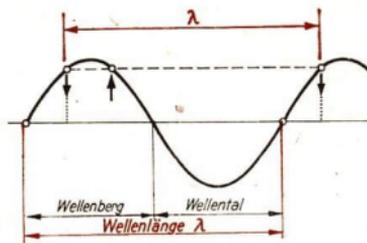
Die Amplitude ist ein Kennzeichen der übertragenen Energie. Eine große Amplitude der fortschreitenden Welle bedeutet die Übertragung eines großen Energiebetrages.

**Gleiche Phase**, das heißt gleichen Schwingungszustand, haben zwei Teilchen, wenn sie in der Elongation *und* in der Schwingungsrichtung übereinstimmen.

So befinden sich in Bild 144/1 die beiden Teilchen *A* und *C* im gleichen Schwingungszustand, die Teilchen *A* und *B* dagegen nicht. *A* und *B* haben zwar den gleichen Ausschlag, bewegen sich aber in entgegengesetzter Richtung. Dies ist an der roten Kurve des Bildes 144/1 zu erkennen, die die Welle zu einem späteren Zeitpunkt zeigt.



144/1 Schwingungszustand der Teilchen einer fortschreitenden Welle (Momentbild)



144/2 Wellenlänge einer fortschreitenden Welle

Die **Wellenlänge  $\lambda$**  bezeichnet den Abstand zweier in Ausbreitungsrichtung der Welle aufeinanderfolgender Punkte, die sich in gleicher Phase befinden (Bild 144/2).

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$**  gibt an, wie schnell sich eine bestimmte Phase (beispielsweise ein Wellenberg) im Medium ausbreitet. Beachten Sie auch hier: Nicht die Oszillatoren bewegen sich fort, sondern die Phase wandert!



144/3 Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle

Wie bei der Bestimmung der Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Fahrzeuges stellt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit dadurch fest, daß man die Wegstrecke  $s$  mißt, die eine bestimmte Phase in der Zeit  $t$  zurücklegt, und den Quotienten aus  $s$  und  $t$  bildet (Bild 144/3):

$$c = \frac{s}{t}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  oder in  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  gemessen.

### 3.4. Die Grundgleichung der Wellenlehre

Zwischen der Frequenz, der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang.

Im Bild 141/2 links verschiebt sich die Phase (Wellenberg) in der Zeit zwischen der ersten und letzten Momentaufnahme um eine Wellenlänge nach rechts. Diese Zeit ist gleich der Schwingungsdauer  $T$  jedes Teilchens des Mediums. Man erkennt das daran, daß die Momentbilder 1 und 9 völlig übereinstimmen. Ersetzt man in der Gleichung  $c = \frac{s}{t}$  die beliebige Strecke  $s$  durch die Strecke  $\lambda$ , so ist die Zeit  $t$  gleich der Schwingungsdauer  $T$ :

$$c = \frac{\lambda}{T}. \quad \text{Mit } T = \frac{1}{f} \text{ erhält man die}$$

Grundgleichung der Wellenlehre:

$$c = \lambda \cdot f$$

(22)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge und der Frequenz.

#### Beispiele

1. Bei einem Wellengerät nach JULIUS (Bild 145/1) beträgt die Wellenlänge 25 cm. Ein angestoßener Querstab führt 8 Schwingungen in 5 Sekunden aus. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit?

Gegeben: Gesucht:

$\lambda = 25 \text{ cm}$  Ausbreitungsgeschwindigkeit  
 $t = 5 \text{ s}$   
 $n = 8$   $c$  (in  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

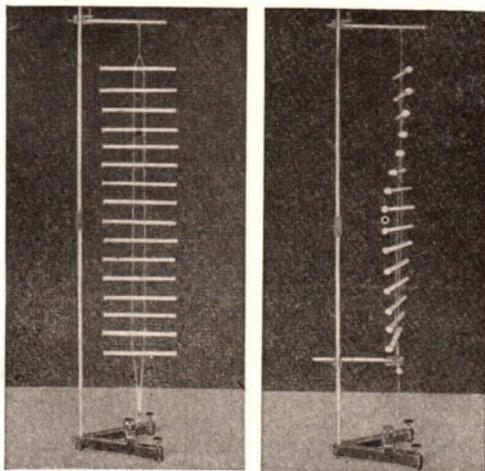
Lösung:

$$c = \lambda \cdot f$$

$$c = \lambda \cdot \frac{n}{t}$$

$$c = 25 \text{ cm} \cdot \frac{8}{5} \text{ s}$$

$$c = \underline{\underline{40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}}}$$



145/1 Wellengerät nach JULIUS

Die Querstäbe sind mit den Schnüren verknüpft und tragen an ihren Enden je eine kleine Scheibe. Jeder Querstab führt Drehschwingungen aus, wenn er seitlich angestoßen wird. Durch die Kopplung kommen alle Querstäbe ebenfalls in Schwingungen

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wellengerät beträgt  $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

2. Welche Frequenz hat eine Ultraschallwelle<sup>1</sup> im Wasser, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $1460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  und die Wellenlänge  $24 \text{ mm}$  betragen?

Gegeben:

$$c = 1460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = 24 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Gesucht:

Frequenz  $f$  (in kHz)

Lösung:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{1460 \text{ m}}{24 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot \text{m}}$$

$$f \approx 60,8 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$f \approx 60,8 \text{ kHz}$$

Die Welle hat eine Frequenz von  $60,8 \text{ kHz}$ .

## Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Einem Kinde ist ein Ball in einen Teich gefallen. Es wirft Steine hinter den Ball in das Wasser. Warum wird der Ball auf diese Weise im allgemeinen nicht an das Ufer gelangen?
2. Longitudinalwellen kommen nur dann zustande, wenn die Amplitude kleiner als  $\frac{\lambda}{4}$  ist! Kontrollieren Sie diese Feststellung durch eine grafische Darstellung nach Bild 142/1, indem Sie  
2.1.  $\lambda = 16 \text{ cm}$ ,  $x_0 = 3 \text{ cm}$     2.2.  $\lambda = 16 \text{ cm}$ ,  $x_0 = 4 \text{ cm}$     2.3.  $\lambda = 16 \text{ cm}$ ,  $x_0 = 5 \text{ cm}$  wählen!
3. Wie groß ist die Wellenlänge einer Oberflächenwelle, deren Frequenz  $13,5 \text{ Hz}$  beträgt und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit mit  $23 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  bestimmt worden ist?
4. Welche Frequenz hat eine Schallwelle, deren Wellenlänge in Luft  $77 \text{ cm}$  beträgt? ( $c_{\text{Luft}} \approx 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).
5. Auf Eisenbahnstrecken sind meist Schienen mit einer Länge von  $\lambda = 30 \text{ m}$  verlegt. In einem auf solchen Strecken fahrenden D-Zug sind in periodischer Folge Stoßgeräusche zu hören, die durch das Überfahren der Schienenstöße verursacht werden. In  $12,5 \text{ s}$  werden  $10$  Stoßgeräusche gezählt. Wie groß ist die Geschwindigkeit des D-Zuges?  
Hinweis: Auch bei dieser periodischen Bewegung, die mit einer Fortbewegung verbunden ist, kann die Grundgleichung der Wellenlehre angewendet werden.
6. Durch ein Erdbeben in Chile wurde 1922 im Pazifik eine Flutwelle erzeugt, bei der  $c = 750 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  und  $T = 30 \text{ min}$  betragen. Welche Wellenlänge hatte die Flutwelle?

## Zusammenfassung

1. In einem Medium entstehen periodische Wellen, wenn die Oszillatoren im Erregungszentrum durch ständige Energiezufuhr zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.  
Welche Wellenarten können auftreten und wodurch unterscheiden sie sich?
2. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge und der Frequenz.

Welche Größen ändern sich beim Übergang einer Welle von einem Medium in ein anderes (vgl. Abschnitt 4.2)?

<sup>1</sup> Ultraschall: Schallwellen, deren Frequenzen zwischen  $20 \text{ kHz}$  und  $20 \text{ MHz}$  liegen und vom menschlichen Gehör nicht wahrgenommen werden. Ultraschallwellen werden für viele technische Zwecke genutzt (vgl. 4.1.).

## 4. Die Ausbreitung von Wellen

Mit der modernen Technik erleichtert sich der Mensch die Arbeit immer mehr. Früher mußte der Lotse mit dem Handlot<sup>1</sup> die Fahrwassertiefe bestimmen, heute dagegen benutzt man auf allen modernen Schiffen dazu das Echolot. Die vom Schallgeber erzeugten Ultraschallwellen durchlaufen das Wasser, werden am Meeresboden reflektiert und vom Empfänger aufgenommen. Das Schiff braucht dabei seine Fahrgeschwindigkeit nicht zu mindern.



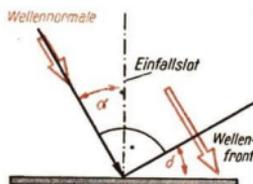
### 4.1. Reflexion von Wellen

Das vom Ultraschallempfänger bei der Tiefenmessung empfangene Echo entsteht dadurch, daß die Schallwellen an einem Hindernis zurückgeworfen werden, man sagt, sie werden reflektiert. Die *Reflexion* tritt bei allen Wellenarten auf.

Zwischen der Richtung der einfallenden und der reflektierten Wellenfront bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge. Aus Bild 148/1 ist zu erkennen, daß die einfallende und die reflektierte Wellenfront den gleichen Winkel mit dem Hindernis einschließen. Unter Verwendung der Begriffe *Wellennormale* und *Einfallslot* können die Gesetze der Reflexion in einfacher Weise dargestellt werden.

Die *Wellennormale* gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Das *Einfallslot* ist die im Auftreffpunkt der Wellenfront auf dem geradlinigen Hindernis errichtete Senkrechte.

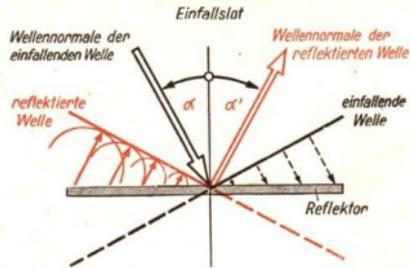
Die Richtung der auftreffenden Welle wird durch den Einfallswinkel  $\alpha$  festgelegt, den man zwischen dem Einfallslot und der Wellennormale mißt (Bild 147/1). Den vom Einfallslot und



147/1 Wellennormale und Einfallslot bei einer einfallenden Welle

<sup>1</sup> Lot: Leine mit Knoten in bestimmten Abständen, die mit einem Bleistück ins Wasser gelassen wird und nach dem Auftreffen auf dem Grund schlaff wird.

148/1 Schematische Darstellung zum Reflexionsgesetz. Der Reflexionswinkel  $\alpha'$  ist gleich dem Einfallswinkel  $\alpha$  (vgl. Aufgabe 12)



der Wellennormale der reflektierten Welle gebildeten Winkel nennt man den Reflexionswinkel  $\alpha'$ . Beide Winkel sind gleich groß (Bild 148/1).

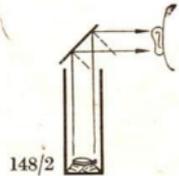
● Woher ist Ihnen diese Gesetzmäßigkeit schon bekannt?

Es ergibt sich das Reflexionsgesetz:

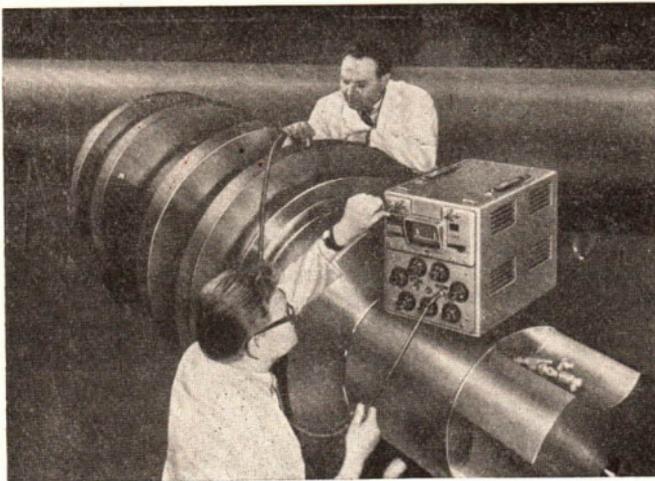
Bei der Reflexion einer Welle an einem ebenflächigen Hindernis ist der Reflexionswinkel  $\alpha'$  gleich dem Einfallswinkel  $\alpha$ .

Ein Beispiel, wie man das Reflexionsgesetz anwenden kann, zeigt folgender Versuch:

Man legt eine tickende Taschenuhr auf den Boden eines langen Glaszylinders (Bild 148/2). Hält man über die Öffnung eine glatte Scheibe, so kann man in einem ruhigen Raum den Schall auch seitlich wahrnehmen.



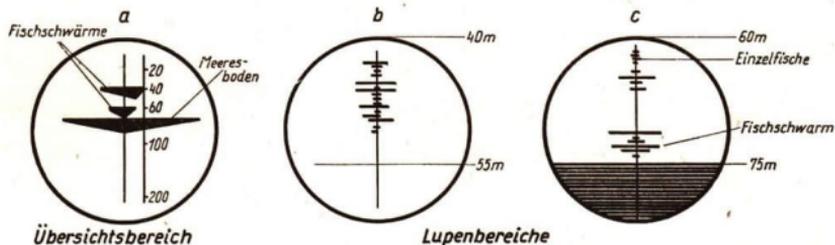
Auch bei der Ultraschall-Werkstoffprüfung nutzt man die Reflexion von Schallwellen aus. Ein Ultraschallimpuls wird gegen das zu untersuchende Werkstück gerichtet. Er dringt in das Werkstück ein und wird an dessen Rückseite zum Teil reflektiert. Ist in dem Werkstück ein



148/3 Untersuchung einer Walze nach dem Echo-Impuls-Verfahren. Auf dem Bildschirm erscheint neben den beiden Zacken (ausgesandte Welle, von der Rückseite des Werkstückes reflektierte Welle) bei Fehlerstellen im Werkstück noch eine Zacke, die von einer an dieser Stelle reflektierten Welle stammt

Lunker oder ein Reiß vorhanden, so findet an dieser Stelle ebenfalls eine Reflexion statt. Die reflektierten Ultraschallwellen rufen in diesem Falle auf dem Leuchtschirm einer Braunschens Röhre nach Umwandlung in einen elektrischen Impuls eine Markierung hervor (Bild 148/3). Das Ultraschallverfahren gehört zu den Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Der besondere Vorteil des Ultraschallverfahrens gegenüber anderen Verfahren liegt darin, daß auch sehr dicke Werkstücke geprüft werden können. Es ergänzt daher die anderen Verfahren. Außerdem sind keine besonderen Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich.

In der modernen Fischerei benutzt man *Echographen*. Von einem Ultraschallerzeuger werden Wellen in das Wasser ausgesandt, die vom Meeresboden, aber auch von Gegenständen zwischen Schiffskiel und Meeresboden reflektiert werden. Dadurch lassen sich große Einzelfische und vor allem Fischschwärme feststellen. Verwendet man zur Anzeige des Echos eine Braunschens Röhre, so kann man Fischschwärme besonders schnell auffinden. Je dichter der Fischschwarm ist, um so mehr Schallwellen werden reflektiert und auf elektrischem Wege angezeigt. Solche Geräte heißen „*Fischlupen*“ (Bild 149/1), da man bestimmte Tiefenbereiche genauer untersuchen kann.



149/1 Schirmbilder einer Fischlupe (stark schematisiert)

Alle größeren Fischereifahrzeuge der volkseigenen Fischfangkombinate Saßnitz und Rostock sind mit Echographen und Fischlupen ausgerüstet. So wird durch Anwendung neuester Geräte die Arbeitsproduktivität auch im Fischfang gesteigert.

## 4.2. Die Brechung von Wellen

In einer Wellenwanne kann man beobachten, daß Wellen mit geradlinigen Wellenfronten, die aus dem Bereich des tiefen Wassers kommen und schräg auf die Grenzlinie zwischen tiefem und flachem Wasser treffen, beim Übertritt in das Flachwassergebiet aus ihrer Richtung abgelenkt werden (Bild 149/2). Die Richtungsänderung bezeichnet man als **Brechung**.

149/2 Brechung von Wasserwellen in der Wellenwanne. In der Wellenwanne liegt eine Glasplatte, die vom Wasser nur wenige Millimeter bedeckt wird. An der Grenzfläche zwischen flachem und tieferem Wasser sind die Wellenfronten geknickt



In flachem Wasser macht sich der Einfluß des Grundes auf die Wasserwellenbewegung hemmend bemerkbar. Die Wasserwellen haben eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als im tiefen Wasser. Das Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit größer ist, wird wellenmäßig dünner genannt. Im wellenmäßig dichteren Medium breitet sich die Welle langsamer aus (vgl. die folgende Tabelle).

Tabelle 2: Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien.

Wellenart	Medium ist wellenmäßig	
	dichter (geringere Geschwindigkeit)	dünnere (größere Geschwindigkeit)
Oberflächenwellen	Wasser flach Wasser von 4 °C Petroleum	Wasser tief Wasser von 20 °C Wasser
Schallwellen	Luft von 0 °C Kohlendioxid	Luft von 20 °C Luft

Ändert sich in der Gleichung  $c = \lambda \cdot f$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ , so müssen sich auch die Größen auf der rechten Seite der Gleichung ändern. Aus Versuchen entnimmt man, daß die Frequenz  $f$  konstant bleibt, während sich  $\lambda$  ändert.

● Woran erkennt man das in Bild 149/2?

Die für Wellen charakteristische Größe ist demnach die Frequenz.

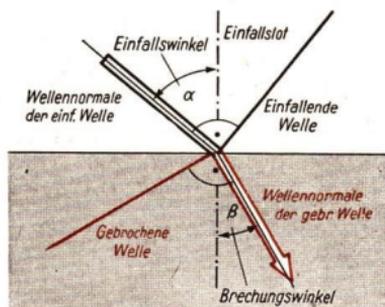
Unter Verwendung der Begriffe Einfallswinkel und Brechungswinkel können die Vorgänge bei der Brechung qualitativ<sup>1</sup> erfaßt werden. Nach Bild 150/1 ergibt sich folgende Regel für die Brechung von Wellen:

Beim Übertritt einer Welle aus einem wellenmäßig dünneren in ein wellenmäßig dichteres Medium werden die Wellenfronten in der Weise gebrochen, daß der Brechungswinkel  $\beta$  kleiner ist als der Einfallswinkel  $\alpha$ . Beim Übergang vom dichteren ins dünnere Medium ist der Brechungswinkel  $\beta$  größer als der Einfallswinkel  $\alpha$ .

An der Grenzlinie kommt es außerdem stets zu einer Reflexion, die in der Zeichnung der Übersichtlichkeit wegen weggelassen wurde.

Jede Brechung einer Welle ist mit einer Reflexion verbunden.

<sup>1</sup> qualitativ: der Qualität, dem Wert nach; hier: der Erscheinung nach



150/1 Schematische Darstellung zur Brechung einer Welle

Die Zusammenhänge zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel können auch quantitativ<sup>1</sup> ausgedrückt werden. Bild 151/1 gibt den Brechungsvorgang noch einmal vereinfacht wieder. Die einfallende Wellenfront  $AS$  hat nach dem Fortschreiten um 3 Wellenlängen die neue Lage  $TD$ . Der Punkt  $A$  verschiebt sich nach  $T$  und der Punkt  $S$  nach  $D$ . Die verschiedenen langen Strecken  $AT$  und  $SD$  werden von der Wellenfront in der gleichen Zeit zurückgelegt. Das ist möglich, weil die Geschwindigkeiten verschieden sind. Ihr Verhältnis beträgt

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Unter Verwendung der Sinusfunktion ergibt sich für den Einfallswinkel  $\alpha$  die Beziehung

$$\sin \alpha = \frac{3 \lambda_1}{AD}$$

und für den Brechungswinkel  $\beta$  der Ausdruck

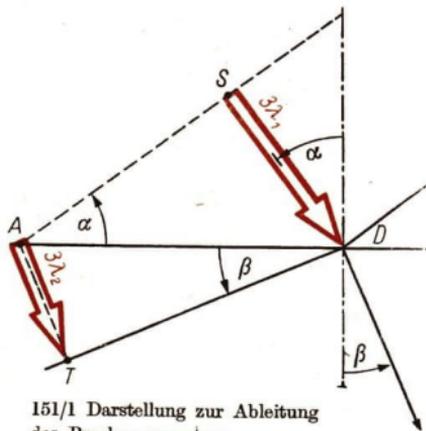
$$\sin \beta = \frac{3 \lambda_2}{AD}.$$

Bildet man den Quotienten aus  $\sin \alpha$  und  $\sin \beta$ , so erhält man

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3 \lambda_1}{3 \lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Da das Verhältnis  $\lambda_1 : \lambda_2$  andererseits gleich  $c_1 : c_2$  ist, so gilt:

$$\sin \alpha : \sin \beta = c_1 : c_2.$$



151/1 Darstellung zur Ableitung des Brechungsgesetzes

Das Verhältnis der Sinuswerte des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist stets gleich dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten. Es heißt **Brechungsverhältnis** oder **Brechungszahl  $n$** .

Das Brechungsgesetz für Wellen lautet:

Beim Übergang einer Welle von einem Medium in ein anderes wird sie gebrochen. Das Brechungsverhältnis ist konstant; es ist gleich dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten in den beiden Medien.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n \quad (23)$$

### 4.3. Das Huygenssche Prinzip

Alle wesentlichen Fortschritte unserer Naturerkenntnis sind so entstanden, daß bestimmte Vorstellungen über die Erscheinungen entwickelt wurden. Eine solche **Hypothese**<sup>2</sup> war beispielsweise anfangs die Annahme, daß die Wärme nichts anderes ist als die Bewegung der kleinsten Teilchen eines Körpers.

<sup>1</sup> quantitativ: der Quantität, der Menge nach; hier: mathematisch

<sup>2</sup> Hypothese: unbewiesene wissenschaftliche Annahme

Die Hypothese dient als Richtschnur für den Aufbau von Versuchsreihen. Sie nimmt größere Wahrscheinlichkeit an, wenn sie durch die Versuchsergebnisse immer wieder bestätigt wird. Besteht kein Zweifel mehr an der Richtigkeit einer solchen Annahme, so wird die Hypothese zur **Theorie**. Das ist bei der Wärmebewegung der Fall. Wir sprechen daher von der kinetischen Wärmetheorie.

Stehen jedoch einzelne Versuche im Widerspruch zur Annahme, so muß die Hypothese geändert oder sogar fallengelassen werden.

Die Reflexion, die Brechung und andere Erscheinungen, die bei der Ausbreitung von Wellen auftreten können, lassen sich mit Hilfe einer Theorie erklären, die der bedeutende niederländische Physiker CHRISTIAN HUYGENS schon vor 300 Jahren entwickelt hat. HUYGENS stellte 1678 folgende Behauptung auf:

**Um jeden Punkt eines Mediums, der von einer sich ausbreitenden Wellenfront erreicht wird, bilden sich neue kreisförmige Wellen, sogenannte Elementarwellen.**

So entstehen beispielsweise an der äußersten Linie, die eine fortschreitende Welle erreicht, in jedem Augenblick unzählig viele solcher Elementarwellen. Diese treten aber nicht einzeln in Erscheinung. Wie im Physikunterricht in der Klasse 12 noch bewiesen wird, heben sich die Elementarwellen teilweise auf bzw. setzen sie sich zu einer gemeinsamen *Frontwelle* zusammen. Das zeigt folgender Versuch:

In einer Wellenwanne wird eine Kreiswelle hervorgerufen. Das Erregungszentrum ist von einem Ring umgeben, der mehrere Öffnungen besitzt. Aus jeder Öffnung treten Wellen heraus. Sie überlagern einander so, daß sie in einer bestimmten Entfernung vom Ring wieder zu einer gemeinsamen Frontwelle verschmelzen. Diese neue, aus den Elementarwellen entstandene Frontwelle ist identisch<sup>1</sup> mit der Wellenfront, die ohne Behinderung durch den Ring fortwandern würde.



Die Huygenssche Erklärung der Wellenausbreitung gilt für transversale und longitudinale Wellen. Daher lautet die grundlegende Theorie der Wellenlehre, das Huygenssche Prinzip:

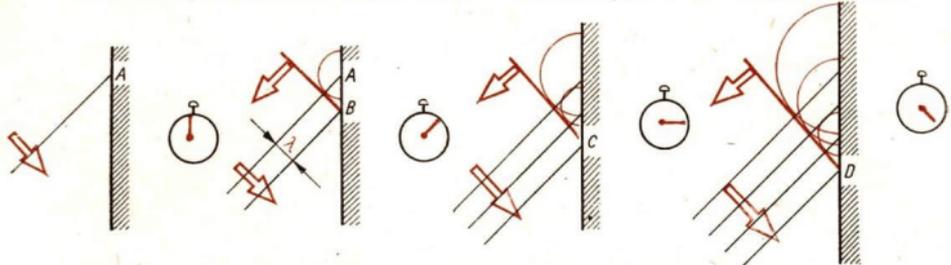
**Jeder Punkt, den eine Wellenfront erreicht, ist Ausgangspunkt einer neuen Welle. Diese Elementarwellen setzen sich zu einer gemeinsamen Frontwelle zusammen.**

<sup>1</sup> identisch: übereinstimmend, völlig gleich

### 4.3.1. Erklärung der Reflexion einer Welle

Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips läßt sich nunmehr auch die Reflexion von Wellen erklären (Bild 153/1):

Die Wellenfront trifft bei  $A$  auf die Wand. Nach dem Huygensschen Prinzip bildet sich um  $A$  eine Elementarwelle. Nach einer gewissen Zeit wird von der fortschreitenden Wellenfront der Punkt  $B$  erreicht. Die in dieser Zeit durchlaufene Strecke sei  $\lambda$ . Auch um  $B$  bildet sich eine Elementarwelle. Die zum ersten Zeitpunkt um  $A$  entstandene Elementarwelle hat sich inzwischen nach allen Seiten um die Strecke  $\lambda$  ausbreitet. Die fortschreitende Wellenfront erreicht dann den Punkt  $C$ , um den eine weitere Elementarwelle entsteht. Der Radius der Wellen um  $A$  und  $B$

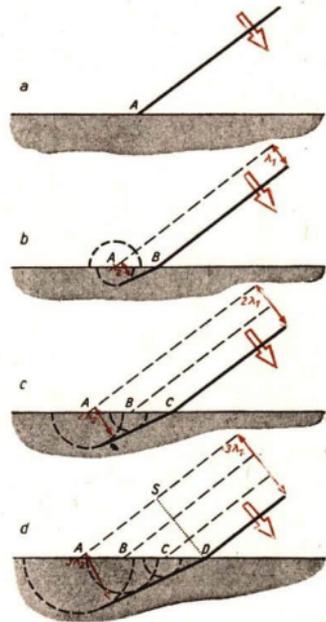


153/1 Konstruktion der reflektierten Wellen mit Hilfe von Elementarwellen

beträgt zu diesem Zeitpunkt  $2 \cdot \lambda$  beziehungsweise  $\lambda$ . Der Einfachheit halber sind nur die Elementarwellen für vier Punkte gezeichnet. In Wirklichkeit treten an allen Stellen des Hindernisses, die von der einfallenden Welle erreicht werden, Elementarwellen auf. Sie durchdringen und überlagern einander zu einer neuen Frontwelle. Auf diese Weise entsteht die reflektierte Wellenfront.

### 4.3.2. Erklärung der Brechung einer Welle

Das Huygenssche Prinzip ermöglicht auch eine Erklärung der Brechung. Um zu vereinfachen, wird die Darstellung auf eine einzige Wellenfront beschränkt (Bild 153/2). Sie trifft im Punkte  $A$  auf die Grenzlinie zwischen zwei Medien (Bild 153/2a). Um  $A$  entsteht eine neue Elementarwelle, die jedoch in beiden Medien eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat.



153/2 Konstruktion der gebrochenen Welle mit Hilfe von Elementarwellen beim Übergang vom wellenmäßig dünneren zum wellenmäßig dichteren Medium

Der Radius der gezeichneten Welle ist daher im wellenmäßig dichteren **Medium** kleiner als im wellenmäßig dünneren Medium. Beim weiteren Vorrücken der einfallenden Wellenfronten entstehen um jeden Punkt der Grenzlinie Elementarwellen.

In den Bildern 153/2c und 153/2d sind die Elementarwellen im wellenmäßig dünneren **Medium** nicht mitgezeichnet worden, um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten.

Die Elementarwellen im wellenmäßig dichteren Medium setzen sich zu einer gemeinsamen Frontwelle zusammen. Diese bleibt gegenüber dem Teil zurück, der im wellenmäßig dünneren Medium verläuft. Die Wellenfront weist infolgedessen an der Grenzlinie einen Knick auf.

### 4.3.3. CHRISTIAN HUYGENS

In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts verschob sich das Zentrum der wissenschaftlichen Entwicklung von Italien nach Westeuropa (England, Frankreich, Niederlande). Das hatte seine Ursache einmal darin, daß in diesen Ländern der wissenschaftshemmende Einfluß der katholischen Kirche gering war. Zum anderen waren wirtschaftliche Gründe maßgebend. Das aufstrebende Bürgertum hatte in diesen Ländern bereits wichtige politische und ökonomische Machtpositionen inne und war daher sehr daran interessiert, den Handel und die Schifffahrt zu fördern und die Manufakturen zu erweitern. Viele Aufgaben, die damit im Zusammenhang standen, ließen sich nur mit wissenschaftlichen Arbeitsmethoden lösen.

Auch die Stellung der Wissenschaftler in der Gesellschaft änderte sich. Waren sie vorher vor allem Universitätslehrer oder Hofmathematiker, Hofastronomen usw. gewesen, so traten jetzt an ihre Stelle Angehörige freier Berufe, wie Advokaten, Geistliche und Landbesitzer, die oft über ein bedeutendes Vermögen verfügten. So konnten sie sich ohne finanzielle Sorgen den wissenschaftlichen Arbeiten widmen. Zu ihnen gehörte auch CHRISTIAN HUYGENS (Bild 154/1).

HUYGENS wurde 1629 in Holland als Sohn eines reichen Grundbesitzers geboren.



154/1 CHRISTIAN HUYGENS

Er studierte in Leiden und Breda Rechtswissenschaften, zeigte aber auch großes Interesse für die Mathematik, so daß er bald durch wissenschaftliche Abhandlungen den Ruf eines bedeutenden Mathematikers erwarb. Bekannt wurde HUYGENS auch durch seine Arbeiten auf optischem und astronomischem Gebiet, vor allem durch seine Entdeckungen des Saturnrings und eines Saturnmondes. 1665 wurde HUYGENS als Mitglied an die neu gegründete Akademie der Wissenschaften nach Paris berufen, wo er bis 1681 blieb. In dieser Zeit entstanden seine wichtigsten Schriften. Bereits 1657 hatte HUYGENS die Pendeluhr erfunden. In seinem bedeutenden Werk „Horologium oscillatorium“<sup>1</sup> (1673) beschreibt er nicht nur ausführlich die Kon-

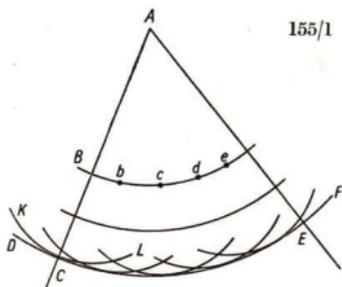
<sup>1</sup> horologium oscillatorium: Uhr der Schwinger, sinngemäß Pendeluhr

struktion dieser Uhr, sondern gibt auch einen ausführlichen Überblick über die Gesetze der *Pendelschwingungen*.

1690 erschien „*Traité de la lumière*“ (Abhandlung über das Licht). In diesem bereits 1678 verfaßten Buch formulierte HUYGENS das nach ihm benannte Huygenssche Prinzip:

„Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ... zu bedenken, daß jedes Teilchen des Stoffes, in welchem eine Welle sich ausbreitet, ... seine Bewegung ... allen übrigen davon abgibt, welche es berühren ... Daher muß sich um jedes Teilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Teilchen ist (Bild 155/1). Wenn also *DCF* eine Welle ist, welche von ... *A* als Zentrum ausgegangen ist, so wird das Teilchen *B* ... seine die Welle *DCF* in *C* berührende besondere Welle *KCL* in demselben Augenblick gebildet haben, in welchem die von *A* ausgesandte Hauptwelle in *DCF* angelangt ist; und es ist klar, daß die Welle *KCL* die Welle *DCF* ... nur in dem Punkte *C* berührt ... Auf diese Weise bildet jedes andere Teilchen ... wie *b*, *c*, *d* usw. seine eigene Welle. Jede dieser Wellen (ist) indessen nur unendlich schwach ... im Vergleich zu der Welle *DCF*, zu deren Bildung alle übrigen beitragen mit demjenigen Teil ihrer Oberfläche, welcher von dem Mittelpunkt *A* am weitesten entfernt ist ... Man darf nicht etwa meinen, daß alles dies zu spitzfindig ... ist, denn man wird in der Folge sehen, daß ... alles, was auf seine Zurückwerfung und Brechung Bezug hat, sich hauptsächlich aus dieser Anschauung erklärt.“

HUYGENS: „*Traité de la lumière*“



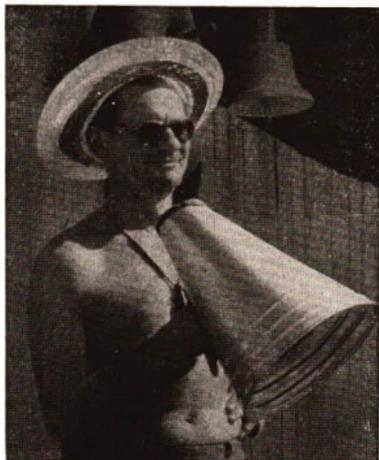
Die sehr klaren und einfachen Gedankengänge HUYGENS' bilden noch heute in anderer Formulierung die beste Modellvorstellung und theoretische Grundlage für fast alle Wellenerscheinungen.

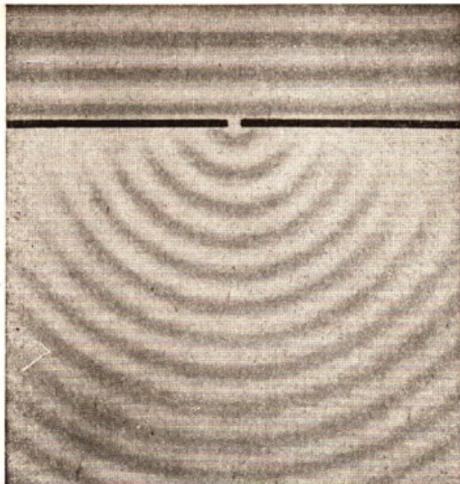
Mit Recht gilt daher HUYGENS, der 1695 verstarb, neben NEWTON und LEIBNIZ als einer der bedeutendsten Wissenschaftler des 17. Jahrhunderts.

### Fragen, Übungen, Aufgaben

1. Das Echolotgerät eines Schiffes registriert eine Gesamtlaufzeit des Ultraschallimpulses von 0,04 s. Wie groß ist die Wassertiefe? (Die Breite der Schiffe wird vernachlässigt, die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt  $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .)
2. Erklären Sie die Werkstoffprüfung mit Hilfe des Ultraschallverfahrens!
3. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Sprachrohres (Bild 155/2)!

155/2





156/1

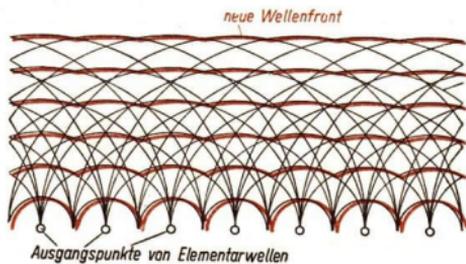
7. Wie groß ist das Brechungsverhältnis beim Übergang von Schallwellen aus der Luft in Kohlendioxid?

$$(c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, c_{\text{CO}_2} = 258 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$$

8. Nach Bild 156/1 läuft gegen ein Hindernis eine gerade Wellenfront. Warum entstehen hinter dem Spalt kreisförmige Wellen?

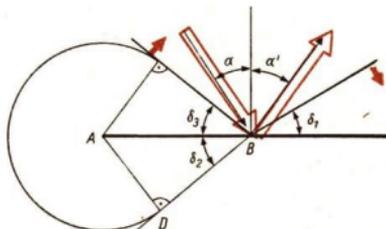
9. Zeichnen Sie einen Kreis mit dem Radius  $r = 5 \text{ cm}$  als Momentbild einer Kreiswelle! Legen Sie um eine größere Anzahl von Punkten auf der Peripherie kleine Kreise mit dem Radius  $r_1 = 1 \text{ cm}$  als Bilder der Elementarwellen! Zeichnen Sie ohne weitere Hilfsmittel die Frontwelle!

10. Auf einer Wasseroberfläche werden durch Luftstöße aus einer Reihe eng beieinanderliegender Düsen Wellen erregt. Jede Düse bildet ein Erregungszentrum; die ganze Reihe veranschaulicht die Zentren der Elementarwellen (Bild 156/2). Übertragen Sie die Skizze in Ihr Arbeitsheft und geben Sie eine Erklärung, warum eine lineare Frontwelle entsteht!



156/2

11. Beweisen Sie an Hand des Bildes 156/3 die Gleichheit der Winkel  $\alpha$  und  $\alpha'$ ! Hinweis: Kongruenzsätze, Scheitelwinkel.



156/3

4. Zeichnen Sie entsprechend Bild 153/2 die Brechung einer Welle beim Übergang vom wellenmäßig dichteren Medium zum wellenmäßig dünneren Medium! Wählen Sie für die Geschwindigkeiten das Verhältnis 1 : 2!

5. Welche Wellenlänge hat eine Wasserwelle der Frequenz  $f = 13 \text{ Hz}$  in tiefem Wasser, in dem sie sich mit einer Geschwindigkeit von  $c_1 = 23 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  fortbewegt? Welche Wellenlänge hat diese Welle nach dem Übertritt in ein Flachwassergebiet bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $c_2 = 20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ?

6. Warum ändern Wasserwellen an den Ufern von Teichen und Flüssen ihre Richtung?

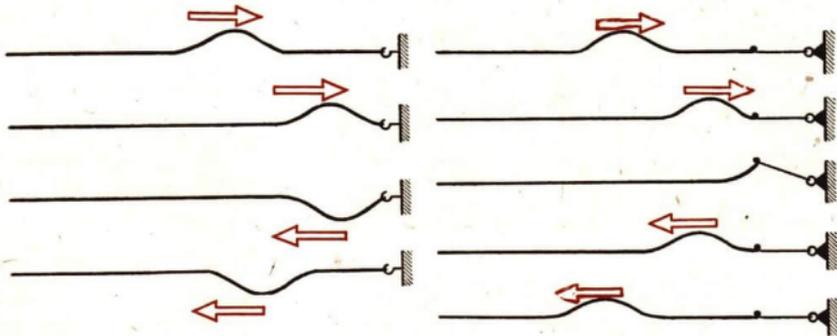
## 4.4. Überlagerung zweier Wellen

Um die Vorgänge bei zwei einander entgegenlaufenden Wellen zu verstehen, ist es notwendig, die Reflexion nochmals genauer zu untersuchen. Das geschieht am einfachsten an Seilwellen.

### 4.4.1. Reflexion einer fortschreitenden Welle am festen und losen Ende

Ein Seil wird an einem Wandhaken befestigt, das freie Ende mit einer Hand gefaßt und ruckartig einmal auf und nieder bewegt. Dadurch entsteht ein Wellenberg, der durch das Seil zur Wand läuft. Dort wird er als Wellental reflektiert; es tritt Phasenumkehr auf. Man bezeichnet einen solchen Reflexionsvorgang als **Reflexion am festen Ende** (Bild 157/1).

Wird das Seil unter Zwischenschaltung eines langen dünnen Fadens an der Wand befestigt, so tritt bei der Reflexion keine Phasenumkehr auf. Das Seil kann ausschlagen, so daß der Wellenberg als Wellenberg reflektiert wird. Man spricht von einer **Reflexion am losen Ende** (Bild 157/2).



157/1 Reflexion einer Welle am festen Ende

157/2 Reflexion einer Welle am losen Ende

Erteilt man einem Seil in regelmäßigem Abstand Anstöße, das heißt, ruft man in ihm eine periodische Welle hervor, so treten bei der Reflexion an einer Wand die gleichen Erscheinungen auf. Die Phasenumkehr von Wellenberg zu Wellental bei der Reflexion am festen Ende heißt **Phasensprung**, am losen Ende spricht man vom **Phasengleichlauf**.

Bei der Reflexion einer Welle am „festen Ende“ tritt ein Phasensprung von  $\frac{\lambda}{2}$  auf.  
Bei der Reflexion einer Welle am „loosen Ende“ tritt Phasengleichlauf auf.

#### 4.4.2. Stehende Wellen

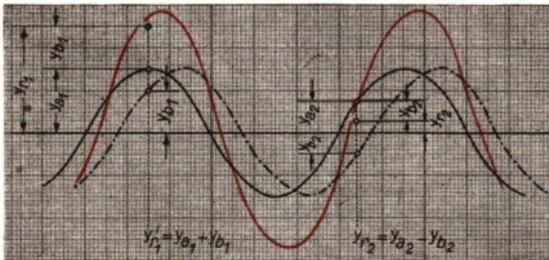
Bei periodischer Bewegung des freien Seilendes entsteht auf Grund der Überlagerung der hinlaufenden und der reflektierten Wellen eine besondere Schwingungsform (Bild 158/1). Im gleichen Abstand sind Stellen vorhanden, die sich ständig in Ruhe befinden. Dazwischen befinden sich Stellen maximaler Amplitude.



Im Gegensatz zu einer fortschreitenden Seilwelle bezeichnet man eine solche Welle als **stehende Welle**. Stehende Wellen sind bei allen Wellenarten möglich.

Die ständig in Ruhe bleibenden Stellen heißen **Schwingungsknoten**, die Stellen maximaler Amplitude nennt man **Schwingungsbäuche**.

Die Überlagerung zweier Wellen, wie sie hier auftritt, stellt man grafisch so dar, daß man die Elongationen an jeder Stelle geometrisch addiert (Bild 158/2).



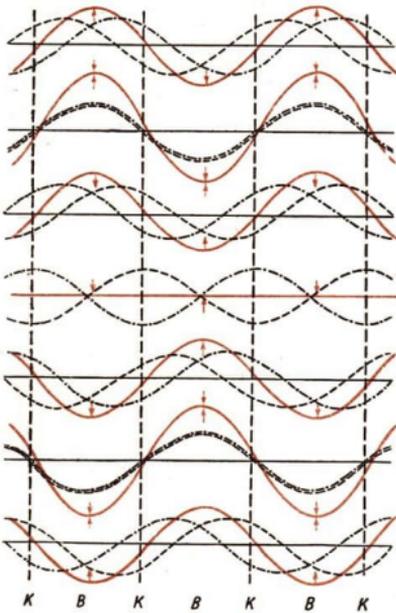
158/2 Zeichnerische Darstellung der Überlagerung zweier Wellen, Welle I Vollstrich, Welle II strichpunktirt, resultierende Welle rot gezeichnet

An jeder Stelle ist dabei die Summe bzw. die Differenz der Einzelelongationen zu bilden, je nachdem, ob die Einzelwellen an der betreffenden Stelle in gleicher oder in entgegengesetzter Richtung schwingen. Die Verbindungslinie der sich durch Überlagerung ergebenden Ausschläge heißt die **resultierende Welle**.

Bei der stehenden Welle haben die hinlaufende und die rücklaufende Welle gleiche Wellenlänge und gleiche Amplitude. Die Überlagerung läßt sich in einer Reihe von Momentbildern darstellen (Bild 159/1).

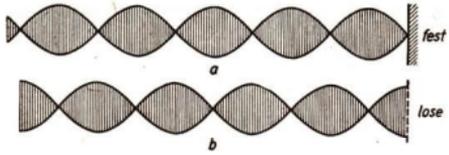
Entsteht die stehende Welle durch Reflexion am festen Ende, so hat sie dort selbst einen Knoten. Die anderen Knoten liegen  $1 \cdot \frac{\lambda}{2}$ ,  $2 \cdot \frac{\lambda}{2}$ ,  $3 \cdot \frac{\lambda}{2}$  ... vom festen Ende entfernt. Bildet sich dagegen die stehende Welle durch Reflexion am losen Ende heraus, so befindet sich dort ein Schwingungsbauch. Die Knoten liegen  $1 \cdot \frac{\lambda}{4}$ ,  $3 \cdot \frac{\lambda}{4}$ ,  $5 \cdot \frac{\lambda}{4}$  ... vom losen Ende entfernt (Bild 159/2).

Hinlaufende Welle  $\dashrightarrow$   
 Rücklaufende Welle  $\dashleftarrow$



159/1 Zeichnerische Darstellung einer stehenden Welle

Von Bild zu Bild ist jede der beiden Teilwellen um eine Achtelwellenlänge weitergeschoben, und zwar die eine nach links, die andere nach rechts. Auf der Zeichnung sieht man, daß die resultierende Welle überhaupt nicht fortschreitet. Der Abstand zweier Knoten ist konstant und beträgt jeweils  $\frac{\lambda}{2}$

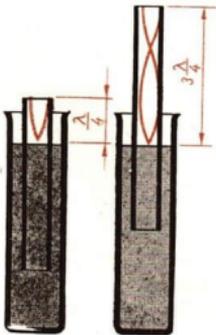


159/2 Stehende Wellen

a Reflexion am festen Ende, b Reflexion am losen Ende

#### 4.4.3. Messen von Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Stehende Wellen kann man zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen benutzen. Darin liegt ihre große Bedeutung. Das Grundsätzliche solcher Versuchsanordnungen soll an einem Beispiel aus der Akustik beschrieben werden.



Bei dem im Abschnitt 2.3. beschriebenen Versuch zur akustischen Resonanz hörte man bei bestimmter Länge der Luftsäule den Ton einer angeschlagenen Stimmgabel besonders laut. Im Resonanzrohr hat sich dann infolge der Reflexion an der Wasseroberfläche eine stehende Welle herausgebildet. Die Wasseroberfläche kann als „festes Ende“ aufgefaßt werden. Dort befindet sich ein Schwingungsknoten. Da

159/3 Stehende Schallwellen in einem Resonanzrohr

(Die Schallwellen sind Longitudinalwellen. Da sich stehende Longitudinalwellen schwierig darstellen lassen, wurden die Schallwellen hier transversal gezeichnet.)

am Rohrende ein Schwingungsbauch liegt, beträgt die Länge der Luftsäule  $\frac{\lambda}{4}$ . Beim weiteren Herausziehen der Röhre wird der Ton leiser; die Lautstärke erreicht bei einer Länge von  $3 \cdot \frac{\lambda}{4}$  erneut einen Höchstwert. Die Frequenz von Stimmgabeln ist meist bekannt. Man kann daher mit Hilfe dieser Anordnung die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles nach der Gleichung  $c = \lambda \cdot f$  bestimmen.

### Beispiel

In einem Resonanzrohr tritt zum erstenmal eine Verstärkung ein, wenn die Länge der Luftsäule 18 cm beträgt. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit? Die Frequenz der Stimmgabel ist  $f = 440$  Hz.

Gegeben:

$$\frac{\lambda}{4} = 0,18 \text{ m}$$

$$f = 440 \text{ s}^{-1}$$

Gesucht:

$$c \text{ (in m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

Die Schallgeschwindigkeit beträgt etwa  $317 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Lösung:

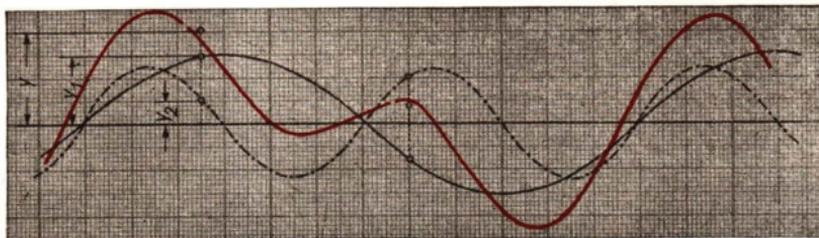
$$c = \lambda \cdot f \quad \lambda = 4 \cdot 0,18 \text{ m}$$

$$c = 4 \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 440 \text{ s}^{-1}$$

$$\underline{\underline{c \approx 317 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

### Fragen, Übungen, Aufgaben

- Formulieren Sie die in Bild 159/2 enthaltene Aussage über die Abstände der Knoten in allgemeiner Form!
- Bild 160/1 zeigt die Überlagerung zweier Wellen verschiedener Frequenz. Zeichnen Sie entsprechend die resultierende Welle mit  $\lambda_1 = 8 \text{ cm}$ ,  $\lambda_2 = 4 \text{ cm}$ ,  $a_1 = 1,5 \text{ cm}$ ,  $a_2 = 1 \text{ cm}$ . Die Anfangspunkte sollen zusammenfallen.

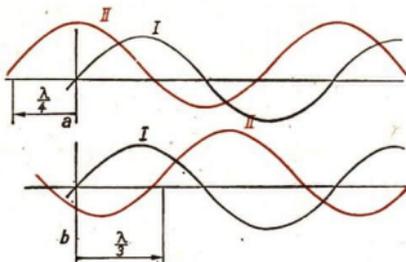


160/1

- Führen Sie mit einer Wäscheleine die im Abschnitt 4.4.1. beschriebenen Versuche selbst aus!
- Breiten sich zwei beliebige Wellen gleicher Wellenlänge im gleichen Medium aus, so weisen sie meist eine Verschiebung gegeneinander auf. Man bezeichnet den an einem Beobachtungsort zwischen den Wellen bestehenden Unterschied des Schwingungszustandes als den Phasen-

unterschied der Wellen oder als die Phasenverschiebung. Der Phasenunterschied wird meistens in Bruchteilen der Wellenlänge  $\lambda$  angegeben, zum Beispiel  $\frac{\lambda}{2}$ ;  $\frac{\lambda}{3}$ ;  $\frac{\lambda}{10}$ . Je nachdem, ob der Anfangspunkt der zweiten Welle vor oder hinter dem Anfangspunkt der ersten liegt, spricht man von einer Phasenvoraneilung oder einer Phasenverzögerung (Bild 161/1).

Zeichnen Sie zwei Wellen gleicher Wellenlänge, die eine Phasenverschiebung von  $\frac{\lambda}{3}$  aufweisen ( $\lambda = 6 \text{ cm}$ ;  $x_0 = 1,5 \text{ cm}$ )!



161/1 Phasenunterschied zwischen zwei Wellen gleicher Wellenlänge

5. Die größere Lautstärke einer Stimmgabel mit Resonanzkasten (vgl. 2.3., S. 128) ist auf eine stehende Welle im Resonanzkasten zurückzuführen. Welche Länge muß der auf einer Seite verschlossene Kasten mindestens haben, wenn die Stimmgabel eine Frequenz von 440 Hz besitzt und eine Schallgeschwindigkeit von  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  angenommen wird?

Gegeben:

$$c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f = 440 \text{ s}^{-1}$$

Gesucht:

$$\lambda \text{ (in m)}$$

Lösung:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{440 \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda \approx 0,77 \text{ m}$$

Die Kastenlänge des einseitig geschlossenen Kastens muß etwa  $\frac{\lambda}{4} \approx 19,3 \text{ cm}$  betragen.

5.1. Auch wenn der Kasten beiderseits offen ist, kann sich eine stehende Welle bilden. In der Kastenmitte befindet sich dann ein Schwingungsknoten, an den Enden jeweils ein Schwingungsbauch. Zeichnen Sie diese stehende Welle (vgl. Bild 159/3)!

5.2. Berechnen Sie für die Stimmgabel  $f = 340 \text{ Hz}$  mit  $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  die Mindestlänge des beiderseits offenen Resonanzkastens!

## 4.5. Die Bedeutung der Wellenlehre

In den voranstehenden Abschnitten haben Sie an vielen Beispielen und Modelldarstellungen die Grundbegriffe der Wellenlehre kennengelernt. Die Bedeutung dieser Gesetzmäßigkeiten und Erscheinungen geht jedoch weit über das Gebiet der mechanischen Schwingungen und Wellen hinaus. So lassen sich viele optische und elektrische Erscheinungen mit Hilfe der Wellenlehre erklären. Das ist der Lehrstoff für die Klasse 12 der erweiterten Oberschule.

Die Untersuchung mechanischer Wellen ist für verschiedene technische und wissenschaftliche Zwecke besonders wichtig.

In der Raumakustik sucht man beispielsweise nach immer neuen Möglichkeiten, um die Lärmbelastung durch Schallwellen in Arbeits- und Wohnräumen zu vermindern bzw. die Schall-

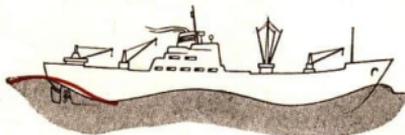
wirkung von Musik und Sprache in Konzert-, Theater- und Vortragsräumen zu verbessern. Der Lärmbekämpfung muß deshalb besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, weil dauernder Lärm das Nervensystem des Menschen schädigt und damit die Arbeitskraft herabsetzt. Entsprechend dem Artikel 15 der Verfassung der Deutschen Demokratischen Republik, nach dem „die Arbeitskraft vom Staate geschützt wird“, bestehen deshalb bestimmte gesetzliche Vorschriften zur Lärmverminderung bei Maschinen, Fahrzeugen und Anlagen.

● *Kennen Sie Beispiele der Lärmbekämpfung aus Ihrem Betrieb?*

Neben direkter Dämpfung an der Schallquelle selbst werden vor allem schallschluckende Wände und Decken eingebaut. Durch schallschluckende Stoffe und eine entsprechende architektonische Gestaltung der Räume läßt sich in Kinos, Konzertsälen usw. eine unerwünschte Reflexion (Nachhall) vermeiden und dadurch die Akustik der Räume verbessern.

● *Betrachten Sie unter diesem Gesichtspunkt einmal einen Kinosaal!*

Im Schiffbau müssen die Gesetzmäßigkeiten der Wellenlehre ebenfalls berücksichtigt werden. So ist zum Beispiel der Schiffskörper bei seiner Bewegung durch das Wasser Ursache einer Wellenbildung. Das Bild 162/1 zeigt einen Fall, bei dem der Schiffsantrieb einen unnötig hohen



162/1 Wellenbildung mit maximalem Wellenwiderstand an einem Schiffskörper

Wellenwiderstand überwinden muß. Die Schraube bewegt sozusagen das nach hinten beförderte Wasser zusätzlich noch einen Wellenberg hinauf. Das aber bedeutet Energieverlust.

Der vom Schiffsantrieb zu überwindende Wellenwiderstand ist hierbei am größten.

Die Segelflieger nutzen bei ihren Höhenflügen mitunter eine besondere Wellenerscheinung, den Wellenaufwind, aus. Dabei konnten im Segelflugzeug schon Höhen von 15 000 m erreicht werden.

Einen weiterführenden Einblick in die Schwingungs- und Wellenlehre können Sie folgendem Buch von Horst Hille „Nützliche Wellen“ Fachbuchverlag, Leipzig 1962 entnehmen.

Über Ultraschall und seine Anwendung informiert Sie das Buch von Wolfgang Scholz „Ultraschall. Kleine Wellen, große Wirkungen“, Fachbuchverlag, Leipzig 1961.

## Zusammenfassung

1. Um jeden Punkt eines Mediums, der von einer sich ausbreitenden Wellenfront erreicht wird, bilden sich neue kreisförmige Wellen, sogenannte Elementarwellen.

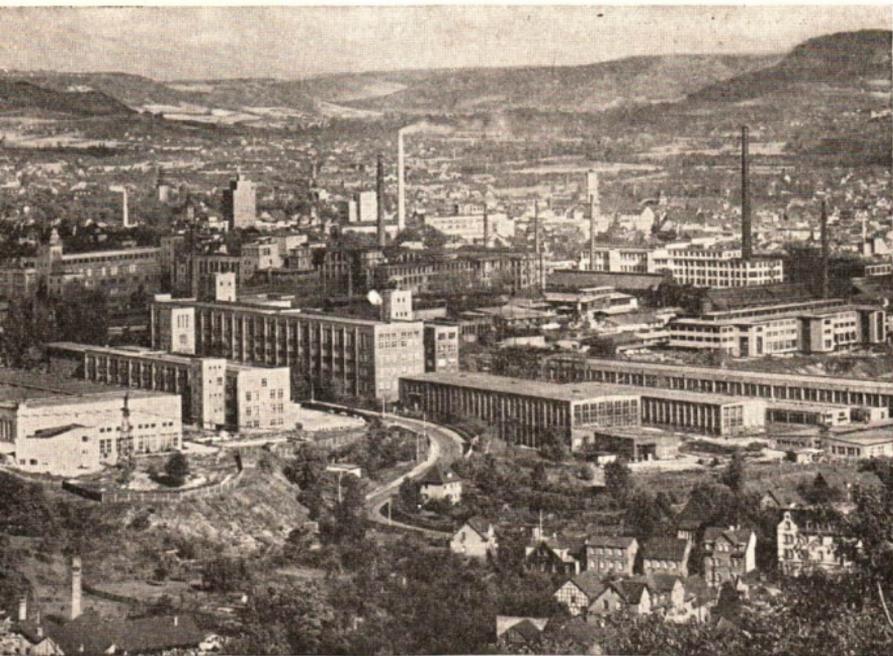
Welcher Zusammenhang besteht zwischen einer Wellenfront und den durch diese hervorgerufenen Elementarwellen?

2. Jeder Punkt, den eine Wellenfront erreicht, ist Ausgangspunkt einer neuen Welle. Diese Elementarwellen setzen sich zu einer gemeinsamen Frontwelle zusammen.

Welcher Unterschied besteht zwischen den Elementarwellen und der Wellenfront?

3. Bei stehenden Wellen ist der Abstand zweier Knoten gleich der halben Wellenlänge der sich überlagernden Wellen.

Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, wenn sich stehende Wellen bilden sollen?



## Optik

Bei der Untersuchung sehr kleiner Gegenstände waren im Mittelalter die Naturforscher auf primitive Mittel zur Vergrößerung des Bildgegenstandes angewiesen. Meist wurde ein Wassertropfen als Lupe benutzt.

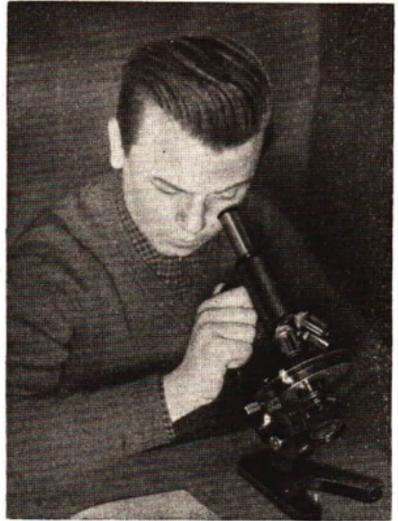
Bekannt ist uns auch aus dieser Zeit die wassergefüllte Glaskugel, die, vor die Lampe gestellt, eine Konzentration des Lichtes auf dem Arbeitsplatz ergab.

Heute benutzen wir zur Beobachtung von Mikroorganismen das Mikroskop. In den Sternwarten erforschen die Astronomen das Weltall mit riesigen Fernrohren. In vielen Industriebetrieben benutzen Facharbeiter, Laboranten und Gütekontrolleure Lupen, Mikroskope, Spektralapparate und andere optische Instrumente, um hochwertige Geräte, Werkstücke, Textilien, Lebensmittel und Medikamente während des Produktionsprozesses auf Einhaltung der vorgeschriebenen Güte überprüfen zu können. Die Mehrzahl aller optischen Geräte, die wir verwenden, wird in dem VEB Carl Zeiss Jena hergestellt, dessen Produktionsstätten unser Bild zeigt.

# 1. Die Ausbreitung des Lichtes



Wenn man die Struktur der Stoffe untersucht, dann kann man sehr oft interessante physikalische Einzelheiten feststellen. Das Mikroskop ist uns bei solchen Untersuchungen ein unentbehrliches Hilfsmittel geworden, das wir im Unterricht und in der Arbeitsgemeinschaft benutzen. Im folgenden Abschnitt des Buches sollen die wichtigsten Gesetze der Optik erörtert werden. Sie gelten allgemein, also auch für die Vorgänge in optischen Geräten. Sie werden hier vereinfacht dargestellt.



## 1.1. Lichtquellen

Man kann einen Körper nur dann sehen, wenn von ihm Licht ausgeht, das durch Reizung der Sehnerven die optische Wahrnehmung hervorruft. Dabei ist es gleichgültig, ob der Körper selbst leuchtet oder ob er das Licht reflektiert.

Die selbständige Lichtausstrahlung eines Körpers erfolgt meist bei hoher Temperatur. Bei etwa  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  beginnen feste und flüssige Körper in schwacher Grauglut zu *leuchten*. Das von ihnen ausgestrahlte Licht geht bei steigender Temperatur von Rot in Gelb und schließlich ab  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  in Weiß über. Man nennt Lichtquellen, die bei hoher Temperatur Licht aussenden, *Temperaturstrahler*.

Es gibt aber auch Stoffe, die bereits bei Normaltemperaturen, also weit unterhalb  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , leuchten. Man bezeichnet sie als *Kaltstrahler*.

### Beispiel

Die Leuchtmasse auf den Ziffern der Uhr, die Leuchtröhren und die Leuchtstofflampen sind Kaltstrahler.

Die Planeten sind *beleuchtete* Körper. Sie reflektieren einen Teil des Sonnenlichtes, von dem sie getroffen werden. Die Sonne und alle übrigen Fixsterne und Kometen sind Temperaturstrahler. Aus der Farbe des Lichtes, das diese aussenden, kann man auf die Temperatur ihrer Oberflächen schließen. So hat man für die Sonnenoberfläche eine Temperatur von nahezu  $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ermittelt.

Dies ist ein Beispiel dafür, wie die Wissenschaftler die Eigenschaften und Zustände der Materie im unendlichen Raum des Kosmos untersuchen und erkennen. Es zeigt uns, daß die Welt erkennbar ist. Der Erkenntnis sind keine festen Grenzen gesetzt. Diese bestehen nur zeitweilig und weichen zurück, wenn neue, verfeinerte Untersuchungsmethoden angewandt werden.

## 1.2. Durchsichtige, durchscheinende und lichtundurchlässige Körper

Versucht man, die Dinge der Umwelt in durchsichtige, durchscheinende und lichtundurchlässige Körper einzuteilen, ergeben sich Schwierigkeiten. Zwar hängt die Lichtdurchlässigkeit vom Material ab, und im allgemeinen sind Gegenstände aus Holz oder Metall lichtundurchlässig, jedoch ist beispielsweise ein dünner Holzspan durchscheinend. Blattgold, zu einer Schichtdicke von nur  $10^{-4}$  mm gehämmertes Gold, ist sogar durchsichtig. Andererseits berichten Taucher, daß in größeren Meerestiefen völlige Dunkelheit herrscht, weil das Sonnenlicht nur wenige Meter tief in das Wasser einzudringen vermag.

Auch die Feinstruktur der Stoffe ist für die Lichtdurchlässigkeit von Bedeutung. So wird zum Beispiel Eis milchig trüb, wenn es rissig geworden ist. Ähnlich ist es auch bei Glas. Gaspulver ist undurchsichtig.

Die Lichtdurchlässigkeit wird außerdem auch von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflußt. Bearbeitet man beispielsweise die Oberfläche einer Glasscheibe mit Schmirgel, so wird sie matt und undurchsichtig.

**Die Lichtdurchlässigkeit der Körper hängt vom Material, von der Feinstruktur, von der Schichtdicke und von der Oberflächenbeschaffenheit ab.**

## 1.3. Die geradlinige Ausbreitung des Lichtes

Das Licht breitet sich von einer Lichtquelle im gleichen Medium nach allen Seiten geradlinig aus. Beweise für die geradlinige Ausbreitung sind die Entstehung scharfbegrenzter Schlagschatten hinter lichtundurchlässigen Körpern, von Kern- und Halbschatten bei Sonnen- und Mondfinsternissen.

Stellt man vor eine Lichtquelle eine Lochblende mit einer kleinen kreisförmigen Öffnung, so beobachtet man, daß durch das Loch nur ein dünnes Lichtbündel hindurchfällt.

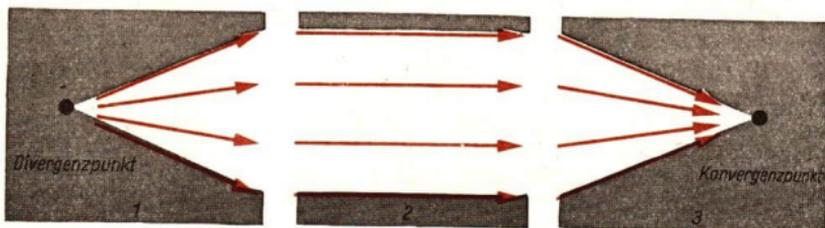
Bei optischen Versuchen benutzt man immer **Lichtstrahlenbündel**, die zur Veranschaulichung des Verlaufes von einzelnen Strahlen dienen. Ein einzelner Strahl stellt eine Abstraktion dar, wie man sie in der Physik häufig benutzen muß. Diese Abstraktion<sup>1</sup> ist in der Optik nötig, damit eine Vorstellung vom Strahlengang bei optischen Vorgängen geschaffen werden kann. Hierbei werden die Lichtstrahlen als gerade Linien dargestellt.

Der Querschnitt eines Lichtstrahlenbündels, das man aus dem Lichtstrom einer punktförmigen Lichtquelle ausblendet, wird mit wachsender Entfernung von der

<sup>1</sup> Abstraktion: Aussonderung der wesentlichen Merkmale zur Bildung eines allgemeinen Begriffes

Lichtquelle größer. Man bezeichnet ein solches Lichtstrahlenbündel als *divergent* (Bild 166/1). Sonnenlicht ist nahezu *parallelstrahlig*, da die Sonne etwa 150 Millionen km von der Erde entfernt ist.

Wenn in einem Lichtstrahlenbündel mit zunehmender Entfernung von der Lichtquelle der Querschnitt immer kleiner wird, dann spricht man von einem *konvergenten* Bündel.

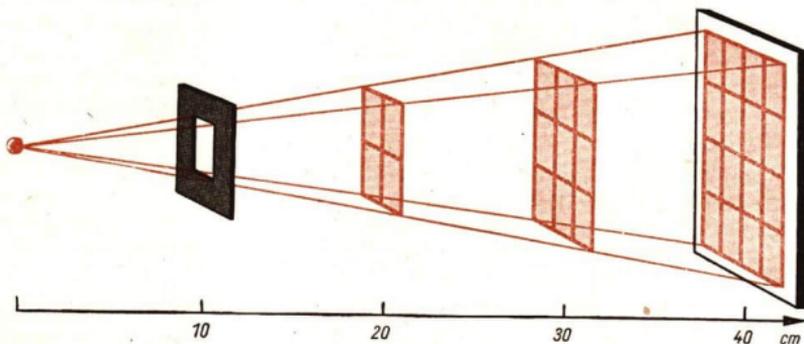


166/1 Lichtstrahlenbündel 1 divergent, 2 parallel, 3 konvergent

#### 1.4. Das Abstandsgesetz

In einem Versuch soll der Querschnitt eines divergenten Lichtstrahlenbündels in verschiedenen Entfernungen von der Lichtquelle bestimmt werden.

Man läßt das Licht einer möglichst punktförmigen Lichtquelle auf einen Projektionschirm fallen, der mit Millimeterpapier beklebt ist. Zwischen die Lampe und den Schirm stellt man eine Blende mit einem quadratischen Ausschnitt von  $1 \text{ cm}^2$  Größe so auf, daß auf dem Schirm gerade vier Quadratzentimeter beleuchtet werden. Bei einem Abstand der Lichtquelle vom Schirm von 20 cm (Bild 166/2) ist die Blende dann genau 10 cm von der Lichtquelle entfernt.



166/2 Der Querschnitt eines divergenten Lichtstrahlenbündels wächst mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle

Vergrößert man den Abstand des Schirmes auf 30 cm und 40 cm, ohne die Stellung der Blende zu verändern, so kann man den Querschnitt des Lichtstrahlenbündels von  $9 \text{ cm}^2$  bzw.  $16 \text{ cm}^2$  ermitteln.

Der Versuch zeigt, daß sich beim Verhältnis der Entfernungen von 10 cm : 20 cm : 30 cm : 40 cm die beleuchteten Flächen wie  $1 \text{ cm}^2 : 4 \text{ cm}^2 : 9 \text{ cm}^2 : 16 \text{ cm}^2$  verhalten. Daraus folgt das Abstandsgesetz:

Der Querschnitt  $A$  eines divergenten Lichtstrahlenbündels ist proportional dem Quadrat des Abstandes  $l$  vom Divergenzpunkt.

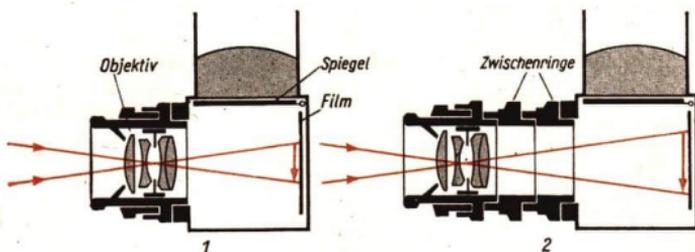
$$A \sim l^2$$

Man kann sich vorstellen, daß in dem divergenten Strahlenbündel je Zeiteinheit eine ganz bestimmte Menge Licht durch den Querschnitt hindurchtritt.

Dicht an der Lichtquelle trifft dieses Licht auf eine kleine Fläche, sie wird also sehr stark beleuchtet. In größerer Entfernung jedoch verteilt sich die gleiche Menge Licht auf eine große Fläche, sie wird nur schwach beleuchtet. Da die beleuchtete Fläche mit dem Quadrat der Entfernung wächst, gilt das Gesetz:

Die Beleuchtungsstärke nimmt mit dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle ab.

Beim Photographieren mit feststehender Belichtungszeit ist die Beleuchtungsstärke auf dem Film für die Wahl der Blende ausschlaggebend. Um fehlerhafte Einstellungen der Kamera zu vermeiden, benutzt man einen Belichtungsmesser, den man zur Lichtmessung neben die Kamera hält.



167/1 Schnitt durch eine Spiegelreflexkamera 1 ohne Zwischenringe, 2 mit Zwischenringen für Nahaufnahmen

Werden bei der Aufnahme jedoch Zwischenringe benutzt (Bild 167/1), dann vergrößert sich der Abstand zwischen Objektiv und Film in der Kamera. Dem Entfernungsgesetz entsprechend verringert sich dadurch die Beleuchtungsstärke auf dem Film, und die Belichtungszeit muß verlängert werden, wenn die gleiche Lichtwirkung auf dem Film hervorgerufen werden soll.

Das Entfernungsgesetz ist auch bei der Beleuchtung der Arbeitsplätze von Bedeutung. Ist die Beleuchtungsstärke zu gering, dann werden die Augen überanstrengt. Das kann zur Schädigung der Sehkraft und zur Kurzsichtigkeit führen.

## 1.5. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit

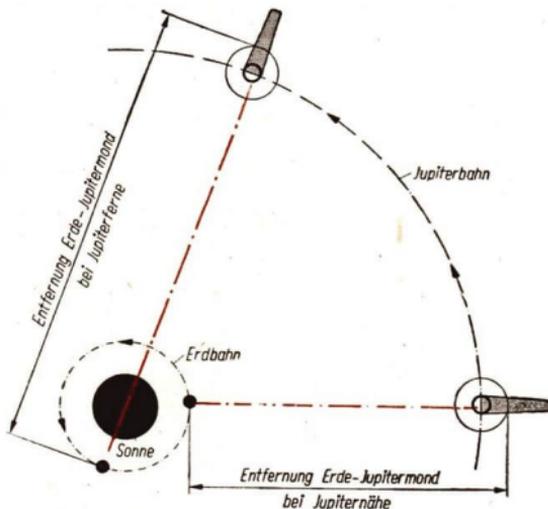
Schaltet man eine Taschenlampe ein, so sieht man im gleichen Augenblick, daß die Dinge, die in der Strahlrichtung liegen, beleuchtet werden. Beim Ausschalten erlischt auch im gleichen Augenblick der Lichtschein wieder. Auch wenn man einen Gegenstand in größerer Entfernung anstrahlt, ist keinerlei Verzögerung festzustellen. Diese Erscheinung führte früher zu der Annahme, daß das Licht zur Ausbreitung keine Zeit benötige bzw. daß die Lichtgeschwindigkeit so groß sei, daß sie außerhalb der Grenze der menschlichen Beobachtungsfähigkeit liege.

Im Jahre 1675 ermittelte jedoch der dänische Astronom OLAF RÖMER erstmals, daß das Licht eine Geschwindigkeit besitzt. Er benutzte dazu astronomische Hilfsmittel. Der Franzose HIPPOLYTE LOUIS FIZEAU hat 1849 zum ersten Male die Geschwindigkeit des Lichtes mit einer künstlichen Lichtquelle an einer Meßstrecke von wenigen Kilometern bestimmt, während seinem Landsmann LEON FOUCAULT 1862 die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Laboratorium gelang.

OLAF RÖMER hatte die Lichtgeschwindigkeit aus Beobachtungen eines Naturvorganges ermittelt. FIZEAU und FOUCAULT setzten später das Experiment an die Stelle der Naturbeobachtung. Wie an vielen Stellen in der Geschichte der Entwicklung der Naturwissenschaften erkennt man auch hier, daß die Welt und die in ihr geltenden Gesetzmäßigkeiten erkennbar sind, daß der Erkenntnis keine feststehenden Grenzen gesetzt sind.

### 1.5.1. Die astronomische Methode

OLAF RÖMER beobachtete regelmäßig den Beginn der Verfinsterung eines Jupitermondes, der bei jedem Umlauf einmal in den Schatten des Planeten eintritt und dadurch unsichtbar wird (Bild 168/1). Gegenüber den bei der Stellung Erde in Jupiternähe errechneten Werten trat die Verfinsterung in der Stellung Erde in Jupiterferne um 1320 s später ein. RÖMER zog daraus die richtige Schlußfolgerung, daß das Licht im zweiten Falle eine längere Wegstrecke zurücklegen mußte. Der Durchmesser der Erdbahn wurde vom Licht in 1320 s zusätzlich durchlaufen.



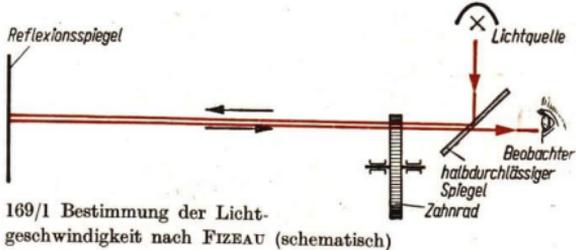
168/1 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit (OLAF RÖMER)

Da der Durchmesser bekannt war, berechnete RÖMER die Lichtgeschwindigkeit zu

$$c = \frac{s}{t} \quad c = \frac{3 \cdot 10^8}{1320} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \quad c = \underline{\underline{227\,272 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

### 1.5.2. Die Fizeausche Methode

Die Fizeausche Methode zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist im Prinzip im Bild 169/1 wiedergegeben. FIZEAU benutzte eine Meßstrecke von 8,633 km. Durch eine Lücke eines rotierenden Zahnrades mit 720 Zähnen und 720 ebenso breiten Lücken lief das Lichtbündel zu einem Spiegel und wurde dort reflektiert. Es fiel zunächst durch dieselbe Lücke des Rades in das Auge des Beobachters. Nun wurde die Drehzahl allmählich gesteigert, und bei 12,6 Umdrehungen je Sekunde trat erstmalig Verdunkelung ein; denn der vom Spiegel reflektierte Strahl traf statt der Ausgangslücke den ihr folgenden Zahn. FIZEAU berechnete daraus die Lichtgeschwindigkeit zu  $313\,274 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .



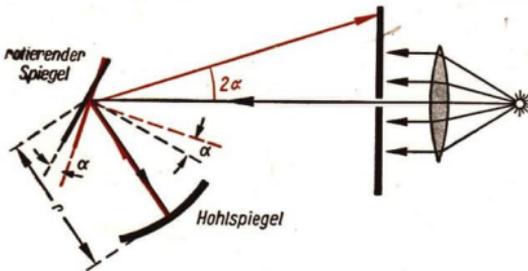
### 1.5.3. Die Foucaultsche Methode

Der französische Physiker FOUCAULT ließ ein paralleles Lichtstrahlenbündel durch einen schmalen Spalt auf einen drehbaren Spiegel fallen (Bild 169/2). Dieser reflektierte das Licht zu einem feststehenden Hohlspiegel, dessen Krümmungsmittelpunkt im Drehpunkt des ebenen Spiegels lag. Rotierte dieser Spiegel, so trafen die vom Hohlspiegel reflektierten Strahlen den Spiegel in einer etwas anderen Stellung als beim Hingang. Die Meßstrecke ist bei dieser Methode die Entfernung zwischen den beiden Spiegeln, also der Krümmungsradius  $r$  des Hohlspiegels. Die hierfür benötigte

Zeit  $t$  kann aus der Drehzahl des Spiegels und dem Winkel  $\alpha$  berechnet werden. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ergibt sich dann aus der Gleichung

$$c = \frac{2 \cdot r}{t}$$

Auf diese Weise fand FOUCAULT als Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes den Wert von rund  $3 \cdot 10^8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .



169/2 Foucaultsches Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit (schematisch)

Der Vorteil der Foucaultschen Methode besteht darin, daß als Meßstrecke schon eine Entfernung von wenigen Metern ausreicht. Dadurch wurde es möglich, die Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und in verschiedenen Stoffen, wie in Glas, in Luft und in Wasser, zu bestimmen. Bei neueren Versuchsanordnungen verwendet man meist ähnliche Methoden wie FIZEAU, jedoch wird der Strahlengang nicht mechanisch, sondern durch elektronische Steuerungsvorgänge unterbrochen. In Tausenden von Präzisionsmessungen wurde zum Beispiel festgestellt:

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt  $(299\,790 \pm 6) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

In Luft ist die Lichtgeschwindigkeit nur wenig kleiner als im Vakuum. Für die meisten Rechnungen genügt als Näherungswert  $c = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . In allen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im Vakuum. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Lichtgeschwindigkeiten in einigen Medien. Man nennt ein Medium *optisch dünner*, wenn in ihm die Lichtgeschwindigkeit größer ist als im Vergleichsmedium, bei kleinerer Geschwindigkeit dagegen bezeichnet man es als *optisch dichter*. So ist zum Beispiel Alkohol optisch dichter als Wasser.

Tabelle 1: Lichtgeschwindigkeit für Natriumlicht

Optisches Medium	Lichtgeschwindigkeit (in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Optisches Medium	Lichtgeschwindigkeit (in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Vakuum	299790	Äther, Alkohol	220380
Luft	299710	Kronglas	197180
Wasser	225350	Diamant	121340

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist die größte Geschwindigkeit der Energieübertragung, die man bei Vorgängen in der Natur gemessen hat. Auch bei wissenschaftlichen Experimenten kann man keine größere Geschwindigkeit erzielen. Aus allen Beobachtungen ergibt sich die Tatsache, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum ein Maximum ist.

## Zusammenfassung

### 1. Das Licht breitet sich im homogenen Medium geradlinig aus.

Welche Arten von Lichtstrahlenbündeln unterscheidet man?

### 2. Der Querschnitt eines divergenten Lichtstrahlenbündels ist proportional dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle.

Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Beleuchtungsstärke und dem Abstand von der Lichtquelle?

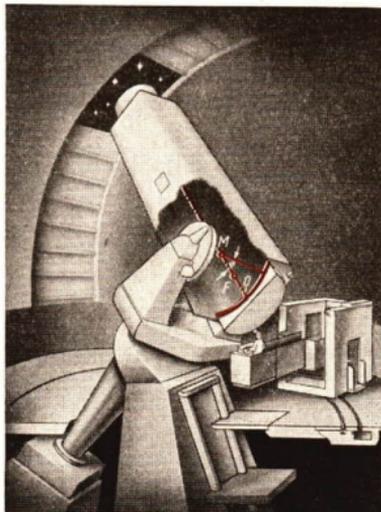
### 3. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt rund $300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Wie hat man sie bestimmt?

## 2. Reflexion am Hohlspiegel

Die Sternwarte der Deutschen Akademie der Wissenschaften Berlin in Tautenburg/Jena ist mit einem 2-m-Spiegelteleskop ausgerüstet, das die Werkstätten des VEB Carl Zeiss Jena herstellen. Optischer Hauptteil ist ein Hohlspiegel, der im geschliffenen Zustand eine Masse von 2400 kg besitzt. Der Schnitt durch das Teleskop zeigt:

- $M$ : Krümmungsmittelpunkt  
 $F$ : Brennpunkt  
 $\varphi$ : Öffnungswinkel  
 $M - O$ : Optische Achse



### 2.1. Hohlspiegel

Die Herstellung von Hohlspiegeln wird mit großer Sorgfalt ausgeführt; denn die reflektierende Fläche darf nur sehr geringe Abweichungen von der Innenfläche eines Kugel- oder Paraboloidausschnittes haben. Warum das so wichtig ist, werden wir in den folgenden Abschnitten erfahren.

Hohlspiegel besitzen bestimmte Kennwerte, die bei der Untersuchung optischer Gesetzmäßigkeiten bekannt sein müssen. Den Mittelpunkt  $O$  der spiegelnden Fläche bezeichnet man als den *optischen Mittelpunkt*. Der Mittelpunkt der Kugel, aus der man sich den Spiegel herausgeschnitten denken kann, ist der *Krümmungsmittelpunkt*  $M$ .

Die durch den Krümmungsmittelpunkt  $M$  und den optischen Mittelpunkt  $O$  gehende Gerade heißt *optische Achse*. Auf ihr liegt in der Mitte zwischen Spiegel- und Krümmungsmittelpunkt der *Brennpunkt*  $F$ . Den Winkel  $\varphi$ , den ein vom Krümmungsmittelpunkt  $M$  zum äußersten Rand des Spiegels verlaufender Strahl mit der optischen Achse bildet, nennt man den *Öffnungswinkel* des Spiegels.

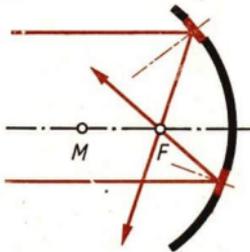
### 2.2. Strahlenverlauf am sphärischen Spiegel

Eine wichtige Erscheinung aus dem Gebiet der Optik ist die Reflexion. Einzelheiten darüber sind uns schon bekannt.

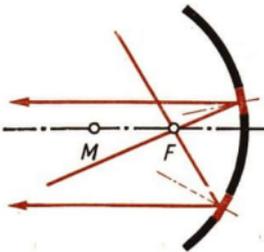
Das Reflexionsgesetz lautet:

Wird ein Lichtstrahl an einem Spiegel reflektiert, so liegen der einfallende Strahl, der reflektierte Strahl und das Einfallslot in einer Ebene. Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

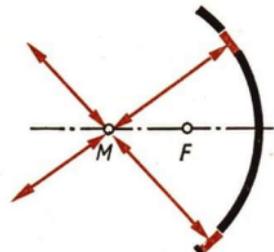
Jede Lichtquelle sendet Lichtstrahlen aus. Ebenso werden von jedem Gegenstandspunkt Lichtstrahlen reflektiert. Für das Verständnis vieler optischer Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten ist aber nur der Verlauf einiger Strahlen von Bedeutung (Bild 172/1).



Parallelstrahlen verlaufen nach der Reflexion durch den Brennpunkt  $F$



Brennpunktstrahlen verlaufen nach der Reflexion parallel



Mittelpunktstrahlen verlaufen nach der Reflexion durch den Mittelpunkt

172/1 Die Lichtstrahlen folgen dem Reflexionsgesetz: Einfall- und Ausfallwinkel sind gleich groß

Wie man experimentell nachweisen kann, gilt nach dem Reflexionsgesetz am sphärischen Hohlspiegel<sup>1</sup> folgendes:

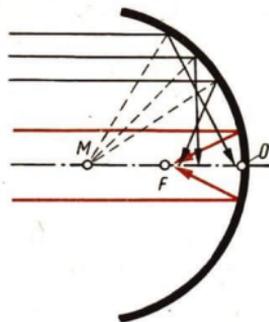
1. Parallel zur optischen Achse auf einen Hohlspiegel fallende Lichtstrahlen (Parallelstrahlen) werden so reflektiert, daß sie sich angenähert in einem Punkt der optischen Achse, dem Brennpunkt  $F$ , schneiden.
2. Durch den Brennpunkt auf den Hohlspiegel fallende Strahlen (Brennpunktstrahlen) werden von diesem so reflektiert, daß sie parallel zur optischen Achse austreten.
3. Durch den Krümmungsmittelpunkt  $M$  des Hohlspiegels fallende Strahlen (Mittelpunktstrahlen) werden in sich selbst reflektiert.

Die ersten beiden Aussagen gelten mit guter Annäherung jedoch nur für sphärische Hohlspiegel mit kleinem Öffnungswinkel. Lassen wir einen achsennahen und einen achsenfernen Parallelstrahl auf einen Hohlspiegel mit großem Öffnungswinkel fallen, so haben die beiden reflektierten Strahlen im allgemeinen nicht den gleichen Schnittpunkt mit der optischen Achse (Bild 173/1).

Am sphärischen Hohlspiegel werden nur achsennahe Parallelstrahlen angenähert zum Brennpunkt  $F$  reflektiert.

<sup>1</sup> Sphäre (griech.): Kugelschale

173/1 Achsenparallele Strahlen am Hohlspiegel  
 Achsennahe Strahlen schneiden die optische Achse nach der Reflexion annähernd im Brennpunkt  $F$ , achsenferne Strahlen zwischen Brennpunkt und optischem Mittelpunkt  $O$



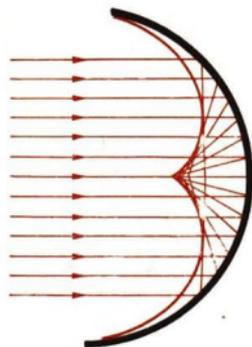
Den Abstand dieses Brennpunktes von der reflektierenden Hohlspiegelfläche bezeichnet man als *Brennweite*  $f$ .

Die Brennweite ist etwa halb so groß wie der Krümmungsradius des sphärischen Hohlspiegels.

$$f \approx \frac{r}{2}$$

(24)

Bei sphärischen Hohlspiegeln mit großem Öffnungswinkel umhüllen die reflektierten Strahlen eine deutlich sichtbare krumme Fläche, die *Brennfläche*. Man nennt sie die *Katakaustik*.<sup>1</sup> Sie hat an der Stelle des Brennpunktes eine Spitze.



173/2 Sphärischer Hohlspiegel mit parallel einfallenden Lichtstrahlen

Es entsteht eine Brennfläche, die Katakaustik

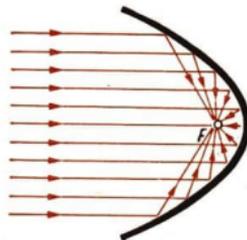
### Beispiel

Legt man einen Ring, dessen Innenfläche poliert ist, auf eine weiße Unterlage, so beobachtet man beim Einfall von parallelen Lichtstrahlen (z. B. Sonnenstrahlen) im Innern des Ringes eine helle Linie, die nahezu die Form einer 3 zeigt. Die Spitze dieser 3 ist der Brennpunkt.

Die eben beschriebene Figur stellt den Schnitt der Brennfläche mit der Unterlage dar. Für bestimmte Zwecke ist der sphärische Spiegel infolge seiner Brennpunkteigenschaften unzuweckmäßig. Weitاًus günstiger verhält sich ein Spiegel von Paraboloidform<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> kata (griech.): nieder, herab  
 kaustikós (griech.): brennend

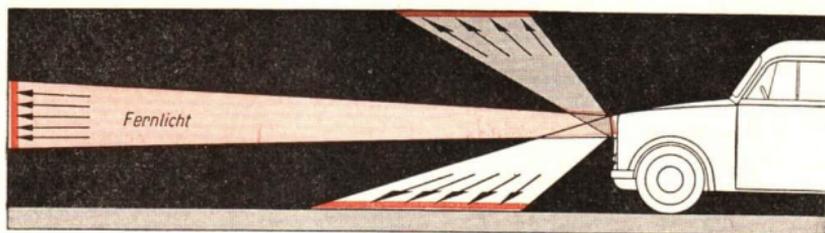
<sup>2</sup> Paraboloid: Körper, dessen Oberfläche durch Drehen einer Parabel um ihre Achse entsteht



173/3 Parabolspiegel mit parallel einfallenden Lichtstrahlen  $F$  Brennpunkt

### 2.3. Strahlenverlauf am Parabolspiegel

Nach der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung muß jedes Kraftfahrzeug mit Scheinwerfern ausgerüstet sein, die ein Abblenden des Fernlichtes gestatten. Durch diese Vorrichtung kann die Behinderung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer stark herabgesetzt werden, wenn der Kraftfahrer zur rechten Zeit abblendet (Bild 174/1).



abgeblendeter Lichtkegel

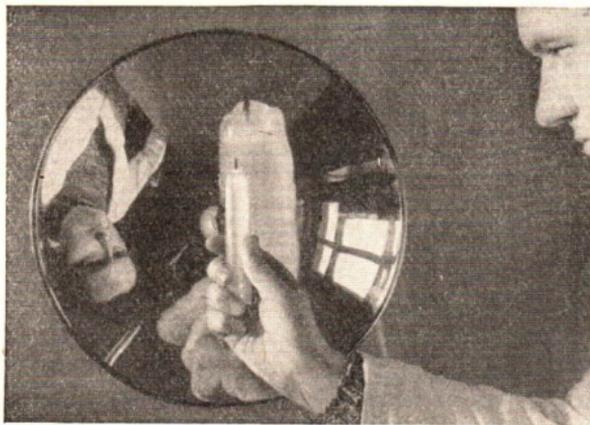
174/1 Kraftfahrzeug mit Fernlicht und mit abgeblendetem Scheinwerfer

- Welche Wirkung kann ein falsch eingestellter Kraftfahrzeugscheinwerfer haben?

Die spiegelnde Innenfläche des Kraftfahrzeugscheinwerfers besitzt die Form eines *Paraboloids*. Solche Spiegel werden *Parabolspiegel* genannt. Sie werden als Reflektoren in den verschiedenen Leuchten, im Spiegelteleskop und in der Arztpraxis verwendet. Geometrische Gesetzmäßigkeiten sind die Ursache dafür, daß sich alle parallel einfallenden Lichtstrahlen in einem Punkt, dem Brennpunkt  $F$ , schneiden. (Lösen Sie dazu die Aufgabe 6 auf Seite 178!)

Gehen die Lichtstrahlen vom Brennpunkt eines Parabolspiegels aus, so werden sie so reflektiert, daß sie den Spiegel parallel verlassen.

### 2.4. Bilder am Hohlspiegel — Abbildungsgleichung



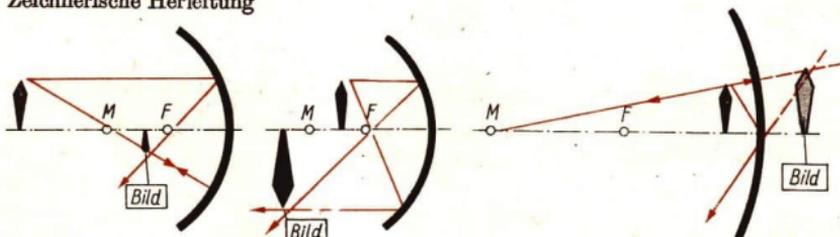
Der Mann auf dem Bild 174/2 hält eine Kerze in seiner Hand. Das Spiegelbild zeigt jedoch etwas sehr Eigenartiges. Die Kerze steht aufrecht, während der Experimentierende um-

174/2 Spiegelbild im Hohlspiegel

gekehrt zu sehen ist. Außerdem erscheint die Kerze vergrößert und der Mann verkleinert. Wie kommt das?

Die Lage und die Größe der Spiegelbilder lassen sich *zeichnerisch* und *mathematisch* ermitteln.

### Zeichnerische Herleitung



175/1 Bildkonstruktion am Hohlspiegel bei verschiedener Stellung des abzubildenden Gegenstandes

Das im Schnittpunkt der reflektierten Strahlen entstehende Bild ist reell

Das im scheinbaren Schnittpunkt der reflektierten Strahlen hinter dem Spiegel entstehende Bild ist virtuell

In der folgenden Tabelle sind die charakteristischen Lagen von Gegenstand und Bild zusammengefaßt:

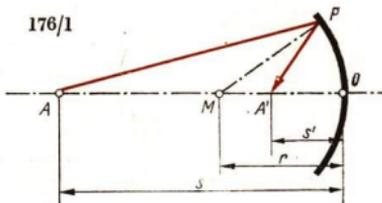
Tabelle 2: Bildentstehung an einem Hohlspiegel

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite $s > 2f$	zwischen einfacher und doppelter Brennweite $f < s' < 2f$	reell	umgekehrt	verkleinert
im Krümmungsmittelpunkt $s = 2f$	im Krümmungsmittelpunkt $s' = 2f$	reell	umgekehrt	ebenso groß wie der Gegenstand
zwischen doppelter und einfacher Brennweite $2f > s > f$	außerhalb der doppelten Brennweite $s' > 2f$	reell	umgekehrt	vergrößert
innerhalb der einfachen Brennweite $s < f$	hinter dem Spiegel $s'$ negativ	virtuell	aufrecht	vergrößert

Von Bedeutung für die mathematische Herleitung sind die Größen

- $s$  : Gegenstandsweite, Abstand des Gegenstandes vom optischen Mittelpunkt  $O$   
 $s'$  : Bildweite, Abstand des Bildes vom optischen Mittelpunkt  $O$   
 $r$  : Krümmungsradius, Abstand des Krümmungsmittelpunktes  $M$  vom optischen Mittelpunkt  $O$   
 $f$  : Brennweite, Abstand des Brennpunktes  $F$  vom optischen Mittelpunkt  $O$

Bei der Untersuchung einer Abbildung führt die Benutzung achsenferner Strahlen zu einem unbefriedigenden Ergebnis. Beschränkt man sich aber auf achsennahe Strahlen, so kann man eine mathematische Beziehung zwischen der Gegenstandsweite  $s$ , der Bildweite  $s'$  und dem Krümmungsradius  $r$  herleiten.



Unter der Voraussetzung (Bild 176/1), daß  $AP$  und  $PA'$  achsennahe Strahlen sind, liegt  $A'$  so, daß sich die auf der Achse liegenden Strecken  $\overline{AM}$  und  $\overline{A'M}$  annähernd wie  $\overline{AO}$  und  $\overline{A'O}$  verhalten. Wenn man die Krümmung des Spiegels vernachlässigt und seine Fläche als eben annimmt, ergibt sich:

$$\overline{AO} : \overline{A'O} = \overline{AM} : \overline{A'M}$$

$$s : s' = (s - r) : (r - s')$$

$$s(r - s') = s'(s - r)$$

$$sr - ss' = s's - s'r$$

$$sr + s'r = 2ss' \quad | : r s s'$$

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$$

Da die Brennweite  $f$  gleich dem halben Krümmungsradius  $r$  ist, erhält man als Abbildungsgleichung für den Hohlspiegel:

$$\boxed{\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}} \quad (25)$$

Diese Gleichung gilt für achsennahe Strahlen. Durch Auflösen der Hohlspiegelgleichung nach  $s$ ,  $s'$  oder  $f$  kann man eine der drei Größen berechnen, wenn die beiden anderen bekannt sind.

#### Beispiel

Vor einen Hohlspiegel mit dem Krümmungsradius  $r = 20$  cm stellen wir in der Entfernung  $s = 60$  cm einen leuchtenden Gegenstand. Aus der Hohlspiegelgleichung ergibt sich die Bildweite.

Gegeben:

$$r = 20 \text{ cm}$$

$$s = 60 \text{ cm}$$

Gesucht:

$$s' \text{ (in cm)}$$

Lösung:

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f}$$

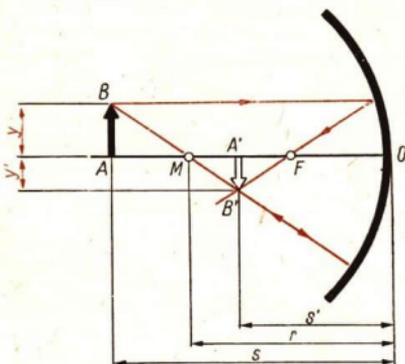
$$s' = \frac{10 \cdot 60}{60 - 10} \text{ cm}$$

$$\underline{\underline{s' = 12 \text{ cm}}}$$

Bringt man im Abstand von 12 cm vom Hohlspiegel einen Schirm in den Strahlengang der reflektierten Strahlen, so erhält man tatsächlich ein scharfes Bild des Gegenstandes.

Die Abbildungsgleichung für den Hohlspiegel kann auch dann angewandt werden, wenn sich der Gegenstand zwischen optischem Mittelpunkt und Brennpunkt befindet, das heißt, wenn das Bild virtuell ist. In diesem Falle ist die Bildweite mit negativem Vorzeichen einzusetzen.

Die mathematische Beziehung zwischen Bildgröße und Gegenstandsgröße kann man aus dem Bild 177/1 ableiten. Man benutzt dazu einen Parallelstrahl und den Mittelpunktstrahl.



177/1 Bildkonstruktion am Hohlspiegel mittels eines Parallelstrahls und eines Mittelpunktstrahls

- Welcher geometrische Satz liegt der Bildkonstruktion zugrunde?

Der zwischen der Gegenstandsgröße  $y$  und der Bildgröße  $y'$  bestehende Zusammenhang wird durch das Verhältnis von Gegenstandsweite  $s$  zur Bildweite  $s'$  bestimmt. Wir können setzen

$$(s - r) : (r - s') = s : s',$$

$$(s - r) : (r - s') = y : y'.$$

Damit ergibt sich für Bildgröße und Gegenstandsgröße die Beziehung:

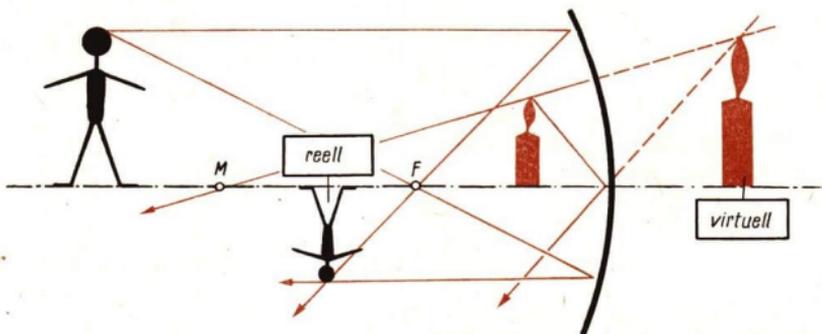
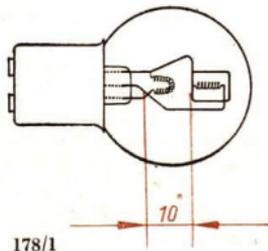
$$\boxed{y : y' = s : s'}$$

(26)

### Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Beobachten Sie die Flüssigkeitsoberfläche in einem zylindrischen Gefäß (z. B. Kaffeetasse) bei schräg einfallendem Licht (kein diffuses Licht) und erklären Sie sich nochmals das Entstehen der Katakastik!
2. Bilden Sie eine brennende Kerze mittels eines Hohlspiegels (Rasierspiegel) bei verschiedener Gegenstandsweite ab! Prüfen Sie die Ergebnisse durch Konstruktion des Bildes nach!
3. Wie kann man die Brennweite und den Krümmungsradius eines Hohlspiegels bestimmen?

4. Die Brennweite eines Hohlspiegels ist  $f = 20$  cm. In welcher Entfernung vom optischen Mittelpunkt befindet sich ein Gegenstand, wenn dessen virtuelles Bild doppelt so groß erscheint wie der Gegenstand?
5. Auf der Achse eines Hohlspiegels mit dem Krümmungsradius  $r = 6$  cm steht in einer Entfernung von  $s = 10$  cm ein  $y = 1,4$  cm hoher Gegenstand. Konstruieren Sie das Bild dieses Gegenstandes und bestätigen Sie die Richtigkeit der Konstruktion durch Rechnung!
6. Konstruieren Sie die Parabel eines Scheinwerferreflektors nach der Parabelgleichung, wenn  $p = 3,5$  für  $x = 0 \dots 12$  cm und zeichnen Sie den Strahlengang für Fernlicht und für Abblendlicht ein. Die Abmessungen der standardisierten Scheinwerferlampe sind zu berücksichtigen.
7. Die Brennweite eines Hohlspiegels beträgt 30 cm. Die Gegenstandsweite ist 25 cm größer als die Bildweite. Wie groß sind Bildweite und Gegenstandsweite? Die Lösung erfolgt mit Hilfe einer gemischt-quadratischen Gleichung.



8. Erklären Sie die Bildkonstruktion zum Bild 174/2 (Mann mit Kerze)

## Zusammenfassung

1. Sphärische Hohlspiegel reflektieren einfallende achsennahe Parallelstrahlen annähernd zum Brennpunkt.

Wie werden Brennpunktstrahlen reflektiert?

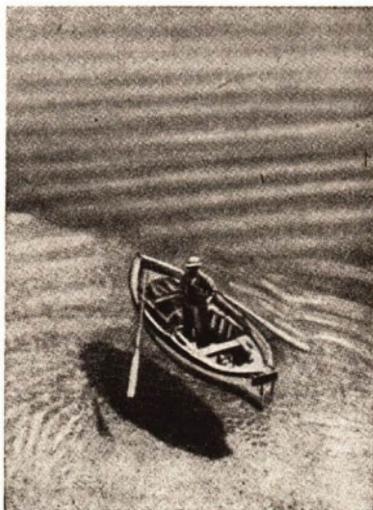
2. Parallel-, Brennpunkt- und Mittelpunktstrahlen bestimmen die Lage und den Ort eines Bildes.

Welchen Weg beschreiben diese Strahlen?

### 3. Die Lichtbrechung

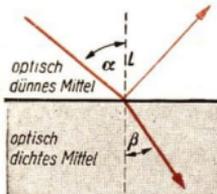
Beim Abschätzen der Wassertiefe eines klaren Gewässers täuscht man sich meist sehr stark.

Der auf dem Bild deutlich sichtbare und scheinbar kaum mehr als einen Meter tief unter dem Wasserspiegel liegende ebene Meeresgrund befindet sich in Wirklichkeit mehrere Meter tief unter der Wasseroberfläche. Diese Täuschung kann einem Nichtschwimmer sehr gefährlich werden. Ursache dieser Erscheinung ist die Brechung des Lichtes.



#### 3.1. Das Brechungsgesetz

Nach der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes unterscheiden wir Stoffe mit verschiedener optischer Dichte. Beim Übergang des Lichtes aus einem Stoff in einen anderen wird das Licht gebrochen, wenn die beiden Stoffe verschiedene optische Dichte besitzen.



179/1 Brechung des Lichtes beim Übergang aus einem optisch dünnen in einen optisch dichten Stoff

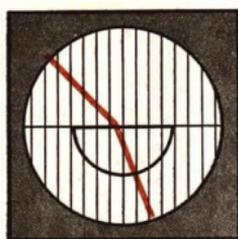
Beim Übergang des Lichtes aus einem optisch dünnen in einen optisch dichten Stoff wird der Lichtstrahl zum Einfallslot hin gebrochen, der Brechungswinkel ist kleiner als der Einfallswinkel (Bild 179/1). Ein Teil des auftreffenden Lichtes wird an der Grenzfläche reflektiert.

Beim Übergang des Lichtes aus einem optisch dichten in einen optisch dünnen Stoff wird der Lichtstrahl vom Einfallslot weg gebrochen. Der Brechungswinkel ist also größer als der Einfallswinkel. Ein senkrecht auf die Grenzfläche auftreffender Lichtstrahl wird nicht gebrochen.

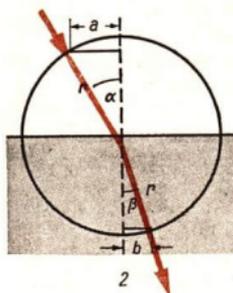
Wie bei der Reflexion liegen der einfallende Strahl, der gebrochene Strahl und das Einfallslot in einer Ebene. Weiterhin gilt auch für die Lichtbrechung die Umkehrbarkeit der Lichtwege. Die Brechung des Lichtes erfolgt gesetzmäßig. Dies kann mit Hilfe der optischen Scheibe näher untersucht werden.

Auf der optischen Scheibe ist ein halbzylindrischer Glaskörper angebracht. Er ist mit einer Scheibe aus Karton unterlegt, auf der neben dem Einfallslot in gleichen Abständen parallele Linien eingezeichnet sind. Man richtet ein schmales Lichtstrahlenbündel auf den Fußpunkt des Einfallslotes und beobachtet, an welchen Stellen das Bündel die optische Scheibe betritt und verläßt. Richtet man zum Beispiel das Strahlenbündel so ein, daß es am Beginn der dritten parallelen Linie links vom Lot auf die Scheibe fällt, so verläßt es sie am Ende der zweiten Parallelen rechts vom Lot (Bild 180/1). Fällt es am Beginn der sechsten Linie ein, so verläßt es die Scheibe am Ende der vierten Parallelen.

Die gleichen Beobachtungen, jedoch mit umgekehrtem Zahlenverhältnis, kann man auch machen, wenn man die Richtung der Strahlen umkehrt, wenn also das Licht aus dem optisch dichten Glas in die optisch dünne Luft übergeht (Bild 180/2).



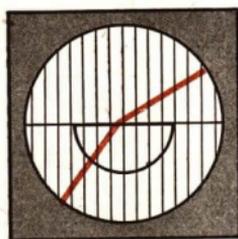
1



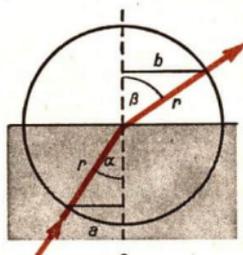
2

180/1 Brechung des Lichtes beim Übergang von Luft in Glas

1 Wiedergabe des Versuches  
2 schematische Darstellung



1



2

180/2 Brechung des Lichtes beim Übergang von Glas in Luft

1 Wiedergabe des Versuches  
2 schematische Darstellung

Aus den schematischen Darstellungen in den Bildern 180/1 und 180/2 kann man den Zusammenhang zwischen der Größe des Einfallswinkels und der des Brechungswinkels herleiten:

Für den Einfallswinkel und Brechungswinkel ergeben sich durch Anwenden trigonometrischer Funktionen folgende Gleichungen:

$$\sin \alpha = \frac{a}{r} \quad \text{und} \quad \sin \beta = \frac{b}{r}. \quad \text{Somit ist} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\frac{a}{r}}{\frac{b}{r}}$$

Man bezeichnet diese Gesetzmäßigkeit als das **Brechungsverhältnis**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{a}{b} \quad (27.1)$$

Für den Übergang des Lichtes von Luft nach Glas ergibt sich demnach für jeden beliebigen Einfallswinkel das konstante **Brechungsverhältnis**<sup>1</sup>

$$n_{\text{Luft}/\text{Glas}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3}{2}.$$

Für den Übergang von Glas nach Luft erhält man

$$n_{\text{Glas}/\text{Luft}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{2}{3}.$$

Verwendet man statt des halbzyllindrischen Glaskörpers einen Hohlkörper aus Glas, den man mit Wasser füllt, dann kann man das Brechungsverhältnis für den Übergang des Lichtes von Luft in Wasser ermitteln. In diesem Falle ist

$$n = \frac{4}{3}.$$

Diese Zusammenhänge wurden um das Jahr 1618 von dem holländischen Physiker **SNELL VAN ROYEN**<sup>2</sup> erkannt. Das *Snelliussche Brechungsgesetz* lautet:

Bei der Brechung des Lichtes steht der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem konstanten Zahlenverhältnis, das man **Brechungsverhältnis** nennt.

Der Zahlenwert  $n$  des Brechungsverhältnisses heißt auch **Brechungszahl**.

$$\text{Brechungszahl} = \frac{\text{Sinus des Einfallswinkels}}{\text{Sinus des Brechungswinkels}} \quad n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (27.2)$$

Vergleicht man das hier gefundene Brechungsgesetz mit dem der Wellenlehre

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2},$$

so erkennt man, daß beide dieselbe mathematische Struktur haben. Daher können wir vermuten, daß auch das Licht Wellennatur hat. Diese Annahme werden wir später (in der Klasse 12) bestätigen können.

Für den Übergang des Lichtes von Luft in Glas gilt demnach:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \cdot 10^8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{3}{2}.$$

<sup>1</sup> Der Wert des Brechungsverhältnisses ändert sich mit der chemischen Zusammensetzung des Glases (siehe auch Tabelle 3 auf Seite 182)

<sup>2</sup> **SNELL VAN ROYEN**: Die Wissenschaftler latinisierten früher ihre Namen, in unserem Beispiel **SNELLIUS**

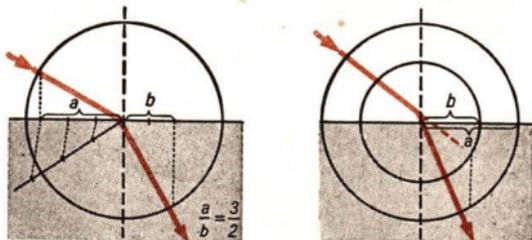
Tabelle 3: Brechungszahlen für den Übergang des Lichtes von Luft in ein anderes Mittel

Mittel	$n$	Mittel	$n$
Wasser	1,33	Schwefelkohlenstoff	1,63
Äthylalkohol	1,36	schweres Flintglas SF 4	1,74
Kronglas	1,52	Diamant	2,47

Konstruktion des Strahlenverlaufs bei der Brechung des Lichtes

Das Brechungsverhältnis sei  $\frac{a}{b}$ . Um den Einfallspunkt werden zwei Kreise mit den Radien  $a$  und  $b$  gezogen. Der einfallende Strahl wird über den Einfallspunkt hinaus verlängert, bis er den Kreis mit dem Radius  $b$  schneidet. Durch diesen Punkt zieht man eine Parallele zum Einfallslot. Der gebrochene Strahl verläuft durch deren Schnittpunkt mit dem Kreis des Radius  $a$  (Bild 182/1).

182/1 Konstruktion des Strahlenverlaufs bei der Brechung des Lichtes

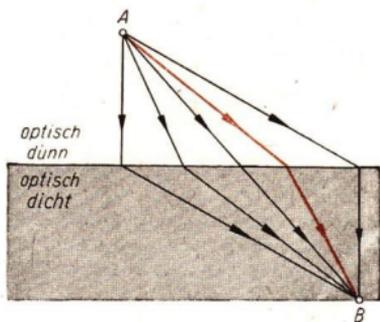


Soll das Licht, wie im Bild 182/2 dargestellt, vom Punkt  $A$  im optisch dünnen Mittel zum Punkt  $B$  im optisch dichten Mittel gehen, so wären verschiedene Wege denkbar. Der kürzeste Weg wäre die gerade Verbindung beider Punkte. Da jedoch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes in beiden Stoffen unterschiedlich sind, wird für den rot gezeichneten Lichtweg die kürzeste Zeit benötigt. Dies kann mathematisch nachgewiesen werden. Tatsächlich ist dies auch der Weg, der dem Brechungsgesetz  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$  entspricht.

Daß der Weg des geringsten Widerstandes, in diesem Falle der zeitkürzeste Weg, beschritten wird, ist ein Naturgesetz, das auch bei vielen anderen Naturvorgängen beobachtet werden kann. Man darf dieses Gesetz jedoch nicht auf jeden beliebigen Vorgang übertragen, ohne die Zusammenhänge zu beachten.

Aus den oben dargelegten Überlegungen folgt, daß auch in umgekehrter Richtung von  $B$  nach  $A$  nur der rot gekennzeichnete Weg in Frage kommen kann (Bild 182/2). Die Richtigkeit dieser Überlegung kann experimentell bestätigt werden.

182/2 Denkbare Lichtwege von  $A$  nach  $B$



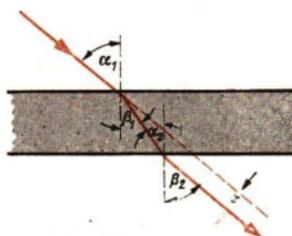
## 3.2. Lichtdurchgang durch Platten und Prismen

In den optischen Geräten werden die Gesetzmäßigkeiten der Lichtausbreitung vom Menschen ausgenutzt. Dazu dienen Spiegel und verschieden geformte *optische Körper*, wie Platten, Prismen und Linsen. Sie bestehen im allgemeinen aus Glas. Für besondere Zwecke werden sie jedoch auch aus Quarz, Steinsalz oder Polystyrol hergestellt.

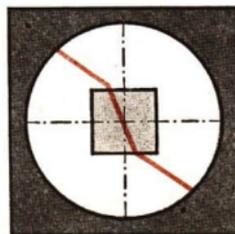
### 3.2.1. Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte

Beim Durchgang durch eine planparallele Platte wird das Licht beim Eintritt und auch beim Austritt gebrochen (Bild 183/1). Wie aus dem Bild ersichtlich ist, hat der Einfallswinkel  $\alpha_2$  beim Lichtaustritt als Wechselwinkel die gleiche Größe wie  $\beta_1$ , der Brechungswinkel beim Lichteintritt in die Platte. Aus der Umkehrbarkeit des Lichtweges folgt, daß auch  $\beta_2$  gleich  $\alpha_1$  sein muß. Der Lichtstrahl hat also beim Verlassen der Platte die gleiche Richtung wie beim Auftreffen, er ist beim Durchgang nur parallel zum vorherigen Verlauf verschoben worden. Der Abstand zum ursprünglichen Verlauf ist von der Dicke der Platte, von der Glassorte und vom Einfallswinkel abhängig. Dies zeigt auch ein Versuch mit der optischen Scheibe (Bild 183/2).

Beim schrägen Durchgang durch eine planparallele Platte wird ein Lichtstrahlenbündel parallel zu seinem ursprünglichen Verlauf verschoben.



183/1 Durchgang des Lichtes durch eine planparallele Platte

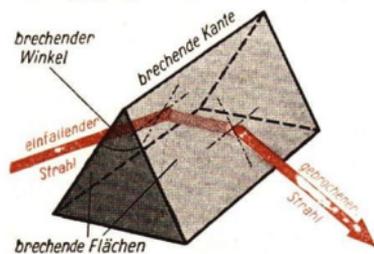


183/2 Versuch zum Durchgang des Lichtes durch eine planparallele Platte  
Als Platte dient ein Glaswürfel

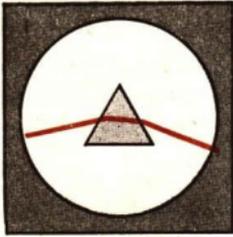
### 3.2.2. Lichtdurchgang durch ein optisches Prisma

Die Untersuchung des Lichtdurchganges erfolgte im vorangegangenen Abschnitt an einem Körper mit parallelen Grenzflächen.

Ein Körper mit nichtparallelen Grenzflächen dagegen zeigt stets die Form eines Prismas. Beim Lichtdurchgang durch solch ein *optisches Prisma* erfolgt ebenfalls an den beiden, in einem Winkel zueinanderstehenden Grenzflächen eine Lichtbrechung. Die Schnittlinie der *brechenden Flächen* wird *brechende Kante* genannt (Bild 183/3). Optische Prismen sind meist aus Glas, ihre brechenden Flächen sind plangeschliffen und poliert.

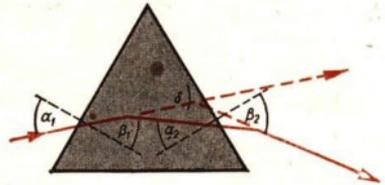


183/3 Optisches Prisma



184/1 Durchgang des Lichtes durch ein optisches Prisma  
Das Licht wird von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt

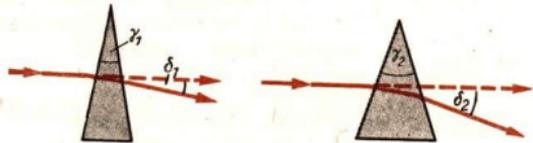
184/2 Bei symmetrischem Durchgang des Lichtes durch ein optisches Prisma ist die Gesamtablenkung am kleinsten



Durch ein Farbglas, eine Filterscheibe, sondert man aus weißem Licht eine Farbe, beispielsweise Rot aus. Ein dünnes Bündel dieses Lichtes fällt auf ein optisches Prisma, das auf einer optischen Scheibe befestigt ist (Bild 184/1). Man erkennt deutlich die Brechung des Lichtes beim Eintritt in und beim Austritt aus dem Glas. Da aber die brechenden Flächen hier nicht parallel sind, erfolgt keine Parallelverschiebung, sondern das Strahlenbündel wird abgelenkt. Es hat nach dem Durchgang durch das Prisma eine andere Richtung. Die Ablenkung erfolgt stets von der brechenden Kante weg. Verändert man den Einfallswinkel, dann verändert sich auch die Größe der *Gesamtablenkung*  $\delta$ . Diese ist bei symmetrischem Durchgang des Lichtes (Bild 184/2) am kleinsten.

Die Gesamtablenkung ist außerdem auch von der Größe des brechenden Winkels abhängig. Je größer dieser Winkel ist, desto größer ist auch die Ablenkung des Lichtes (Bild 184/3).

184/3 Die Gesamtablenkung des Lichtes beim Durchgang durch ein optisches Prisma ist von der Größe des brechenden Winkels abhängig



Beim Durchgang durch ein optisches Prisma wird das Licht von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Die Gesamtablenkung ist von der Größe des brechenden Winkels und vom Einfallswinkel abhängig. Sie hat ein Minimum bei symmetrischem Strahlenverlauf.

### 3.3. Totalreflexion

Blickt man durch die Seitenwand eines Aquariums oder in einem Schwimmbecken schräg von unten gegen die Wasseroberfläche, so gelingt es auch trotz größter Bemühungen nicht, durch die an sich durchsichtige Wasseroberfläche hindurch Gegenstände, die sich über ihr befinden, zu erkennen.

• *Wie ist diese Erscheinung zu erklären?*

Dazu müssen wir die Vorgänge der Lichtbrechung noch einmal näher betrachten. Beim Übergang des Lichtes vom optisch dichten zum optisch dünneren Mittel wird ein Lichtstrahl vom Lot weg gebrochen. Der Brechungswinkel  $\beta$  ist also stets größer als der Einfallswinkel  $\alpha$ . Wenn man  $\alpha$  allmählich vergrößert, dann vergrößert sich auch  $\beta$ , und zwar schneller als  $\alpha$ . Somit muß  $\beta$  früher den Wert von  $90^\circ$  erreichen als  $\alpha$ . Was geschieht aber, wenn man den Einfallswinkel  $\alpha$  noch weiter vergrößert? Diese Frage soll in einem Versuch geklärt werden.



185/1

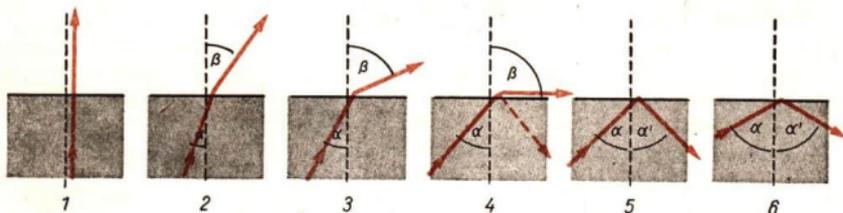
Totalreflexion an der Wasseroberfläche

### 3.3.1. Totalreflexion und Grenzwinkel

An der optischen Scheibe beobachtet man den Übergang des Lichtes von Glas nach Luft und vergrößert dabei den Einfallswinkel von  $0^\circ$  ausgehend allmählich. Wie bereits bekannt war, vergrößert sich mit zunehmendem Einfallswinkel  $\alpha$  auch der Brechungswinkel  $\beta$  (Bild 185/2).

Bei einem Einfallswinkel von etwa  $42^\circ$  hat  $\beta$  den Wert von  $90^\circ$  erreicht (Bild 185/2.4). Der gebrochene Strahl streift also an der Grenzfläche entlang. Bei genauer Beobachtung erkennt man, daß ein Teil des Lichtes an der Grenzfläche reflektiert wird.

Vergrößert man den Einfallswinkel noch weiter, dann tritt kein Licht mehr aus dem Glas in Luft über, das gesamte Licht wird an der Grenzfläche reflektiert (Bild 185/2.5 und 185/2.6).



185/2 Änderung des Brechungswinkels bei allmählicher Vergrößerung des Einfallswinkels  
Brechung tritt nur bis zu einem Winkel von etwa  $42^\circ$  auf, danach wird das Strahlenbündel in das Glas zurückgeworfen

In diesem Falle spricht man von *Totalreflexion*. Der Einfallswinkel, bei dem gerade noch Brechung erfolgt, heißt *Grenzwinkel der Totalreflexion*.

Wenn das Brechungsverhältnis bekannt ist, kann der Grenzwinkel berechnet werden.

### Beispiel

Berechnung des Grenzwinkels für den Übergang des Lichtes von Glas in Luft

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{2}{3} \quad \beta = 90^\circ$$

$$\sin 90^\circ = 1$$

$$\frac{\sin \alpha}{1} = \frac{2}{3}$$

$$\sin \alpha = 0,6666$$

$$\alpha = 41,8^\circ$$

Tabelle 4: Grenzwinkel für den Übergang in Luft

Optisches Mittel	$\alpha$
Wasser	48,8°
Kronglas	41,1°
schwerstes Flintglas	31,8°
Diamant	24,4°

Wird beim Übergang des Lichtes vom optisch dichteren in ein optisch dünneres Mittel der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel, dann tritt keine Brechung mehr ein, das Licht wird in das optisch dichtere Mittel reflektiert. Diese Erscheinung heißt Totalreflexion.

Die Vergrößerung des Einfallswinkels bedingt, daß bei einem bestimmten Winkel die lichtdurchlässige Grenzschicht plötzlich ihre Eigenschaft verändert; sie wird lichtundurchlässig und reflektiert die Strahlen. Damit ist durch eine Veränderung der Quantität (Einfallswinkel) ein Umschlag in eine neue Qualität (lichtundurchlässig, totalreflektierend) erfolgt.

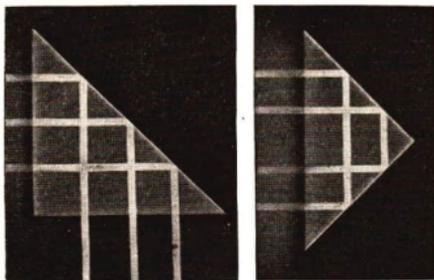
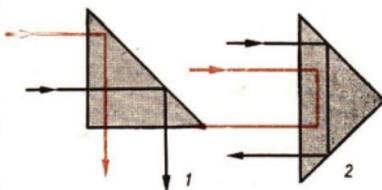


Bild 186/2 Glasfaser-Optik

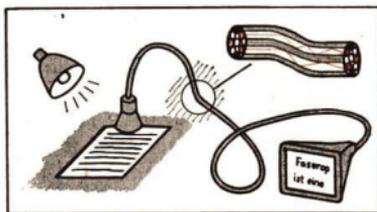
Durch ein biegsames Bündel von Glasfasern läßt sich Licht in Längsrichtung der Fasern fortleiten. Infolge der Totalreflexion an der Faseroberfläche folgt das Licht allen Richtungsveränderungen des Faserbündels. Mit der Glasfaser-Optik können lichtstarke Bilder übertragen werden. Zum Teil können komplizierte elektronische Übertragungsanlagen durch diese einfache optische Anlage ersetzt werden.



186/1 Totalreflektierende Prismen

1 zur Richtungsänderung um 90°

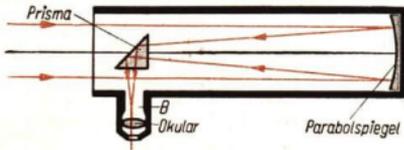
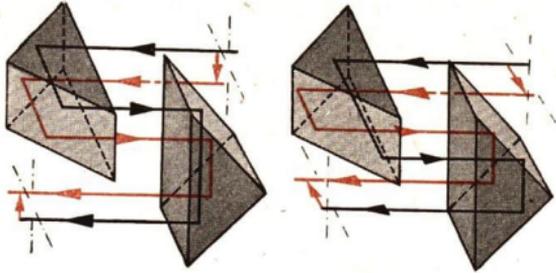
2 zur Richtungsänderung um 180°



### 3.3.2. Das totalreflektierende Prisma

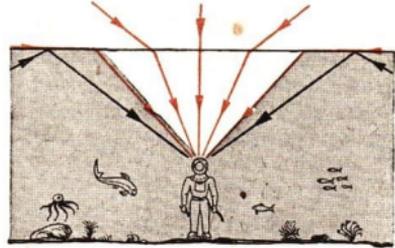
In verschiedenen optischen Geräten ist es erforderlich, die Richtung der Lichtstrahlen um 90° oder um 180° zu ändern. Dazu verwendet man meist *totalreflektierende*

187/1 Im Prismenfernrohr werden durch zwei total-reflektierende Prismen die Aufrichtung des Bildes und die Vertauschung der Seiten bewirkt



187/2 Totalreflektierendes Prisma in einem Spiegelteleskop.

Durch das Prisma wird die Richtung der Lichtstrahlen um  $90^\circ$  geändert und dadurch die Beobachtung des reellen Hohlspiegelbildes bei senkrechter Stellung des Fernrohres durch den seitlich angebrachten Tubus ermöglicht.



187/3 Ein Taucher sieht über sich an der Wasseroberfläche eine kreisrunde helle Fläche. Der übrige Teil der Oberfläche erscheint dunkel. Diese Erscheinung ist auf Totalreflexion zurückzuführen

**Prismen.** Das sind rechtwinklig-gleichschenklige Prismen aus Glas (Bild 186/1). Da die Lichtstrahlen beim Eintritt und Austritt senkrecht auf die Grenzflächen des Prismas auftreffen, tritt dort keine Brechung ein. Bei der Richtungsänderung um  $90^\circ$  tritt an der Hypotenusenfläche des Prismas bei der Änderung um  $180^\circ$  an beiden Kathetenflächen Totalreflexion ein.

### 3.4. Atmosphärische Strahlenbrechung und Luftspiegelung

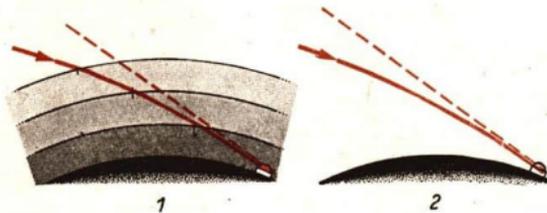
Brechung des Lichtes und Totalreflexion treten nicht nur an festen und flüssigen Körpern auf. Auch an den Grenzflächen zwischen Gasen mit verschiedenen optischen Dichten kann man diese Erscheinungen beobachten. So ist zum Beispiel warme Luft optisch dünner als kalte. Deshalb werden Lichtstrahlen, die in erwärmte Luftschichten gelangen, wie sie sich beispielsweise über Schornsteinen, über einer von der Sonne bestrahlten Fläche oder vor dem offenen Fenster eines warmen Zimmers im Winter bilden können, gebrochen und von ihrer Richtung abgelenkt. Da die aufsteigenden Luftströme fortlaufend ihre Lage und ihre Dichte ändern, ändert sich

auch dauernd der Brechungswinkel. Es bilden sich *Schlieren*; die hinter warmen Luftmassen liegenden Gegenstände erscheinen in zitternder Bewegung. Auch das Flimmern der Fixsterne beruht auf der durch die verschiedene Dichte der Luftschichten verursachten Brechung der Lichtstrahlen.

Die atmosphärische Strahlenbrechung und Luftspiegelungen sind auf Unterschiede in der optischen Dichte verschiedener Luftschichten zurückzuführen.

### 3.4.1. Die atmosphärische Strahlenbrechung

Ein Lichtstrahl, der von einem Himmelskörper ausgeht und schräg auf die Erdoberfläche trifft, muß auf weite Strecken die Atmosphäre durchdringen, bevor er zur Erde gelangt. Die Lufthülle der Erde ist jedoch nicht homogen. Ihre Dichte ist über der Erdoberfläche am größten und nimmt nach außen hin beständig ab. Damit ändert sich auch die optische Dichte. Man kann sich die Atmosphäre aus verschiedenen Luftschichten zusammengesetzt denken, an deren Grenzen die Lichtstrahlen jeweils zum Lot hin gebrochen werden (Bild 188/1.1).



188/1 Atmosphärische

Strahlenbrechung

1 schematisch, 2 tatsächlicher

Verlauf der Lichtstrahlen

In Wirklichkeit nimmt die Dichte der Luft mit zunehmender Höhe stetig ab. Daher ist der Lichtweg innerhalb der Atmosphäre eine schwach gekrümmte Linie (Bild 188/1.2). Der Himmelskörper erscheint aus diesem Grunde einem Beobachter höher über dem Horizont als er sich in Wirklichkeit befindet. So ist zum Beispiel die Sonne bereits unter den Horizont getaucht, wenn für uns ihr unterer Rand den Horizont zu berühren scheint. Diese Erscheinung nennt man *atmosphärische Strahlenbrechung*.

Schlierenbildung und atmosphärische Strahlenbrechung wirken sich bei astronomischen Beobachtungen und Messungen sehr störend aus. Um sie möglichst einzuschränken, baut man Sternwarten meist auf hohen Bergen.

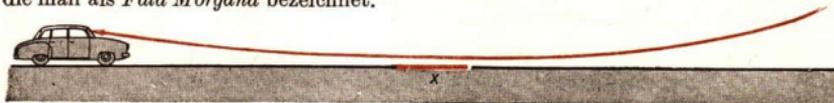
Man könnte die störenden Einflüsse der Atmosphäre gänzlich ausschalten, wenn man die Beobachtungen außerhalb der Lufthülle zum Beispiel von einem künstlichen Satelliten oder einem Weltraumschiff aus durchführen würde. Die Erfolge der Weltraumforschung berechtigen zu der Hoffnung, daß dies schon in naher Zukunft möglich sein wird.

### 3.4.2. Luftspiegelungen

Eine Erscheinung, die auf der totalen Reflexion beruht, kann man an heißen Tagen beobachten, wenn man im Kraftwagen auf einer ebenen Straße fährt. Durch

die an der Straßendecke auftretende Wärmeleitung werden die unmittelbar auf der Straße liegenden Luftschichten stark erwärmt und sind infolgedessen optisch dünner als die darüberliegenden Luftschichten. Das entgegengesetzt der Blickrichtung ganz flach einfallende Licht des blauen Himmels wird an den Grenzschichten zwischen optisch dichter und optisch dünnerer Luft vom Einfallslot weg gebrochen und bei genügend großem Einfallswinkel total reflektiert. Der ursprünglich schräg abwärts gerichtete Strahl wird nach der totalen Reflexion schräg aufwärts zurückgeworfen und gelangt dadurch in das Auge des Beobachters. Dieser glaubt, vor sich auf der Straße eine schimmernde Wasserfläche zu sehen, die beim Näherkommen immer weiter hinausrückt (Bild 189/1).

In ähnlicher Weise sind Luftspiegelungen an der Küste und in der Wüste zu erklären, die man als *Fata Morgana* bezeichnet.



189/1 Luftspiegelung auf der Landstraße. Der Fahrer sieht bei  $x$  eine scheinbare Wasserfläche

## Versuche, Fragen, Aufgaben

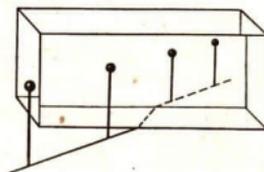
### 1. Strahlengang in einer planparallelen Platte – Bestimmung des Brechungsverhältnisses

Auf ein Reißbrett, das mit einem Zeichenblatt belegt ist, wird ein Glasquader gelegt und sein Umriß mit Bleistiftstrichen markiert. Nun stellt man durch Einstecken zweier Stecknadeln eine Visierlinie her, die schräg auf die Vorderfläche des Glasquaders zuläuft (Bild 189/2). Visieren Sie nun durch den Glaskörper hindurch und stecken Sie auch hinter ihm zwei Nadeln so ein, daß sie auf der Visierlinie liegen! Entfernen Sie den Glasquader und zeichnen Sie den durch die Stecknadeln markierten Lichtweg ein!

1.1. Was zeigt der Versuch?

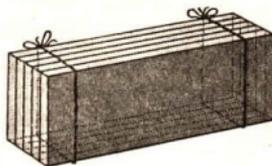
1.2. Wiederholen Sie den Versuch mit einem anderen Einfallswinkel!

1.3. Zeichnen Sie für jede Lichtbrechung das Einfallslot ein, messen Sie mit Hilfe eines Winkelmessers Einfallswinkel und Brechungswinkel, und berechnen Sie das Brechungsverhältnis für den Übergang des Lichtes von Luft nach Glas und von Glas nach Luft!



189/2 Versuch zum Strahlengang in einer planparallelen Platte

189/3 Statt eines Glasquaders kann auch ein Paket Glasplatten (Objektträger) benutzt werden, die man mit zwei Fäden zusammenbindet

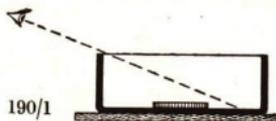


### 2. Strahlengang in einem Glasprisma

Wiederholen Sie den eben beschriebenen Versuch und ersetzen Sie dabei den Quader durch ein Prisma aus Glas!

Was können Sie aus der Aufzeichnung des Strahlenganges erkennen?

3. Legen Sie eine Münze auf den Boden eines leeren Gefäßes und blicken Sie so über den Gefäßrand, daß die Münze durch ihn gerade noch verdeckt wird (Bild 190/1). Füllen Sie nun das Gefäß mit Wasser, ohne dabei die Stellung des Kopfes zu verändern!



Was beobachten Sie? Geben Sie eine Erklärung dafür!

4. Bestimmen Sie mit Hilfe der Tabelle über Lichtgeschwindigkeiten auf Seite 170 die Brechungs-zahlen für den Übergang des Lichtes von Luft in folgende Stoffe: Wasser, Alkohol, Benzol, Schwefelkohlenstoff!  
Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Tabelle auf Seite 183!
5. Bestimmen Sie durch Zeichnung den Verlauf eines Lichtstrahles durch ein Flintglasprisma ( $n = 1,7$ ;  $\gamma = 60^\circ$ ) für den Einfallswinkel  $\alpha = 60^\circ$ !  
Wie groß ist die Gesamtablenkung?
6. Ermitteln Sie zeichnerisch das Minimum der Ablenkung für ein Kronglasprisma ( $n = 1,5$ ), wenn der brechende Winkel  $\gamma = 45^\circ$  beträgt!  
Anleitung: Gehen Sie vom Strahlengang im Glas aus und konstruieren Sie den Verlauf des einfallenden Strahles und des Strahles, der das Prisma verläßt!
7. Berechnen Sie den Grenzwinkel für Totalreflexion für den Übergang des Lichtes von Wasser nach Luft!
8. Ermitteln Sie den Grenzwinkel für Totalreflexion für den Übergang des Lichtes von Wasser nach Luft zeichnerisch und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem der Aufgabe 7!
9. Blicken Sie durch eine Seitenwand schräg von unten gegen die Wasseroberfläche in einem Aquarium!  
Was beobachten Sie? Erklären Sie, wie diese Erscheinung zustande kommt!
10. Stellen Sie ein Reagenzglas, in dem sich ein Metallstückchen (Schraube oder Nagel) befindet, in ein Gefäß mit Wasser und betrachten Sie es schräg von oben!  
Warum erscheint der im Wasser befindliche Teil spiegelnd, wie mit Quecksilber gefüllt?  
Was beobachten Sie, wenn Sie auch das Reagenzglas mit Wasser füllen?

## Zusammenfassung

- Bei der Brechung des Lichtes steht der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem konstanten Zahlenverhältnis.  
Wie lautet das Brechungsgesetz für die Brechung von Wellen?
- Beim Durchgang durch ein optisches Prisma wird das Licht aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt.  
Nach welcher Richtung wird das Licht abgelenkt? Wovon ist die Größe der Gesamt-ablenkung abhängig?
- Wird beim Übergang des Lichtes vom optisch dichteren in ein optisch dünneres Mittel der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel, dann tritt Totalreflexion ein.  
Wie groß ist der Grenzwinkel für den Übergang des Lichtes von Glas nach Luft?

## 4. Linsen und Linsenbilder

191/1

In den Fotozirkeln an unseren Schulen lernen die Schüler die Handhabung der Kamera kennen. Was auf frohen Wanderungen durch die schöne Heimat, beim Sportfest oder im Experimentierraum im Bild oder auf dem Filmstreifen festgehalten wurde, das findet an der Wandzeitung, in der Schulchronik oder im Laborprotokoll seine sichtbare Verwendung. Zu den wichtigsten Teilen der Kamera gehört das Objektiv, das meist aus einer Kombination mehrerer Linsen besteht.



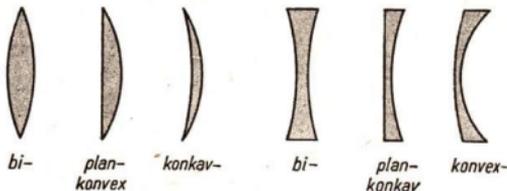
### 4.1. Bildentstehung an Linsen

Es gibt verschiedene Linsenformen, die nach der Art der Oberfläche benannt werden (Bild 191/1).

#### 191/1 Linsenformen

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Gruppen von Linsen:

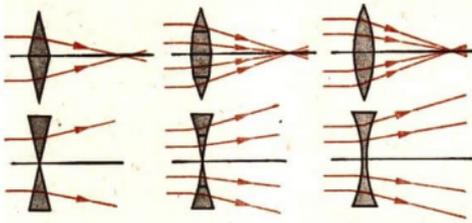
1. die *Konvexlinsen*. Sie sind in der Mitte dicker als an den Rändern
2. die *Konkavlinsen*. Sie sind in der Mitte dünner als an den Rändern



In Kameras, in Projektionsapparaten, in Fernrohren, bei Lupen und in vielen anderen optischen Geräten erzeugen die Linsen *reelle* oder *virtuelle* Bilder. Die physikalischen Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten, die dabei eine Rolle spielen, sollen im folgenden Abschnitt behandelt werden.

#### 4.1.1. Strahlenverlauf beim Durchgang durch Linsen

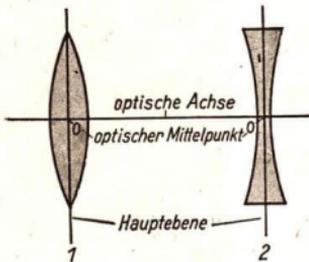
Beim Fotografieren läßt man alle von den einzelnen Bildpunkten ausgehenden Lichtstrahlen durch die Linse auf den Film treffen. Die Linse kann man sich in so viele Prismen zerlegt denken, wie Lichtstrahlen durch sie hindurchgehen (Bild 192/1).



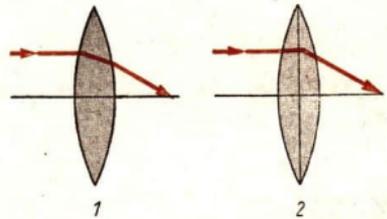
Entsprechend dem Brechungsgesetz ergibt sich das **Linsengesetz**:

**Konvexlinsen<sup>1</sup> sammeln Parallelstrahlen im Brennpunkt. Konkavlinen<sup>2</sup> zerstreuen Parallelstrahlen so, als ob sie von einem Punkt ausgingen.**

Optische Linsen sind im allgemeinen sphärisch geschliffen, sie werden also durch Ausschnitte von Kugelflächen begrenzt. Die Gerade, die durch die Mittelpunkte der begrenzenden Kugelflächen hindurchgeht, heißt *optische Achse* (Bild 192/2). Eine Ebene, die man sich durch die Mitte dünner Linsen senkrecht zur optischen Achse



192/2 Sphärische Linsen  
1 Konvexlinsen, 2 Konkavlinen



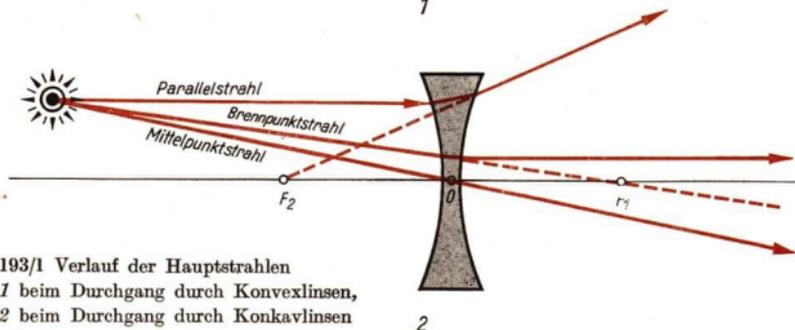
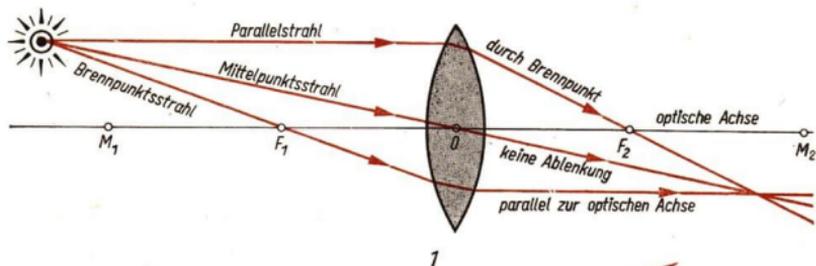
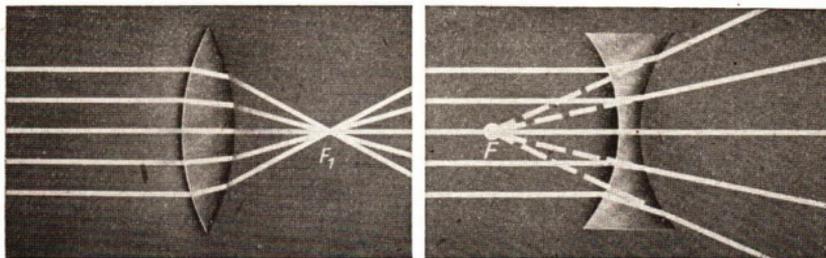
192/3 Strahlenverlauf beim Durchgang des Lichtes durch eine Konvexlinse  
1 tatsächlicher Verlauf, 2 vereinfachte Darstellung in Konstruktionen

gelegt denken kann, wird als *Hauptebene* bezeichnet. Der Schnittpunkt der Hauptebene mit der optischen Achse wird *optischer Mittelpunkt O* genannt.

Im folgenden werden nur dünne Linsen behandelt. Darunter versteht man solche, deren Dicke gegenüber ihrem Durchmesser gering ist. (Dicke Linsen haben zwei Hauptebenen. Die Konstruktion des Strahlenverlaufs ist bei ihnen komplizierter.) Abweichend vom wirklichen Strahlenverlauf (Bild 192/3.1) wird bei zeichnerischen Darstellungen zur Vereinfachung nur eine einmalige Richtungsänderung an der Hauptebene der Linse gezeichnet (Bild 192/3.2). Wie beim Hohlspiegel verwendet

<sup>1</sup> konvex (lat.): nach außen gewölbt

<sup>2</sup> konkav (lat.): nach innen gewölbt



193/1 Verlauf der Hauptstrahlen  
 1 beim Durchgang durch Konvexlinsen,  
 2 beim Durchgang durch Konkavlinsen

man auch hier von den vielen möglichen Strahlen zur Konstruktion des Strahlenverlaufs nur *Hauptstrahlen* (Bild 193/1). Dazu zählen:

1. die *Parallelstrahlen*. Sie treffen parallel zur optischen Achse auf die Linse.
2. die *Brennpunktstrahlen*. Sie gehen vor ihrem Auftreffen auf die Linse durch einen der Brennpunkte,
3. die *Mittelpunktstrahlen*. Sie gehen durch den optischen Mittelpunkt der Linse.

Versuche zeigen:

**Parallelstrahlen werden durch den Brennpunkt gebrochen.**

**Brennpunktstrahlen werden parallel zur optischen Achse gebrochen.**

**Mittelpunktstrahlen gehen ungebrochen durch den optischen Mittelpunkt der Linse.**

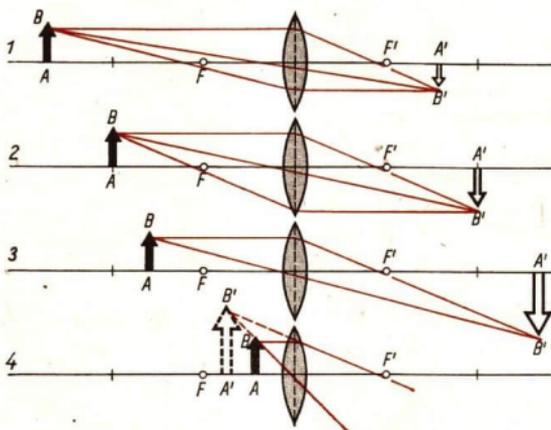
Jede Linse hat zwei Brennpunkte,  $F_1$  und  $F_2$  (Brennpunkt lat. Fokus). Bei Konkavlinen ist die Rolle der beiden Brennpunkte für die Konstruktion des Strahlenverlaufs vertauscht (Bild 193/1.2). Der Abstand des Brennpunktes vom optischen Mittelpunkt heißt *Brennweite*.

Im Gegensatz zu den sphärischen Spiegeln ist der Krümmungsradius bei Linsen nicht gleich der doppelten Brennweite. Die Brennweite einer Linse hängt von der Brechkraft des Glases und von den Radien beider Begrenzungsflächen ab. Bei einer symmetrischen Bikonvexlinse aus Glas mit der Brechzahl  $n = 1,5$  sind beispielsweise die Brennweiten gleich den Krümmungsradien, das heißt, die Brennpunkte liegen in den Krümmungsmittelpunkten.

#### 4.1.2. Das reelle Bild

Wie aus dem Bild 193/1 zu ersehen ist, treffen sich bei einer Konvexlinse alle Hauptstrahlen, die von einem Gegenstandspunkt ausgehen, nach der Brechung wieder in einem Punkt. Das gilt auch für alle beliebigen nicht gezeichneten Strahlen. So ist jedem Gegenstandspunkt hinter der Linse ein Bildpunkt zugeordnet, es entsteht ein *reelles Bild des Gegenstandes*.

Den Strahlenverlauf durch Linsen oder Linsensysteme konstruiert man ähnlich dem Strahlenverlauf an einem Hohlspiegel (vgl. S. 175!). Das Bild 194/1 gibt die wichtigsten Fälle der Bildkonstruktion an Konvexlinsen wieder. Die reellen Bilder liegen im Gegensatz zu denen beim Hohlspiegel nicht auf derselben Seite wie der Gegenstand (Bilder 194/1.1 bis 194/1.3). Steht der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite, dann treffen die gebrochenen Strahlen hinter der Linse nicht mehr aufeinander; es entsteht kein reelles Bild des Gegenstandes (Bild 194/1.4).



1 Der Gegenstand befindet sich außerhalb der doppelten Brennweite

2 der Gegenstand befindet sich in der doppelten Brennweite

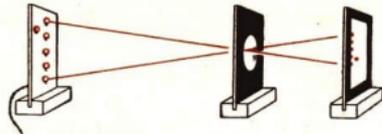
3 der Gegenstand befindet sich zwischen der doppelten und der einfachen Brennweite

4 der Gegenstand befindet sich innerhalb der einfachen Brennweite

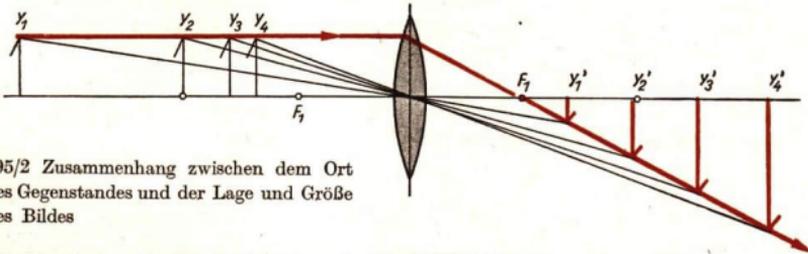
194/1 Die Bildentstehung an einer Konvexlinse bei verschiedenen Gegenstandsweiten

Die Ergebnisse der Bildkonstruktionen sollen in einem Versuch überprüft werden:

Als Gegenstand wird eine „1“ verwendet, die von sechs Glühlämpchen gebildet wird. Er wird mit Hilfe einer Sammellinse auf einem Bildschirm abgebildet.



195/1 Versuchsanordnung zur Erzeugung reeller Linsenbilder



195/2 Zusammenhang zwischen dem Ort des Gegenstandes und der Lage und Größe des Bildes

Die Ergebnisse der Beobachtungen sind im Bild 195/2 zusammengefaßt. Der Versuch läßt folgende Zusammenhänge erkennen:

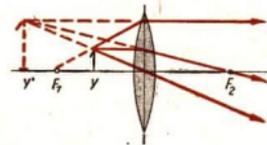
Steht ein Gegenstand außerhalb der Brennweite vor einer Konvexlinse, so entsteht hinter ihr ein reelles Bild des Gegenstandes. Es ist umgekehrt und seitenvertauscht. Je näher der Gegenstand der Linse rückt, desto weiter entfernt sich das Bild von ihr, und um so größer ist es.

#### 4.1.3. Das virtuelle Bild

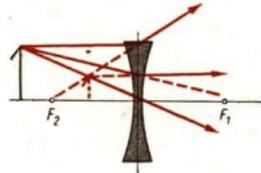
Steht der Gegenstand innerhalb der Brennweite der Konvexlinse, dann verlaufen die gebrochenen Strahlen hinter der Linse divergent. Sie schneiden sich nur in ihrer rückwärtigen Verlängerung vor der Linse (Bild 195/3). Wenn man durch die Linse blickt, sieht man statt des Gegenstandes ein vergrößertes, aufrechtes, *virtuelles* Bild.

- Warum kann man das virtuelle Bild nicht auf einem Bildschirm auffangen?

Steht der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite einer Konvexlinse, dann entsteht ein virtuelles, aufrechtes, vergrößertes Bild auf der Seite des Gegenstandes.



195/3 Das virtuelle Bild einer Konvexlinse



195/4 Das virtuelle Bild einer Konkavlinse

Bei einer Konkavlinse verlaufen alle Strahlen, die von einem Gegenstandspunkt kommen, nach der Brechung divergent. Hierbei ist es gleichgültig, in welcher Entfernung sich der Gegenstand vor der Linse befindet. Deshalb entstehen an der Konkavlinse nur virtuelle Bilder (Bild 195/4). Sie sind aufrecht und verkleinert.

## 4.2. Die Abbildungsgleichung für Linsen

### 4.2.1. Herleitung der Abbildungsgleichung

Das Bild 196/1 zeigt schematisch den Verlauf des Mittelpunktstrahles und des Parallelstrahles bei der Bildentstehung an einer Konvexlinse. Der Abstand des Gegenstandes von dem optischen Mittelpunkt der Linse, die *Gegenstandsweite*, bezeichnet man mit  $s$ , die Entfernung des Bildes von der Linse, die *Bildweite*, mit  $s'$  und den Abstand des Brennpunktes von der Linse, die *Brennweite*, mit  $f$ . Die *Gegenstandsgröße* ist  $y$ , die *Bildgröße*  $y'$  (vgl. S. 177).

Den Mittelpunktstrahl und die optische Achse kann man geometrisch als zwei Strahlen auffassen, die von zwei Parallelen, dem Gegenstand und dem Bild, geschnitten werden (Bild 196/1.1). Daher gilt die Proportion:

$$y : y' = s : s'.$$

Die Gegenstandsgröße verhält sich zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

Da man auch den aus der Linse austretenden Brennpunktstrahl sowie die optische Achse geometrisch als Strahlen auffassen kann, die von zwei Parallelen geschnitten werden (Bild 196/1.2), gilt auch die Proportion

$$y : y' = f : (s' - f).$$

Aus beiden Gleichungen folgt:

$$s : s' = f : (s' - f)$$

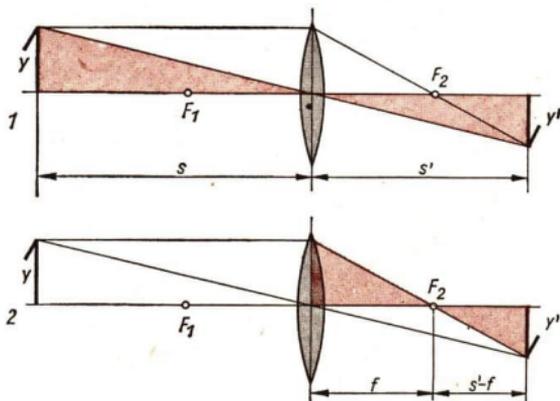
oder

$$s \cdot (s' - f) = s' \cdot f,$$

$$ss' - sf = s'f,$$

$$s'f + sf = ss'.$$

196/1 Skizze zur Herleitung der Abbildungsgleichung  
1 Beziehung zwischen Gegenstandsgröße und Bildgröße  
2 Beziehungen zur Herleitung der Abbildungsgleichung



Dividiert man beide Seiten der Gleichung durch  $s \cdot s' \cdot f$ , so erhält man die *Abbildungsgleichung für Linsen* oder kurz *Linsengleichung*:

$$\boxed{\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}} \quad (28)$$

Die Summe der Kehrwerte von Gegenstandsweite und Bildweite ist gleich dem Kehrwert der Brennweite.

Weil diese Gleichung nur Kehrwerte oder reziproke Werte enthält, nennt man sie auch „Reziprokgleichung“.

### Beispiel

Durch eine Sammellinse wird von einem 80 cm von der Mittelebene der Linse entfernten Gegenstand auf einem 20 cm hinter der Linse stehenden Schirm ein Bild erzeugt.

Gegeben:

Gegenstandsweite  $s = 80$  cm

Bildweite  $s' = 20$  cm

Gesucht:

Brennweite  $f$  (in cm)

Die Brennweite der Linse beträgt 16 cm.

Lösung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{80 \text{ cm}} + \frac{1}{20 \text{ cm}} = \frac{1}{80 \text{ cm}} + \frac{4}{80 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{16 \text{ cm}}$$

$$\underline{\underline{f = 16 \text{ cm}}}$$

Andere Formen der Abbildungsgleichung für Linsen sind:

$$f = \frac{s \cdot s'}{s + s'};$$

$$s = \frac{s' \cdot f}{s' - f} \quad \text{und}$$

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f}.$$

- Leiten Sie die vorstehenden Gleichungen aus der Normalform selbst her!

Die Abbildungsgleichung für Linsen gilt für Konvex- und Konkavlinen und für reelle und virtuelle Bilder. Für die Bildweite virtueller Bilder und für die Brennweite von Zerstreuungslinsen müssen negative Werte eingesetzt werden.

- Vergleichen Sie die Abbildungsgleichung für Linsen mit der für Hohlspiegel!

Die Linsengleichung ist nicht uneingeschränkt anwendbar. Sie gilt nur für dünne Linsen mit relativ großer Brennweite bei achsennahen Strahlen einfarbigen Lichtes. In allen anderen Fällen entstehen in den Bildern Unschärfen und Abweichungen, die als Linsenfehler bezeichnet werden.

Die Berücksichtigung all der Fehlerfaktoren erfordert umfangreiche Berechnungen bei der Entwicklung von Linsenkombinationen, die heute auch mit Hilfe von elektronischen Rechenmaschinen durchgeführt werden.

Die Zusammenhänge zwischen der Gegenstandsweite und der Bildweite sowie zwischen der Gegenstandsgröße und der Bildgröße sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabell 5: Bildentstehung an einer Konvexlinse

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite $s > 2f$	auf der anderen Seite der Linse zwischen einfacher und doppelter Brennweite $f < s' < 2f$	reell	umgekehrt	verkleinert $y' < y$
in der doppelten Brennweite $s = 2f$	auf der anderen Seite der Linse ebenfalls in der doppelten Brennweite $s' = 2f$	reell	umgekehrt	ebensgroß wie der Gegenstand $y' = y$
zwischen der doppelten und einfachen Brennweite $2f > s > f$	auf der anderen Seite der Linse außerhalb der doppelten Brennweite $s' > 2f$	reell	umgekehrt	vergrößert $y' > y$
innerhalb der einfachen Brennweite $s < f$	auf derselben Seite der Linse $s' > s$	virtuell	aufrecht	vergrößert $y' > y$

#### 4.2.2. Bestimmung der Brennweite von Konvexlinsen

Zur Bestimmung der Brennweite einer Konvexlinse kann man die Linsengleichung

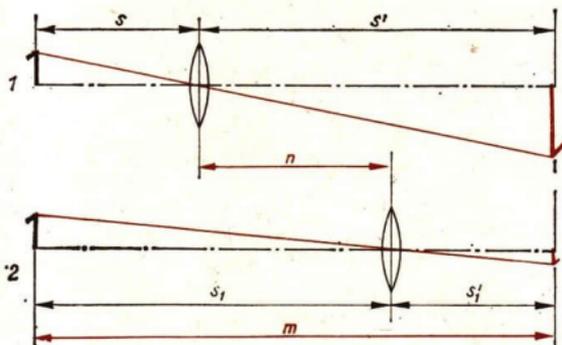
$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$  verwenden, wenn man sie nach  $f$  auflöst:

$$f = \frac{s \cdot s'}{s + s'}$$

Genauere Meßergebnisse liefert das Besselsche Verfahren:

Ist die Entfernung des Bildschirmes vom Gegenstand größer als die vierfache Brennweite, so sind für die Bilderzeugung zwei Möglichkeiten gegeben (Bild 199/1). Steht die Linse dichter am Gegenstand, erhält man ein vergrößertes Bild (Bild 199/1.1). Ist die Gegenstandsweite  $s$  größer als die Bildweite  $s'$ , entsteht ein verkleinertes Bild (Bild 199/1.2).

199/1 Brennweitenbestimmung einer Konvexlinse nach Bessel



Aus der Umkehrbarkeit des Lichtweges ergibt sich die Gleichheit der Gegenstandsweite  $s$  der ersten Linsenstellung und der Bildweite  $s'_1$  der zweiten Stellung der Linse:

$$s = s'_1.$$

Somit ist der Abstand der beiden Linsenstellungen

$$s' - s = n,$$

während für den Abstand des Bildschirmes vom Gegenstand die Gleichung

$$s' + s = m$$

gilt. Durch Addition der beiden Gleichungen erhält man

$$2s' = m + n \quad \text{bzw.} \quad s' = \frac{m + n}{2}.$$

Durch Subtraktion der ersten Gleichung von der zweiten ergibt sich

$$s = \frac{m - n}{2}.$$

Setzt man diese Werte in die Linsengleichung

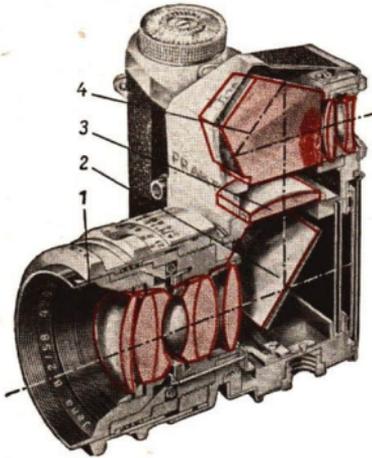
$$\begin{aligned} f &= \frac{s \cdot s'}{s + s'} \quad \text{ein,} \\ f &= \frac{\frac{m - n}{2} \cdot \frac{m + n}{2}}{\frac{m - n}{2} + \frac{m + n}{2}}, \\ f &= \frac{m^2 - n^2}{4m}, \end{aligned}$$

so erhält man für die Brennweite  $f$  die Bestimmungsgleichung

$$f = \frac{m^2 - n^2}{4m} \quad (29)$$

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß sich die Verschiebung der Linsen sehr genau messen läßt.

### 4.3. Der Fotoapparat

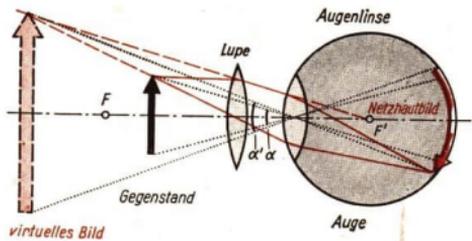


200/1 Schnittbild einer Spiegelreflexkamera  
1 Objektiv, 2 Spiegel, 3 Mattscheibe, 4 Dachkantprisma

des Objektivs erhält man ein Mattscheibenbild von der gleichen Schärfe wie das auf dem Film entstehende Bild. Betätigt man den Auslöseknopf des Verschlusses, so wird durch eine Feder zunächst der Spiegel gegen die Mattscheibe geklappt und dadurch das Gehäuse der Kamera lichtdicht abgeschlossen. Dann öffnet sich der Verschluss, so daß die Lichtstrahlen auf den Film fallen. Es entsteht auf ihm ein scharfes Bild.

### 4.4. Die Lupe

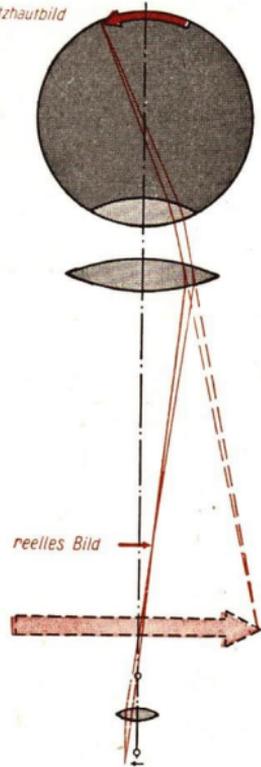
Wenn man Einzelheiten eines Gegenstandes genau erkennen will, bringt man ihn möglichst nahe an das Auge heran. Hierdurch werden der Sehwinkel und damit das Netzhautbild größer. Reicht diese Vergrößerung des Sehwinkels nicht aus, so benutzt man eine Konvexlinse als Lupe. Man hält sie so zwischen den Gegenstand und das Auge,



200/2 Veranschaulichung der Lupenwirkung. Die Lupe bildet den innerhalb ihrer Brennweite befindlichen kleinen Gegenstand virtuell, vergrößert und aufrecht im Nahpunkt ab. Der Sehwinkel  $\alpha$  wird auf den Winkel  $\alpha'$  vergrößert.

daß sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite der Lupe befindet. Auf diese Weise erhält man ein virtuelles, aufrechtes, vergrößertes Bild des Gegenstandes. Bild 200/2 zeigt schematisch den Strahlengang an einer Lupe.

Netzhautbild



#### 4.5. Das Mikroskop

Ist die Vergrößerung einer Lupe nicht ausreichend, so betrachtet man den Gegenstand durch ein *Mikroskop*. Das optische System des Mikroskops besteht aus einem *Objektiv*<sup>1</sup> und einem *Okular*<sup>2</sup>. Das Objektiv ist ein Linsensystem mit kleiner Brennweite, das als Sammellinse wirkt und ein reelles, vergrößertes Bild des Gegenstandes erzeugt (Bild 201/1). Dieses Bild entsteht innerhalb der einfachen Brennweite des Okulars, das als Lupe wirkt. Das Auge sieht ein stark vergrößertes, virtuelles Bild des Gegenstandes. Infolge der kurzen Brennweite des Objektivs muß das Objekt sehr nahe an das Objektiv herangebracht werden. Dadurch wird gleichzeitig erreicht, daß ein großer Teil des vom Objekt ausgehenden Lichtes in das Objektiv gelangt und ein helles Bild entsteht.

Beim Mikroskop sind das Objektiv und das Okular fest in einem Tubus<sup>3</sup> vereinigt. Dies hat zur Folge, daß das reelle Bild des Objektes immer an derselben Stelle entsteht. Durch diese Anordnung wird erreicht, daß die Vergrößerung immer unverändert bleibt. Die Scharfeinstellung des Bildes wird dadurch vorgenommen, daß der ganze Tubus verschoben wird. Der Tubus ist zu diesem Zwecke mit einem Schraubentrieb ausgestattet, der mit einer Feineinstellung versehen ist. Auf diese Weise wird die zur konstanten Bildweite gehörige Gegenstandsweite eingestellt.

201/1 Veranschaulichung des Strahlenganges im Mikroskop (schematisch). Das Bild ist nicht maßgetreu gezeichnet

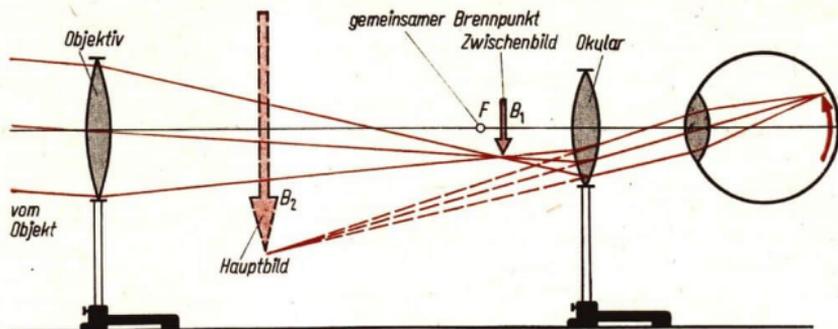
#### 4.6. Das Keplersche Fernrohr

Der optische Teil der Fernrohre besteht wie bei den Mikroskopen aus einem Objektiv und einem Okular. Das Objektiv ist ein Linsensystem, das als Sammellinse mit großer Brennweite wirkt. Es entwirft ein reelles, umgekehrtes und verkleinertes

<sup>1</sup> Objektiv: dem Bildgegenstand zugewandte Linse optischer Geräte

<sup>2</sup> Okular: dem Auge (lat. okulus) zugewandte Linse optischer Geräte

<sup>3</sup> Tubus (lat.): Rohr



202/1 Strahlengang in einem Keplerschen Fernrohr  
 $F$  gemeinsamer Brennpunkt des Objektivs und des Okulars,  $B_1$  reelles Zwischenbild,  $B_2$  virtuelles Bild

Bild dicht hinter dem Objektivbrennpunkt. Man betrachtet dieses Bild durch das Okular, eine als Lupe wirkende Konvexlinse. Das Auge sieht vom Gegenstand ein umgekehrtes, vergrößertes virtuelles Bild unter großem Sehwinkel (Bild 202/1). Objektiv und Okular sind miteinander durch einen Tubus verbunden. Sie liegen so zueinander, daß der Brennpunkt des Objektivs fast mit dem Brennpunkt des Okulars zusammenfällt.

Bei Fernrohren der beschriebenen Art entstehen umgekehrte und seitenvertauschte Bilder. Man gebraucht sie aus diesem Grunde ausschließlich für astronomische Beobachtungen und bei wissenschaftlichen Messungen, da bei diesen Verwendungszwecken die Bildumkehr nicht von Bedeutung ist. Die Konstruktion derartiger Fernrohre wurde im Jahre 1611 von dem deutschen Astronomen JOHANNES KEPLER angegeben. Man nennt sie infolgedessen astronomische oder Keplersche Fernrohre. Das Fernrohr hat ein großes Gesichtsfeld und rückt das Objekt dem Beobachter scheinbar näher. Die Entfernung der Fixsterne von der Erde ist aber so groß, daß auch bei den stärksten Fernrohren der Sehwinkel unter  $1'$  bleibt. Man sieht infolgedessen auch im Fernrohr die Fixsterne nur als Lichtpunkte. Einzelheiten sind nicht zu erkennen. Man erreicht durch das Fernrohr nur eine Verstärkung der Bildhelligkeit. Aus diesem Grunde sieht man bei der Beobachtung mit dem Fernrohr noch Sterne, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Mit Hilfe des Fernrohres wird außerdem der Sehwinkel, unter dem man zwei Sterne sieht, vergrößert, so daß die Sternabstände scheinbar größer werden.

#### 4.7. Die optische Industrie der Deutschen Demokratischen Republik

Mit der Verfeinerung der wissenschaftlichen Forschungsmethoden und der technologischen Prozesse, die sich mit dem Ende des Mittelalters in Europa immer mehr ausbildete, erhielt ein bis dahin nicht besonders beachtetes Handwerk große Bedeutung. Der holländische Glasschleifer JANSEN erfand um 1590 das Mikroskop, und sein Landsmann LIPPERSHEY gilt als der Erfinder des Fernrohres.

Die Herstellung optischer Geräte in Handwerksbetrieben wurde vor etwa 100 Jahren durch die Bildung von Industriebetrieben abgelöst. In Deutschland gründeten um 1870 der Physiker ERNST ABBE, der Universitätsmechaniker CARL ZEISS und der Glastechniker OTTO SCHOTT einen Betrieb zur Herstellung optischer Geräte.

Vorher wurden optische Geräte auf rein handwerklicher Grundlage hergestellt. Dabei hing die Qualität der Erzeugnisse im wesentlichen von der Geschicklichkeit des Meisters ab, wie es ihm gelang, die Linsen zu schleifen und zusammenzufügen.

In den Zeiß-Werkstätten wurden die optischen Geräte von Anfang an in Serien hergestellt. Zufälligkeiten, die sich qualitätsmindernd auswirken konnten, wurden dadurch ausgeschaltet, daß vor der Herstellung der Geräte die optischen Systeme mit wissenschaftlichen Hilfsmitteln untersucht und berechnet wurden. Diese Berechnungsmethoden wurden von dem Physiker ABBE mehrfach verfeinert. Sie dienten als Grundlage bei der Entwicklung neuer Linsensysteme.

Durch diese wissenschaftlichen Arbeitsmethoden konnten die Herstellungskosten für optische Geräte in den Zeiß-Werken immer niedriger gehalten werden als in den handwerklichen Fertigungsstätten, wobei eine gleichmäßig hohe Qualität der Erzeugnisse erreicht werden konnte.

Im Jahre 1947 begannen die Arbeiter und die Wissenschaftler der Zeiß-Werke in Jena mit dem Neuaufbau ihres Betriebes. Zum erstenmal in der Geschichte des Werkes bestimmten die Arbeiter über die Leitung und Entwicklung des Betriebes selbst. Trotz aller Störversuche des kapitalistischen Auslands und Westdeutschlands arbeiten im VEB Carl Zeiss Jena und seinen Fertigungsstätten in Saalfeld, Eisfeld und Dresden-Reick heute über 18500 Betriebsangehörige. Er ist damit der größte feinmechanisch-optische Betrieb der Welt (siehe S.163). Das hochwertige Glasmaterial liefert der VEB Jenaer Glaswerk Schott und Genossen.

\*

Ganz besondere Bedeutung hat im VEB Carl Zeiss Jena in den vergangenen Jahren die Produktion von Geräten der Feinmeß-, Rechen-, Steuerungs- und Regelungstechnik gewonnen. Ein großer Teil dieser Erzeugnisse wird in die befreundeten sozialistischen Länder exportiert.

Ein für unsere Produktion besonders wichtiger Zweig ist die Herstellung von optisch-mechanischen Feinmeßgeräten. Der allgemeine Maschinenbau, der Fahrzeugbau, der Werkzeugmaschinenbau und die Feinmechanik benötigen diese Geräte, um die Güte ihrer Erzeugnisse (Zahnräder, Paßteile, Gewinde, Führungen usw.) ständig prüfen und verbessern zu können.

Höchste Präzision und peinlichste Sauberkeit der Ausführung sowie die wissenschaftliche Grundlage der Geräte machen die Zeiß-Erzeugnisse aus Jena zu einem Weltbegriff. Das beweisen die Exportverbindungen zu mehr als 80 Ländern. Die hervorragende Qualität der über 3000 verschiedenen Erzeugnisse des VEB Carl Zeiss Jena beruht vor allem auf der guten Zusammenarbeit von Arbeitern, Technikern, Ingenieuren, Wissenschaftlern und Kaufleuten.

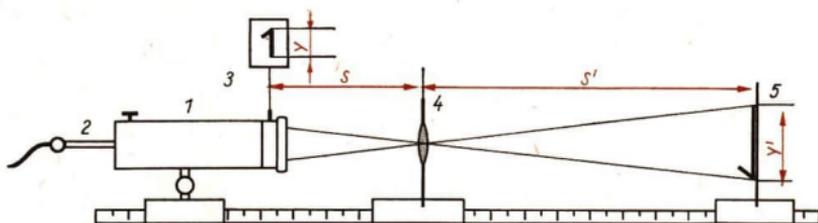
Andere bedeutende Produktionsstätten der optischen Industrie unserer Republik sind der VEB Rathenower Optische Werke (ROW) und der VEB Feinoptisches

Werk Görlitz. Die Kameraindustrie ist vor allem in Dresden konzentriert. Im Jahre 1959 wurden die volkseigenen Betriebe Kamera-Werke Niedersiedlitz, Kino-Werk Dresden, Altissa-Camera-Werk Dresden, Aspecta-Dresden und Welta-Kamera-Werke Freital zu den volkseigenen Kamera- und Kinowerken Dresden zusammengeschlossen. Die Produktion konnte wesentlich verbessert werden, da sich die einzelnen Werke spezialisierten. Auch diese optischen Betriebe liefern Photoapparate und andere Geräte in viele Länder Europas, Asiens, Afrikas und Amerikas. Wir können dafür wertvolle Rohstoffe importieren. Für eine einzige nur wenige hundert Gramm wiegende Kamera vom Typ „Exakta Varex“ erhalten wir zum Beispiel 118 kg Baumwolle für unsere Textilindustrie. Aus dieser Baumwolle kann man 590 m<sup>2</sup> Baumwollstoff weben, der zur Anfertigung von 260 Kleidern reicht. Da wir für unsere gesamte Wirtschaft viele Rohstoffe einführen müssen, ist der Export hochwertiger optischer Geräte von großer Bedeutung. Infolgedessen werden von unseren Werkträgern große Anstrengungen unternommen, um auch die Produktion optischer Geräte weiter zu steigern.

### Versuche, Fragen, Aufgaben

#### 1. Bestimmung der Brennweite einer Sammellinse mit Hilfe der Abbildungsgleichung

Die Versuchsanordnung ist aus dem Bild 204/1 zu ersehen. Stellen Sie die Lampe mit Hilfe des Haltestabes, der aus dem Gehäuse herausragt, so ein, daß der Konvergenzpunkt des Strahlenbündels etwa auf die Linsenmitte fällt, und setzen Sie in die Lampe die Blende mit „1“ ein! Verschieben Sie den Bildschirm so, daß das Bild scharf erscheint!



204/1 Versuchsanordnung zum Bestimmen der Brennweite einer Konvexlinse  
1 Lampengehäuse, 2 Haltestab der Lampe, 3 Blende mit „1“, 4 Linse, 5 Bildschirm

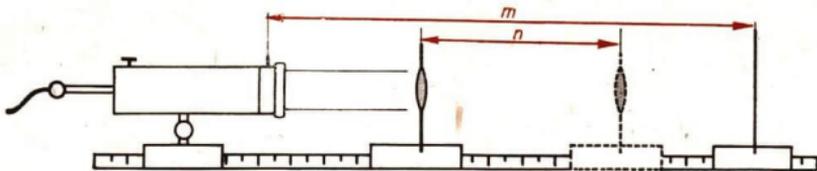
Bestimmen Sie nun die Gegenstandsweite  $s$  und die Bildweite  $s'$  und berechnen Sie die Brennweite der Linse! Überprüfen Sie auch die Richtigkeit der Gleichung

$$y : y' = s : s', \quad s' = \frac{s \cdot y'}{y} !$$

Führen Sie zwei weitere Messungen durch, nachdem Sie jeweils die Gegenstandsweite verändert haben, und berechnen Sie die Brennweite aus dem Mittelwert der drei Meßwerte!

#### 2. Bestimmung der Brennweite einer Sammellinse nach dem Besselschen Verfahren

In der Versuchsanordnung nach Bild 205/1 wird die Lampe so eingestellt, daß ein etwa paralleles Strahlenbündel entsteht. Setzen Sie die Blende mit „1“ ein! Stellen Sie die Linse und



205/1 Versuchsanordnung zum Bestimmen der Brennweite einer Konvexlinse nach dem Besselschen Verfahren

den Bildschirm so auf, daß ein scharf gezeichnetes, vergrößertes Bild der „1“ entsteht und notieren Sie die Stellung der Linse! Nähern Sie sie nun allmählich dem Bildschirm, bis auf ihm ein verkleinertes Bild entsteht! Der Abstand von der Lampe zum Bildschirm darf dabei nicht verändert werden.

Ermitteln Sie nach dem auf Seite 198 beschriebenen Verfahren die Brennweite der Linse. Der Abstand  $n$  der beiden Linsestellungen kann an einer Kante des Fußklotzes der Linse abgelesen werden!

Führen Sie zwei weitere Messungen durch, nachdem Sie jeweils den Abstand  $m$  zwischen Gegenstand und Bild verändert haben, und berechnen Sie den Mittelwert der Brennweite  $f$ !

3. Welche Folgerung kann man aus der Linsengleichung hinsichtlich Ort und Art des Bildes ziehen?

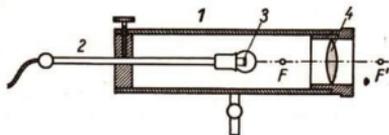
Untersuchen Sie die Gleichungen

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad \text{und setzen Sie für } s = 2f; s > f; s = f; s < f!$$

4. Errechnen Sie die Brennweite einer Konvexlinse aus der Gegenstandsweite  $s = 50$  cm und der zugehörigen Bildweite  $s' = 150$  cm!
5. Ein Gegenstand soll durch eine Konvexlinse von 50 cm Brennweite in doppelter Größe abgebildet werden. In welcher Entfernung von der Linse muß er aufgestellt werden? In welcher Entfernung muß der Bildschirm stehen?  
Prüfen Sie das Ergebnis durch Zeichnung im Maßstab 1 : 10!
6. Erklären Sie die Wirkungsweise der Kondensorlinse in der Lichtwurfleuchte des Schülerübungsgerätes (Bild 205/2). Bei welchen Stellungen des Glühfadens in der Lampe erhält man
- 6.1. ein divergentes,
  - 6.2. ein paralleles,
  - 6.3. ein konvergentes Lichtstrahlenbündel?

205/2 Lichtwurfleuchte

1 Gehäuse, 2 Haltestab der Lampe, 3 Punktlicht-Lampe, 4 Kondensator



7. Bei der Bestimmung der Brennweite einer Konvexlinse nach dem Besselschen Verfahren ergaben sich folgende Werte:

1. Messung:  $m = 90$  cm;  $n = 67$  cm;
2. Messung:  $m = 80$  cm;  $n = 56,5$  cm;
3. Messung:  $m = 70$  cm;  $n = 46$  cm.

Ermitteln Sie die Brennweite der Linse als Mittelwert der drei Einzelmessungen!

8. Eine Konkavlinse hat die Brennweite  $f = -5$  cm. Der Gegenstand hat eine Größe von  $y = 2$  cm und ist 10 cm von der Linse entfernt.

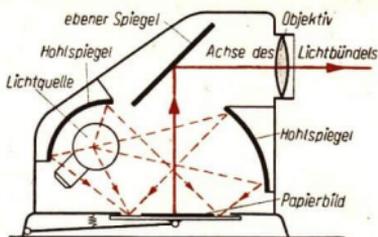
8.1. Berechnen Sie die Bildweite und die Bildgröße!

8.2. Deuten Sie den Sinn der Vorzeichen der Ergebnisse!

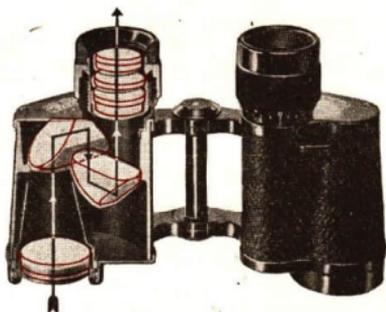
8.3. Prüfen Sie die Ergebnisse Ihrer Rechnung zeichnerisch im Maßstab 1 : 1!

9. Erläutern und begründen Sie an dem abgebildeten Episkop den Strahlengang auf Grund der verschiedenen optischen Gesetzmäßigkeiten!

10. Untersuchen Sie an dem Schnittbild des Prismenfeldstechers, wie durch die zwei Prismen ein aufrechtes und seitenrichtiges Bild zustande kommt!



206/1 Schnitt durch ein Episkop.



206/2 Schnittbild eines Prismenfeldstechers

## Zusammenfassung

### 1. Konkavlinsen sammeln Parallelstrahlen im Brennpunkt.

Wie werden Parallelstrahlen beim Durchgang durch eine Konkavlinse beeinflusst?

### 2. Zur Bildkonstruktion benutzt man die Hauptstrahlen.

Wie unterscheidet sich der Verlauf der Hauptstrahlen bei der Linse und beim Hohlspiegel?

### 3. Konkavlinsen sind Sammellinsen, Konkavlinsen sind Zerstreuungslinsen.

Wo liegen die Schnittpunkte der Hauptstrahlen bei beiden Linsenarten, wenn sich der Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite befindet?

### 4. Für die Bildentstehung an Sammellinsen gelten die Gesetzmäßigkeiten:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \text{und} \quad y : y' = s : s'$$

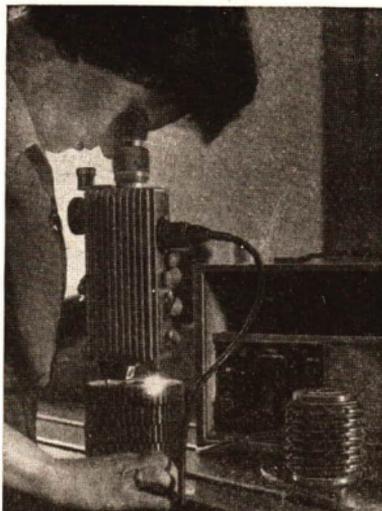
Welche Bedeutung haben diese Gleichungen?

### 5. Konkavlinsen erzeugen stets virtuelle Bilder, Konkavlinsen erzeugen reelle oder virtuelle Bilder.

In welchem Falle erzeugt eine Konkavlinse ein virtuelles Bild?

## 5. Dispersion

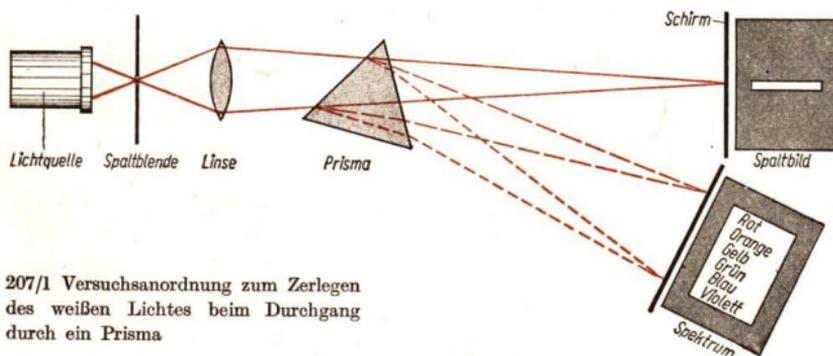
In verschiedenen Industriezweigen ist es notwendig, die Legierungsbestandteile der Metallwerkstoffe zu bestimmen. Neben der chemischen Analyse wird die Spektralanalyse angewendet. Durch Dispersion<sup>1</sup> wird das am Werkstück erzeugte Bogenlicht im Handspektroskop mit Hilfe eines Prismas zerlegt und betrachtet. Das so sichtbar gemachte Spektrum gestattet einen Schluß auf die Zusammensetzung des untersuchten Werkstoffes.



### 5.1. Dispersion im Prisma

Wenn ein Lichtstrahlenbündel durch ein Prisma gebrochen wird, dann zeigt das aufgefangene Bild des Strahlenbündels farbige Ränder. Um das Zustandekommen der farbigen Ränder eingehender untersuchen zu können, kann man folgenden Versuch ausführen:

Mit einer Konvexlinse wird ein beleuchteter Spalt auf einem Bildschirm abgebildet (Bild 207/1). Damit möglichst viel Licht an der Entstehung des Bildes beteiligt ist, beleuch-



207/1 Versuchsanordnung zum Zerlegen des weißen Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma

<sup>1</sup> Dispersion: Zerlegung von Licht durch Brechung

tet man den Spalt mit konvergentem Licht. Es entsteht ein helles, weißes Bild des Spaltes.

Bringt man in den Strahlengang hinter der Linse ein Prisma, so wird das Licht, wie zu erwarten ist, von der brechenden Kante weg abgelenkt. Auf dem Bildschirm ist aber anstelle des weißen Spaltbildes ein breiter, farbiger Streifen zu sehen, den man **Spektrum** nennt.

Diese Erscheinung hat der englische Physiker ISAAC NEWTON bereits Ende des 17. Jahrhunderts näher untersucht.

ISAAC NEWTON, geboren am 5. 1. 1643 zu Woolthorpe in Lincolnshire, gestorben am 31. 3. 1727 in London, gilt als einer der bedeutendsten Naturwissenschaftler und als Begründer der klassischen mathematischen Physik. Seine Leistungen wurden bereits im Lehrbuch für die Klasse 9 gewürdigt.

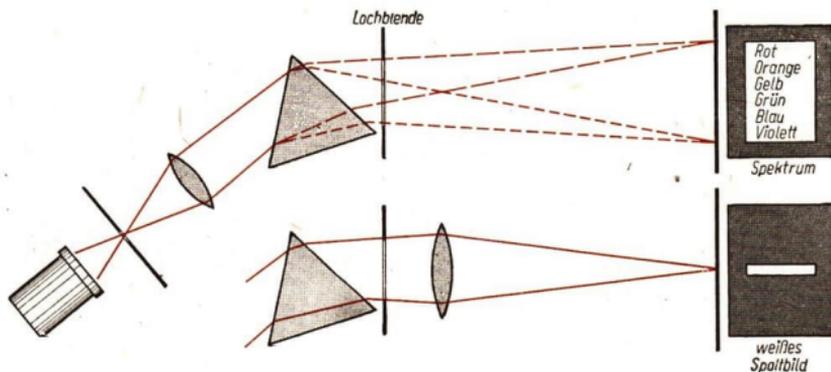
Im Jahre 1704 veröffentlichte NEWTON die „Optik“. Sie enthält die Erklärung der Spektral- und Körperfarben.

### 5.1.1. Das sichtbare Spektrum

Die verschiedenen Farben des Spektrums gehen allmählich ineinander über, so daß man die Zahl der Farbtöne nicht genau angeben kann (siehe Farbtafel am Ende des Buches). Die Hauptfarben des Spektrums sind *Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau* und *Violett*.

Blendet oder *filtriert* man eine Spektralfarbe aus und läßt dieses einfarbige Licht durch ein weiteres Prisma gehen, so wird es zwar abgelenkt, aber nicht in andere Farben zerlegt. *Die Spektralfarben können nicht weiter zerlegt werden.* Man nennt sie deshalb *Grundfarben*.

Bringt man in den Strahlengang hinter dem Prisma eine zylindrische Linse (Bild 208/1), so entsteht auf dem Bildschirm anstelle des Spektrums wieder ein weißes Bild des Spaltes.



208/1 Versuch zur Wiedervereinigung der Spektralfarben zu Weiß

Aus den Beobachtungen der beiden Versuche kann man folgern, daß sich das weiße Licht der Lichtquelle aus den verschiedenen Spektralfarben zusammensetzt. Im ersten Versuch ist es beim Durchgang durch das Prisma in die einzelnen Farben zerlegt worden. Diesen Vorgang nennt man **Dispersion des Lichtes**.

Im zweiten Versuch wurden die Spektralfarben wieder zu Weiß vereinigt. Dieser Vorgang ist ein weiterer Beweis für die **Umkehrbarkeit der Lichtwege**.

Die Entstehung des Spektrums ist darauf zurückzuführen, daß das Brechungsverhältnis für die einzelnen Spektralfarben verschieden groß ist. Es nimmt von Rot über Grün nach Violett zu. Das Spektrum ist nichts anderes als eine lückenlose Folge von verschiedenfarbigen Spaltbildern. Die einzelnen Farben sind um so reiner, je enger der Spalt ist.

Verwendet man zum Zerlegen des Lichtes Prismen, die zwar den gleichen brechenden Winkel haben, aber aus verschiedenen Stoffen bestehen, etwa ein *Kronglasprisma*, ein *Flintglasprisma* und ein *Hohlglasprisma, das mit Schwefelkohlenstoff gefüllt ist*, so erhält man Spektren verschiedener Breite. Die verschiedenen Stoffe haben also nicht nur unterschiedliche Brechungsverhältnisse für gleiche Farben, außerdem ist bei ihnen auch die Dispersion unterschiedlich. Man kann für die Dispersion Zahlenwerte angeben, wenn man den Unterschied der Brechungsverhältnisse für die beiden Farben bestimmt, die das Spektrum begrenzen. Dieser Zahlenwert wird aus der Differenz der Brechungsverhältnisse für Rot und Violett gebildet. Er ist von dem Stoff abhängig, aus dem das Prisma besteht. In der folgenden Tabelle sind einige Dispersionswerte angegeben.

Tabelle 6: Brechungsverhältnisse und Dispersion einiger Stoffe

Stoff	Brechungsverhältnisse		Dispersion ( $n_v - n_r$ )
	für Rot ( $n_r$ )	für Violett ( $n_v$ )	
Kronglas	1,51	1,53	0,02
Flintglas	1,73	1,81	0,08
Schwefelkohlenstoff	1,61	1,70	0,09

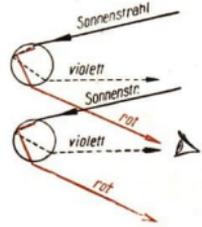
Hält man im Versuch nach Bild 208/1 zwischen das Prisma und die zylindrische Linse einen schmalen Kartonstreifen und führt ihn langsam durch das Spektrum, so wird dadurch jeweils ein bestimmter Farbton ausgeblendet. Man erkennt ihn auf dem Kartonstreifen. Das Spaltbild ist in diesem Falle nicht weiß, sondern hat eine je nach der abgedeckten Spektralfarbe wechselnde Mischfarbe. Sie entsteht dadurch, daß sich alle übrigen Spektralfarben mischen. Entfernt man den Kartonstreifen, so kommt auch die ausgeblendete Farbe hinzu, und man erhält wieder Weiß.

Man nennt solche Farbpaare, die einander zu Weiß ergänzen, **Komplementärfarben**.

Tabelle 7: Komplementärfarben

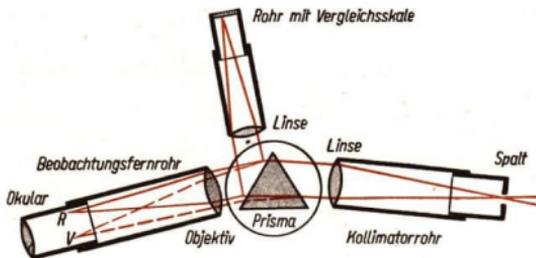
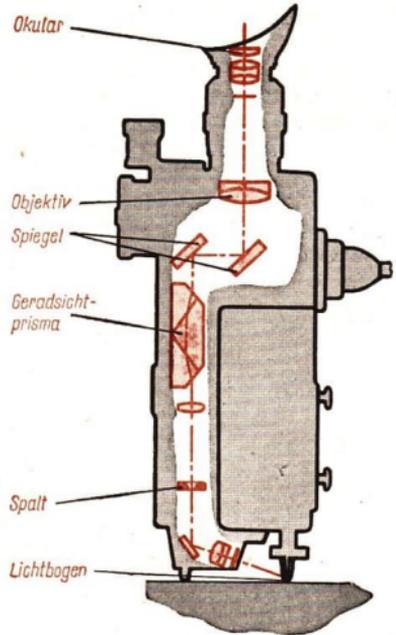
Ausgeblendete Spektralfarbe	Mischfarbe
Rot	Grün
Orange	Blau
Gelb	Violett
Grün	Rot
Blau	Orange
Violett	Gelb

210/1 Die Entstehung des Regenbogens.  
Das Sonnenlicht dringt in die Regentropfen ein und wird an der Innenseite total reflektiert. Beim Ein- und Austritt werden die Strahlenbündel gebrochen und in Farben zerlegt



## 5.2. Der Spektralapparat

Um ein Spektrum in seinen Einzelheiten genau betrachten und mit bekannten Spektren vergleichen zu können, benutzt man den *Spektralapparat* (Bild 210/2) oder das Handspektroskop. Die optische Einrichtung besteht aus den in Bild 210/2 gezeigten Teilen. In diesem Bild ist ebenfalls der Strahlengang schematisch dargestellt. Das zu untersuchende Lichtbündel tritt durch einen Spalt in das Kollimatorrohr und wird durch eine Linse parallel gerichtet, da der Spalt im Brennpunkt der Linse liegt. Das Lichtstrahlenbündel durchdringt das Prisma und wird in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Das Objektiv des Fernrohres vereinigt die Strahlen zu farbigen Spaltbildern. Sie bilden ein Spektrum, das durch das Okular betrachtet wird.



210/2 Strahlengang im Spektralapparat (links) und im Handspektroskop (oben)

### 5.3. Das Emissionsspektrum

Das Wort „Emission“ bedeutet ebensoviel wie „Aussendung“. Unter *Lichtemission* versteht man also die *Aussendung von Licht*. Lichtquellen *emittieren* Licht. Wird dieses Licht in ein Spektrum zerlegt, dann erhält man ein **Emissionsspektrum**.

#### 5.3.1. Das kontinuierliche Spektrum

Bei den bisher in dem Lehrbuchabschnitt „Dispersion“ beschriebenen Versuchen konnten als Lichtquellen der glühende Metallfaden einer Glühlampe und der glühende Kohlestab einer Bogenlampe verwendet werden. In beiden Fällen handelt es sich um glühende *feste* Körper. Ihre Emissionsspektren sind zusammenhängende Farbbänder, die lückenlos vom Rot bis zum Violett reichen (Bild in der Farbtafel). Derartige *lückenlos zusammenhängende Spektren* nennt man *kontinuierliche* Spektren. Die Emissionsspektren aller glühenden festen und flüssigen Körper sind kontinuierlich. Das Leuchten vieler Flammen beruht auf der Lichtemission glühender Rußteilchen, die in der Flamme verbrennen. Da es sich auch hier um feste Teilchen handelt, ist zum Beispiel das Emissionsspektrum einer Kerzenflamme kontinuierlich.

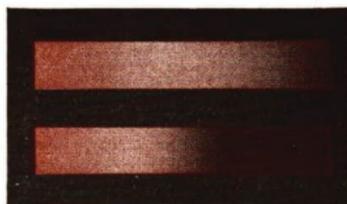
**Das Emissionsspektrum fester und flüssiger Körper ist kontinuierlich.**

Wenn an einer Glühlampe die volle Nennspannung liegt, emittiert sie gelblich-weißes Licht. Verringert man die Spannung, verringert sich nach dem Ohmschen Gesetz auch der Stromfluß, durch den der Metallfaden der Lampe erhitzt wird, und die Lampe sendet gelbes oder rötliches Licht aus.

Auf einem Bildschirm wird das Emissionsspektrum einer Glühlampe erzeugt. Danach verringert man mit einem Vorwiderstand die an die Glühlampe gelegte Spannung so, daß die Lampe nur noch die Helligkeit einer Kerzenflamme hat.

Wir stellen fest:

1. Das Spektrum der schwach leuchtenden Lampe ist viel lichtschwächer als das der hell leuchtenden.
2. Das Spektrum der schwach leuchtenden Glühlampe erscheint kürzer als das der hellen, da die violetten und blauen Spektralfarben fehlen (Bild 211/1). Deshalb ist auch ihr Licht rötlich gefärbt.



211/1 Emissionsspektren einer Glühlampe  
1 bei großer Stromstärke, 2 bei kleiner Stromstärke

Es ergibt sich die Gesetzmäßigkeit:

Die Lichtemission eines Körpers nimmt mit steigender Temperatur zu. Bei niedriger Temperatur, bei etwa 1000 °C bis 1500 °C, ist die Emission vorwiegend auf den roten Teil des Spektrums beschränkt. Bei zunehmender Temperatur treten auch die anderen Teile des Spektrums bis zum Violett immer mehr hervor.

### 5.3.2. Das Linienspektrum

Ganz andere Spektren erhält man, wenn man als Lichtquelle ein leuchtendes Gas benutzt. Verdampft man zum Beispiel Salze der Alkalimetalle in einer nichtleuchtenden Bunsenbrennerflamme, dann färbt sich die Flamme. Verwendet man zum Beispiel Kochsalz, so färbt sie sich gelb. Betrachtet man das Spektrum dieser Flamme in einem Spektralapparat, so sieht man anstelle eines kontinuierlichen Spektrums nur *eine gelbe Linie*. (siehe Farbtafel). Diese Linie im Spektrum ist kennzeichnend für das Natrium. Bereits die kleine Menge von  $3 \cdot 10^{-7}$  mg Natrium ruft diese Linie hervor. Verdampft man ein *Lithiumsalz*, so werden *zwei rote Linien* sichtbar. *Thalliumsalze* ergeben *eine grüne Linie*, *Kaliumsalze* *zwei rote und eine violette Linie*. Sehr zahlreich sind die Linien in den Spektren von Eisen, Kupfer, Zink oder Aluminium. Spektren, die nur aus einzelnen Linien bestehen, sind *diskontinuierlich*. Man nennt sie **Linienspektren**.

In den Spektralröhren sind Gase unter geringem Druck eingeschlossen. Das eingeschlossene Gas wird zum Leuchten angeregt, wenn man an die Elektroden der Röhre eine hohe Spannung anlegt.

Während *atomare Gase*, zum Beispiel Helium und Neon, *einfache Linienspektren* haben, treten in den Emissionsspektren *molekularer Gase* die Spektrallinien in engen Gruppen zusammen, die man *Banden* nennt. Derartige Spektren nennt man **Bandenspektren**. Bandenspektren können bei großer Dispersion des Prismas in einzelne Linien aufgelöst werden.

Die Emissionsspektren glühender Gase sind Linienspektren. Atomare Gase haben einfache Linienspektren, molekulare Gase Bandenspektren.

## 5.4. Das Absorptionsspektrum

Unter *Absorption* versteht man die Eigenschaft verschiedener Stoffe, *Licht aufzusaugen*. Ein Versuch soll dies verdeutlichen.

### 5.4.1. Das Absorptionsspektrum von Filtern

Ähnlich wie im Versuch zur Dispersion wird das Spektrum einer Kohlebogenlampe auf einem Bildschirm erzeugt. Es enthält alle Spektralfarben. Nun hält man in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Spalt eine rote Glasscheibe. Das Spektrum verkürzt sich dadurch und besteht nur noch aus dem roten Teil.

Der Versuch zeigt, daß die rote Glasscheibe nur rotes Licht hindurchläßt und alle anderen Farben absorbiert. Die Farbglasscheibe bezeichnet man als **Filter**, das Spektrum als **Absorptionsspektrum**. Filter aus blauem Glas lassen außer dem blauen noch einen Teil der roten Spektralfarben durch. Sie absorbieren also hauptsächlich Gelb und Grün. Bei der Vereinigung der Farben des Absorptionsspektrums erhält man die Farbe, in der man das Filter im durchfallenden Licht erblickt.

Außer farbigen Gläsern kann man als Filter auch andere feste, flüssige und gasförmige Stoffe verwenden. In der Farbtafel am Schlusse des Buches ist das Absorptionsspektrum von Neodym wiedergegeben. Neodym ist ein Element aus der Gruppe der Lanthanide.

**Optische Filter absorbieren farbige Anteile des weißen Lichtes. Ein Absorptionsspektrum entsteht, wenn das Licht einer Lichtquelle vor der Zerlegung in Farben erst durch einen Stoff hindurchgeht, der einzelne Anteile des Lichtes absorbiert.**

#### 5.4.2. Das Absorptionsspektrum von Gasen

Das Sonnenspektrum scheint bei flüchtiger Betrachtung kontinuierlich zu sein. Untersucht man es aber genau, so beobachtet man in diesem Spektrum eine große Zahl dunkler Linien. Sie wurden von **JOSEPH VON FRAUNHOFER** 1814 entdeckt und später nach ihm benannt. Die besonders stark hervortretenden Linien werden mit Buchstaben bezeichnet (siehe Farbtafel!). Seither hat man im Sonnenspektrum einige tausend Fraunhofersche Linien festgestellt.

Im Jahre 1859 gelang es **BUNSEN** und **KIRCHHOFF**, im Laboratorium ähnliche Spektren zu erzeugen. Betrachtet man im Spektralapparat das Spektrum einer Kohlebogenlampe und bringt vor den Spalt des Kollimatorrohres eine heiße Bunsenflamme, in der man ein Stück Natrium verdampft, so beobachtet man im gelben Teil des kontinuierlichen Spektrums der Bogenlampe eine schwarze Linie. Sie befindet sich an der gleichen Stelle, an der im Linienspektrum des Natriums die gelbe Linie auftritt.



213/1 **JOSEPH VON FRAUNHOFER** (1787 bis 1826) wurde 1818 Direktor des optischen Instituts von Utzschneider und Reichenbach in Benediktbeuren und 1823 Professor in München. Er konstruierte hervorragende optische und astronomische Instrumente, z. B. eine Maschine zur genauen Bearbeitung sphärischer Flächen und ein Sphärometer zur Bestimmung ihrer Krümmung, verbesserte die Aufstellung der Fernrohre, erfand das Heliometer zur Sonnenmessung u. a. m. Im Jahre 1814 entdeckte er die Absorptionslinien im Sonnenspektrum, die nach ihm benannt wurden

Daraus folgt im allgemeinen: *Geht weißes Licht vor der Zerlegung durch Natriumdampf, so fehlt im Spektrum die Farbe, die der Dampf selbst auszusenden vermag.* Sie wird vom Natriumdampf absorbiert. Das so entstandene Spektrum ist das Absorptionsspektrum des Natriums.

Auch bei anderen Gasen tritt die gleiche Erscheinung auf.

**Ein Element absorbiert im gasförmigen Zustand diejenigen Farben, die in seinem Linienspektrum enthalten sind.**

Auch das Sonnenspektrum ist ein Absorptionsspektrum. Die Fraunhoferschen Linien sind Absorptionslinien. Die Strahlung, die von der Sonnenoberfläche kommt, durchdringt die äußere Gashülle der Sonne, die Chromosphäre, und wird dort zum Teil absorbiert.

Aus der Lage der dunklen Linien kann man erkennen, welche Stoffe in der durchstrahlten Schicht vorhanden sind. So konnten bereits BUNSEN und KIRCHHOFF feststellen, daß alle auf der Erde vorkommenden Elemente auch auf der Sonne existieren. Aber nicht alle Absorptionslinien des Sonnenspektrums konnten von ihnen gedeutet werden. Man schloß infolgedessen auf unbekannte Elemente. Im Jahre 1868 wurde beispielsweise ein Element im Spektrum der Sonne entdeckt, das auf der Erde bis dahin noch nicht festgestellt worden war, das man als *Sonnenstoff*, *Helium*, bezeichnete. Erst 1895 konnte sein Vorkommen in der Lufthülle der Erde auf Grund der entsprechenden Emissionslinien nachgewiesen werden.

Die Sonnenforschung nimmt im Forschungsprogramm der Akademie der Wissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik einen breiten Raum ein. Ihr dient besonders der Einsteinturm des astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam.

Die Anlage ermöglicht es, neben dem Sonnenspektrum auch einzelne Teile der Sonnenoberfläche, zum Beispiel Sonnenflecken, spektroskopisch zu untersuchen.

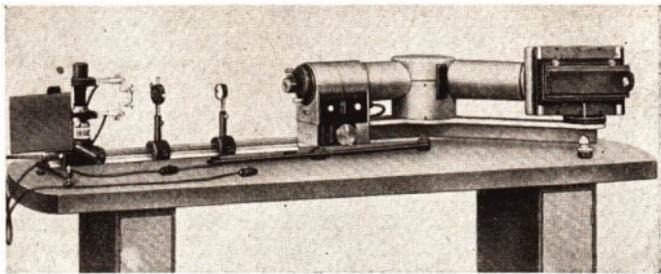
Mit besonderen Astrospektrographen wird das Licht der Planeten und Fixsterne untersucht. Diese Forschungen ermöglichen Rückschlüsse auf Größe, Temperatur, stoffliche Zusammensetzung und Entfernung der Himmelskörper.

Diese astrophysikalischen Forschungen werden durch die sowjetischen Weltraumforschungen mit anderen Methoden ergänzt und erweitert, so daß sich unsere Kenntnisse vom materiellen Aufbau des Weltalls ständig erweitern.

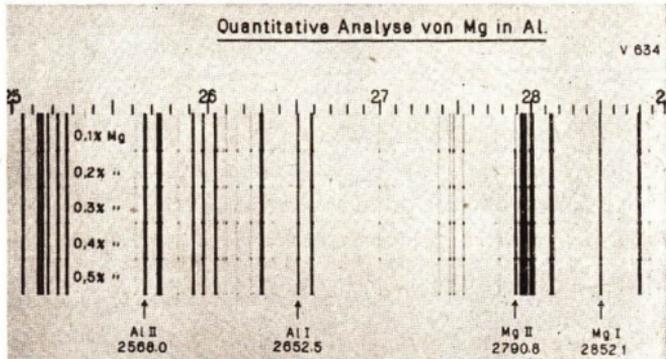
## 5.5. Die Spektralanalyse

Schon frühzeitig hat man bemerkt, daß die Salze verschiedener Metalle der heißen Bunsenbrennerflamme charakteristische Färbungen verleihen. Lithium- und Strontiumsalze färben rot, Natriumsalze gelb, Bariumsalze gelbgrün, Kupfersalze blaugrün und Kaliumsalze violett. Aus der Flammenfärbung kann man umgekehrt auch auf die Anwesenheit der betreffenden Metalle schließen. Diese Tatsache macht man sich häufig bei der *qualitativen Analyse* in der Chemie zunutze.

215/1  
 UV-Spektrograph Q 24  
 mit Funkenstativ



215/2 Spektrogramm



Sind jedoch gleichzeitig mehrere Salze an der Flammenfärbung beteiligt, kann man aus der Farbe allein keine eindeutigen Schlüsse ziehen. Im Spektralapparat erkennt man aber alle emittierten Farben nebeneinander in Form der charakteristischen Spektrallinien jedes einzelnen Elements. Im Spektrum kann man jedes Element mit Bestimmtheit feststellen, auch wenn nur sehr geringe Mengen davon in die Flamme gebracht wurden. Im allgemeinen genügen schon etwa  $1 \cdot 10^{-7}$  mg bis  $5 \cdot 10^{-7}$  mg (=1 bis 5 zehnmilliardstel Gramm) eines Elements zum spektroskopischen Nachweis.

Dieses spektroskopische Verfahren zum Nachweis der Stoffe nennt man Spektralanalyse. Sie hat als eine der einfachsten und bequemsten Methoden der chemischen Analyse eine große Bedeutung erlangt. Das Bild 215/1 zeigt den *UV-Spektrographen* Q 24 aus dem VEB Carl Zeiss Jena. Die zu untersuchende Metallprobe wird in Form von kleinen Stiften in ein Stativ eingespannt. Im zeitlichen Abstand von  $\frac{1}{100}$  s springen zwischen den Metallstiften Funken über, die aus zum Leuchten angeregtem Metall Dampf bestehen. Das Licht der Funken wird in ein Spektrum zerlegt, und das Linienspektrum wird mit einem besonderen Kamerarteil fotografiert. Man erhält ein sogenanntes *Spektrogramm* (Bild 215/2). Linsen und Prisma bestehen aus Quarz, so daß auch der ultraviolette Teil des Spektrums erfaßt wird. Das Eisenspektrum enthält bei diesem Spektrogramm zum Beispiel 9200 Linien im sichtbaren und unsichtbaren Teil des Spektrums.

Das Spektrogramm wird nach dem Entwickeln etwa 20fach vergrößert projiziert und mit bekannten Spektren verglichen. Aus der Lage der einzelnen Spektrallinien kann man auf das Vorhandensein bestimmter Elemente schließen. Aus dem Grad der Schwärzung der Fotoplatten erkennt man den prozentualen Anteil. Neuerdings wurden Geräte entwickelt, mit denen eine unmittelbare Analyse möglich ist. Fotozellen oder Thermoelemente registrieren Lage und Intensität der einzelnen Linien. In der kurzen Zeit von 30 s können 1000 Linien aufgenommen werden.

### Fragen und Aufgaben

1. Erläutern Sie die Begriffe Hauptfarben, Spektralfarben, Grundfarben, Komplementärfarben und geben Sie die Zusammenhänge zwischen ihnen an!
2. Ist der Spalt zwischen Lichtquelle und Prisma nach Bild 208/1 sehr breit, so erhält man kein Spektrum. Es ergibt sich ein weißes Spaltbild, dessen eine Seite rötlich und dessen andere Seite bläulich gefärbt ist. Warum ist der mittlere Teil des Bildes weiß?
3. Warum tritt beim Durchgang des Lichtes durch eine Fensterscheibe keine Farbzerlegung ein?
4. Wodurch kommt die Farbzerlegung des Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma zustande?
5. Warum kann man Regenbogen meist erst am späten Nachmittag oder am Abend, nicht aber zur Mittagszeit sehen? Beachten Sie den Stand der Sonne!
6. Unter welchen Bedingungen entstehen kontinuierliche Spektren, Linienspektren, Absorptionsspektren?
7. Ordnen Sie das Spektrum glühender fester Stoffe, das Spektrum glühender Flüssigkeiten, das Spektrum glühender Gase, das Spektrum des Lichtes einer Glühlampe mit Filter, das Spektrum weißen Lichtes, das durch Natriumdampf hindurchgehen mußte, und das Sonnenspektrum nach
  - 7.1. kontinuierlichen und diskontinuierlichen Spektren,
  - 7.2. Emissions- und Absorptionsspektren!
8. Welche Bedeutung hat die Spektralanalyse? Nennen Sie Anwendungsmöglichkeiten!

## Zusammenfassung

### 1. Weißes Licht ist zusammengesetztes Licht.

Wie kann man die einzelnen Bestandteile des weißen Lichtes nachweisen?

### 2. Die Spektralfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett sind Grundfarben.

Wie kann man beweisen, daß diese Farben Grundfarben sind?

### 3. Farbige Licht kann durch Farbfilter absorbiert werden.

Welche Wirkung hat ein Rotfilter?

### 4. Emissionsspektren und Absorptionsspektren glühender Gase sind Linienspektren.

Wie unterscheiden sich die beiden Spektren?

## Statik der Flüssigkeiten und Gase

1	Druck	$p = \frac{F}{A}$
2	Schweredruck	$p = h \cdot \rho \cdot g$
3	Boylesches Gesetz	$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$
4	Auftrieb	$F_A = G_{fl}$

## Wärmelehre

5	Längenänderung	$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$
6	Längendehnung (fest)	$l_1 = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$
7/8	Volumdehnung	$V_1 = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$
9	1. Gay-Lussacsches Gesetz	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$
10	2. Gay-Lussacsches Gesetz	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$
11	allgemeine Zustandsgleichung der Gase	$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$
12.2	allgemeine Zustandsgleichung der Gase	$p \cdot V = R \cdot T$
13.1	Grundgleichung der kinetischen Gastheorie	$p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2$
13.2	Grundgleichung der kinetischen Gastheorie	$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m \cdot v^2}{V}$
14.1	Volumenergie	$W = p \cdot V$
14.4	Volumenergie	$p \cdot V = \frac{2}{3} \cdot W_{kin}$
15	Energieinhalt eines Gases	$\frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot v^2 \cdot V_{0M} = R \cdot T$
16	Kinetische Energie der Molekularbewegung	$\frac{W_{kin}}{\text{Mol}} = \frac{2}{3} \cdot R \cdot T$
17.1	Thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{W}{W_1}$

17.2 Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{W_1 - W_2}{W_1}$$

17.3 Thermischer Wirkungsgrad

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

18 Wirtschaftlicher Wirkungsgrad

$$\eta_{we} = \frac{W_N}{W_M}$$

## Mechanische Schwingungen und Wellen

19 Harmonische Schwingung

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

20 Schwingungsdauer

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

21 Schwerebeschleunigung

$$g = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l}{T^2}$$

22 Grundgleichung der Wellenlehre

$$c = \lambda \cdot f$$

23 Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n$$

## Optik

24 Brennweite des Hohlspiegels

$$f \approx \frac{r}{2}$$

25 Abbildungsgleichung des Hohlspiegels

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

26 Bildgröße: Gegenstandsgröße

$$y : y' = s : s'$$

27.2 Brechungszahl

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

28 Abbildungsgleichung für Linsen

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

## 2. Lösungen

### 2.1. Statik der Flüssigkeiten und Gase

#### Seite 10

2. Gase breiten sich im gesamten Raum aus (Bewegung der Moleküle).

#### Seite 20

1.  $1030 \text{ mbar} = 1,030 \text{ bar}$   
 $= 1,030 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = \frac{1,030}{1,01325} \text{ atm}$   
 $= \frac{760 \cdot 1,030}{1,01325} \text{ Torr} = 772,5 \text{ Torr}$
2.  $p_a = 6 \cdot 10^{-3} \text{ at}$
3.  $F_2 = 6035 \text{ kp}$

#### Seite 30

2. 620 Torr; 990 Torr
5. Höhenkabine kann undicht werden, Fallschirmabsprung

#### Seite 37

1.  $\rho = 0,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
2. Der Wasserspiegel sinkt.
4. Die linke Schale senkt sich.
5. Dichtebestimmung eines festen Körpers.

### 2.2. Wärmelehre

#### Seiten 56 bis 57

1.  $\varnothing = 60,115 \text{ mm}$      $h = 80,15 \text{ mm}$   
 $V = 227,3 \text{ cm}^3$
2. Von den drei Stoffen dehnt sich Alkohol am stärksten aus, Petroleum stärker als Wasser.
3. 12 l
4. Die Luft nimmt einen 4,5 mal so großen Raum ein.
5. 567 °K oder 303 °C

6. 4300 l
7. 86,6 l
8. Es lassen sich tiefere Temperaturen messen.

#### Seiten 72 bis 73

2. Massenzentrum (Schwerpunkt), freier Fall (zur Vernachlässigung des Luftwiderstandes).
3. 8200 mal in der Sekunde.

### 2.3. Mechanische Schwingungen und Wellen

#### Seite 115

3.  $T = 0,00227 \text{ s}$
4. Die Schwingung wiederholt sich nicht in allen Einzelheiten, da  $x_0$  abnimmt. Die in Wärme umgewandelte mechanische Energie müßte ersetzt werden.

#### Seite 122/123

2.  $l \approx 99,5 \text{ cm}$
5. Bei Erwärmung verlängert sich die Pendelstange; bei Abkühlung verkürzt sie sich. Im ersten Fall „geht die Uhr nach“.
- 6.1. Die Größe  $g$  in der Gleichung  
 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  ist ortsabhängig.
- 6.2. Am Pol geht die Uhr vor, am Äquator nach.

#### Seite 133

6. Nein! Mitschwingen tritt nur bei gleicher Eigenfrequenz ein.

#### Seite 140

6. Es fehlt die Kopplung (vgl. „Wellenmaschine“)

### Seite 146

3.  $\lambda = 1,7 \text{ cm}$       4.  $f \approx 442 \text{ Hz}$   
5.  $v = 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$     6.  $\lambda = 375 \text{ km}$

### Seite 155/156

1.  $s = 29 \text{ m}$   
5.  $\lambda_1 \approx 1,77 \text{ cm}$ ,  $\lambda_2 \approx 1,54 \text{ cm}$   
7.  $n \approx 1,32$

### Seite 161

- 5.2.  $l = 50 \text{ cm}$

### 2.4. Optik

#### Seite 177

3. Bestimmen der Brennweite nach Abbil-

$$\text{dungsgleichung } \frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'};$$

$$f = \frac{s \cdot s'}{s + s'}; \quad r = 2f.$$

4.  $s = 10 \text{ cm}$   
7.  $s'_1 = 50 \text{ cm}$ ;  $s_1 = 75 \text{ cm}$  (reelles Bild),  
 $s'_2 = -15 \text{ cm}$ ;  $s_2 = 10 \text{ cm}$  (virtuelles Bild).

#### Seite 190

5.  $\delta = 56,6^\circ$   
6.  $\alpha = 35^\circ$ ;  $\delta = 25^\circ$   
7.  $\beta = 48,6^\circ$

#### Seite 205

4.  $f = 37,5 \text{ cm}$   
5.  $s = 75 \text{ cm}$ ;  $s' = 150 \text{ cm}$   
7.  $f_1 = 10,03 \text{ cm}$ ;  $f_2 = 10,02 \text{ cm}$ ;  
 $f_3 = 9,94 \text{ cm}$ ;  $f = 10 \text{ cm}$   
8.1.  $s' = -3,33 \text{ cm}$ ;  $y' = -0,66 \text{ cm}$   
8.2. Das Bild liegt auf derselben Seite wie  
der Gegenstand, es ist aufrecht (virtuell).

### Seite 216

3. Es tritt nur Parallelverschiebung des  
Lichtes auf, die Spektralfarben vereinigen  
sich wieder zu Weiß.  
4. Beim Prisma kommt es zur Farbzerlegung  
des Lichtes, weil die verschiedenfarbigen  
Strahlen das Prisma als divergentes Bündel  
verlassen und sich dadurch nicht wieder  
mischen.  
5. Regenbogen kann man nur beobachten,  
wenn die Sonne tief steht. In der Mittags-  
zeit steht sie zu hoch.

6. Kontinuierliche Spektren entstehen als  
Emissionsspektren glühender fester und  
flüssiger Stoffe.

Linienpektren entstehen als Emissions-  
pektren glühender Gase. Absorptions-  
pektren entstehen, wenn das Licht vor der  
Dispersion durch einen Stoff geht, der  
einen Teil absorbiert (Filter).

- 7.1 Kontinuierliche Spektren:

Spektrum glühender fester Stoffe

Spektrum glühender Flüssigkeiten

Diskontinuierliche Spektren:

Spektrum glühender Gase

Spektrum einer Glühlampe mit Filter

Spektrum weißen Lichtes, das durch

Na-Dampf gehen mußte

Sonnenspektrum

- 7.2. Emissionsspektren:

Spektrum glühender fester Stoffe

Spektrum glühender Flüssigkeiten

Spektrum glühender Gase

Absorptionsspektren:

Spektrum des Lichtes einer Glühlampe  
mit Filter

Spektrum weißen Lichtes, das durch

Na-Dampf gehen mußte

Sonnenspektrum

## SACHWORTVERZEICHNIS

- ABBE, ERNST** 203  
 Abbildungsgleichung 176  
 Absorptionsspektrum 212  
 Abstandsgesetz 167  
 Achse, optische 171, 192  
 Aggregatzustand 8, 10  
 Amplitude 114, 143  
 Aräometer 36  
 Arbeit, mechanische 85, 91  
 Arbeitsdiagramm einer Expansionsmaschine 89, 90, 92  
 Arbeitsvermögen 88  
 Arbeit - Wärme - Äquivalenz 78, 80  
 Archimedisches Prinzip 31  
 Atmosphäre 11  
 Aufdruck 19  
 Auftrieb 32  
 Ausbreitungsgeschwindigkeit 144  
 Ausdehnung 41  
 Ausdehnungskoeffizient 42  
  
 Bandenspektrum 212  
 Barometer, elastische 22  
**BESSELSCHES** Verfahren 198  
 Bewegungsenergie 71  
 Bildgröße 177, 196  
 Bild, reelles 194  
 — virtuelles 195  
 Bildweite 173, 176, 194, 196  
 Bodendruck 19  
 Bodendruckkraft 18  
**BOLTZMANN, LUDWIG** 40, 63, 107  
**BOYLE, ROBERT** 29, 59  
 Boylesches Gesetz 24  
 Brechungsgesetz 151  
 Brechungsverhältnis 181  
 Brechungswinkel 179  
 Brechungszahl 151, 181  
 Brennfläche 173  
 Brennpunkt 171  
 Brennpunktstrahlen 172, 193  
 Brennweite 173, 176, 196  
**BROWN, ROBERT** 61  
 Brownsche Bewegung 61  
  
**CARNOT, SADI** 107  
**CLAUSIUS, RUDOLF** 40, 63, 107  
  
 Dachkantprisma 200  
 Dampfdruckkurve 89  
 Dampfmaschine 99  
 Dampfturbine 74  
 Dämpfung 123  
 Dichtemessung 35  
**DIESEL, RUDOLF** 107  
 Dieselmotor 74, 99, 107  
 Diffusion 61  
 Dispersion 207, 209  
 Drehzahl, kritische 130  
 Druck 11  
 Druckausbreitung 13  
 Druckgefälle 94  
  
 Eigenfrequenz 126  
 Einfallslot 147, 179  
 Einfallswinkel 179  
 Elementarwelle 153  
 Elongation 114, 116  
 Emissionsspektrum 211  
 Energie, Gesetz von der Erhaltung 78  
 —, kinetische 69, 72, 83, 88  
 —, mechanische 78, 101  
 —, potentielle 88, 100  
 Energieübertragung 138  
 Energieumwandlung 113  
 Entspannung, isotherme 85  
 Erregerfrequenz 127  
  
 Fadenpendel 118, 120  
 Federschwinger, horizontal 112  
 Federschwinger, vertikal 111  
 Federschwingerkette 137  
 Fernrohr 202  
 Filter 213  
**FIZEAU, HIPPOLYTE LOUIS** 168  
 Flüssigkeitsbarometer 22  
 Flüssigkeitsmanometer 13  
**FOUCAULT, LEON** 168  
**FRAUNHOFER, JOSEPH** von 213  
 Frequenz 114, 143  
 Frontwelle 152  
  
**GAGARIN, JURI** 77  
**GALILEI, GALILEO** 121  
 Gas, ideales 25, 72, 84  
 —, reales 84  
 Gaskonstante 54  
 —, universelle 55  
 Gasmotor 107  
 Gastheorie, kinetische 63, 72, 83, 107  
 Gasthermometer 56  
 Gasturbine 74, 94, 107  
 Gasturbinenkraftwerk 95  
**GAY-LUSSAC, LOUIS JOSEPH** 44, 101  
 Gegenstandsgröße 177, 196  
 Gegenstandsweite 176, 196  
 Gesetz, Boylesches 24  
 Gesetz, Gay-Lussacsches 43  
 Gesetz von der Erhaltung der Energie 78, 82  
**GIBBS, JOSIAH WILLARD** 63  
 Gleichdruckturbine 93  
 Gleichgewicht, dynamisches 65  
 Grenzfall, aperiodischer 124  
 Grenzwinkel der Totalreflexion 185  
 Grundfarben 208  
 Grundgleichung der kinetischen Gastheorie 65  
**GUERICKE, OTTO** von 25

- Hauptfarben des Spektrums 208  
 Hauptsätze der Wärmelehre 74, 102  
 HELMHOLTZ, HERRMANN VON 82  
 HERON 26  
 HERTZ, HEINRICH 114  
 Hohlspiegel, sphärischer 172  
 HUYGENS, CHRISTIAN 40, 121, 152, 154  
  
 Indikatordiagramm 91  
 Irreversibel 101  
 Isothermen 84  
  
 JOULE, JAMES PRESCOTT 81, 101  
  
 Kaltstrahler 164  
 Kältemaschine 102  
 Kalorimeter 75, 81, 101  
 Katakustik 173  
 KEPLER, JOHANNES 202  
 Kelvinskale 44  
 Kohäsionskraft 9  
 Kolbendampfmaschine 106  
 Kolbenmanometer 13  
 Kolbenmaschine 87  
 Komplementärfarben 209  
 Kompression 81  
 Kondensator 106  
 Konkavlinse 191  
 Konvexlinse 191  
 Kopplung 135  
 Kraftmaschinen 105  
 Krümmungsmittelpunkt 171  
 Krümmungsradius 176  
 KTESIBIOS 26  
  
 Lageenergie 71  
 LANGEN 107  
 LAVOISIER, ANTOINE LAURENT 40, 59  
 Leistung, indizierte 91  
 LENOIR 107  
 Lichtdurchlässigkeit 165  
 Lichtgeschwindigkeit 168, 170  
 Lichtstrahlenbündel 165  
 Linienspektrum 212  
 Linse, Konkav- 191  
 —, Konvex 191  
 Linsengleichung 197  
 LOMONOSSOW, MICHAEL 40, 59  
 Longitudinalwellen 137  
 LOSCHMIDT, JOSEPH 68  
 Loschmidtsche Zahl 68  
 Luftdruck 21, 22  
 Lupe 200  
  
 Manometer 12, 76  
 Maßeinheiten des Druckes 11  
 Mattscheibe 200  
 MAXWELL, JAMES CLARK 40, 63, 107  
 MAYER, DR. ROBERT 78  
 Medium der Welle 137  
 Membranmanometer 13  
 Meteorologie 24  
 Mikroskop 201  
 Mischfarben 209  
 Mittelpunkt, Krümmungs- 171  
 —, optischer 171, 192  
 Mittelpunktstrahlen 172, 193  
 Mol 68  
 Molekül 10, 60  
 Molekülgeschwindigkeit 72  
 Molekularbewegung 69  
 Molekularkraft 9  
 Molvolumen 54  
  
 NERNST, WALTER 76  
 NEWCOMEN, THOMAS 106  
 NEWTON, ISAAC 208  
 Normzustand 56  
  
 Objektiv 200  
 Öffnungswinkel 171  
 Okular 201  
 Oszillator 137  
 OTTO, NIKOLAUS 107  
  
 PAPIN, DENIS 106  
 Parabolspiegel 173  
 Parallelstrahlen 172, 193  
 PASCAL, BLAISE 27  
 Pendelgesetz 121  
 Pendelkette 136  
 Pendel, mathematisches 120  
 —, physikalisches 122  
 Periode 114  
 Perpetuum mobile erster, zweiter Art, 82, 102  
 Phase 114, 144  
 Phasengleichlauf 157  
 Phasensprung 157  
 Plattenfedermanometer 13  
 POLSUNOW, IWAN IWANO-WITSCH 106  
 Prisma, Dachkant- 200  
 —, optisches 183  
 —, totalreflektierendes 186/187  
  
 Quecksilberbarometer 22  
  
 Raketentriebwerk 96  
 Reflexion am festen Ende 157  
 —, am losen Ende 157  
 Reflexionsgesetz 148, 172  
 Reibungsarbeit 78  
 Reibungswärme 81  
 Relativbewegung 70  
 Resonanz 127  
 Reversible Vorgänge 101  
 Röhrenfedermanometer 13  
 RÖMER, OLAF 168  
 ROYEN, SNELL VAN 182  
  
 Sandpendel 16  
 Schallwellen 135  
 Schlieren 188  
 SCHOTT, OTTO 203  
 SCHOTT 96  
 Schweredruck 12, 15  
 Schwingung 111  
 —, erzwungene 126  
 —, gedämpfte 123  
 —, harmonische 115  
 Schwingungsbauch 158  
 Schwingungsdauer 120  
 Schwingungsknoten 158  
 Seitendruck 19  
 Spektralapparat 210

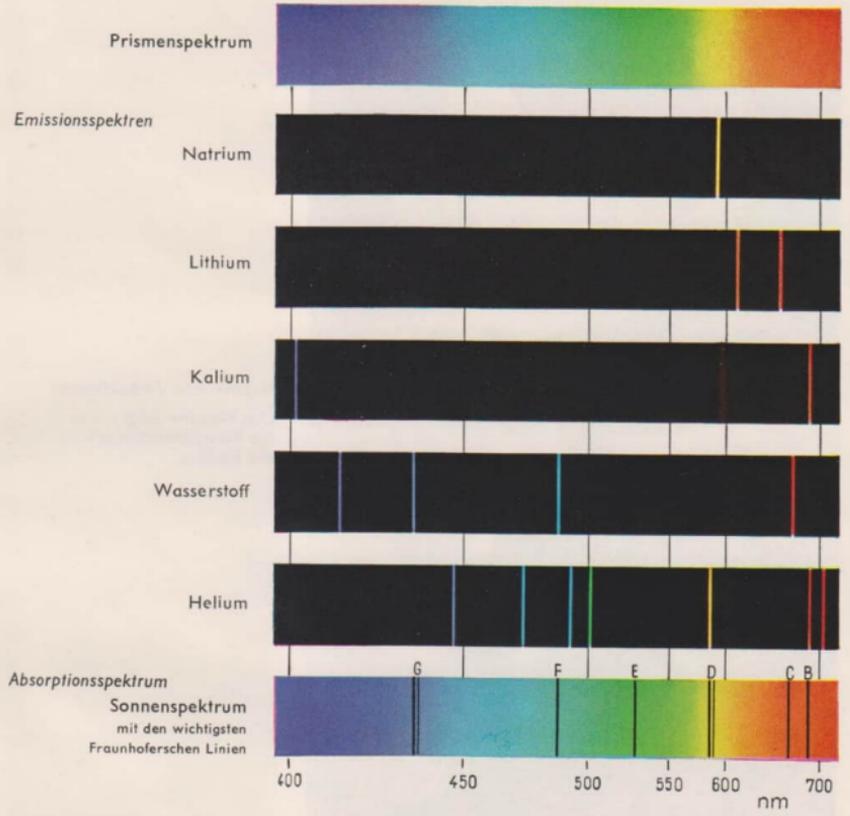
- Spektralfarben 208  
 Spektrogramm 215  
 Spektrum, Absorptions- 212  
 —, Banden- 212  
 —, Hauptfarben des 208  
 —, kontinuierliches 211  
 —, Linien- 212  
 Spezifische Wärme der Gase 74  
 Spiegel 200  
 Spiegelreflexkamera 200  
 STEVIN, SIMON 17  
 Strahlen, Brennpunkt- 172, 193  
 —, Mittelpunkt- 172, 193  
 —, Parallel- 172, 193  
 Strömungsmaschinen 87, 88, 92  
  
 Temperatur, absolute 72  
 Temperaturgefälle 88, 94  
 Temperaturskale, absolute 44  
 Temperaturstrahler 164  
 THOMPSON, BENJAMIN 78  
 TORRICELLI, EVANGELISTA 27  
 Totalreflexion 184  
 Transversalwellen 137  
  
 Uhrenpendel 111  
  
 Überdruckturbine 93  
 Umkehrbare Vorgänge 100  
 Umkehrpunkt 111  
 Unwucht 130  
  
 Vakuumpumpen 25  
 VEB Bergmann-Borsig 100  
 VEB Energiebau Radebeul 100  
 Verbrennungskraftmaschine 99  
 Verdichtung, adiabatische 86  
 —, isotherme 85  
 Volldruckmaschine 88  
 Volumarbeit, eines Gases 84  
 Volumenergie 68  
 Vorgänge, nicht umkehrbare 101  
  
 Wahrscheinlichkeit 64  
 Wärme 69  
 Wärmeaustausch 84  
 Wärmeenergie 78, 101  
 Wärmeinhalt 69, 73  
 Wärmekraftmaschinen 74, 87, 88  
 Wärmetheorie, kinetische 69  
 Wasserwelle 135  
  
 WATT, JAMES 106  
 Welle 135, 142  
 —, elektromagnetische 135  
 —, Elementar- 153  
 —, fortschreitende 136  
 —, Longitudinal 137  
 —, resultierende 158  
 —, stehende 158  
 —, Transversal- 137  
 Wellenberg 141  
 Wellenfront 143  
 Wellenlänge 144  
 Wellennormale 143  
 Wellental 141  
 Wirkungsgrad, thermischer 97  
 —, wirtschaftlicher 98  
  
 ZEISS, CARL 203  
 Zungenfrequenzmesser 128  
 Zustand eines Gases 45  
 Zustandsänderung, adiabatische 83  
 —, isobare 83  
 —, isochore 48, 83  
 —, isotherme 83, 84, 104

### Quellennachweis der Bilder

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen angefertigt von Helms Grothmann, Berlin; Fritz Hampel, Hangelsberg, und Heinrich Linkwitz, Berlin.  
Titelbild: VEB Carl Zeiss Jena, Foto der Farbbellage: Seidel, Karl-Marx-Stadt

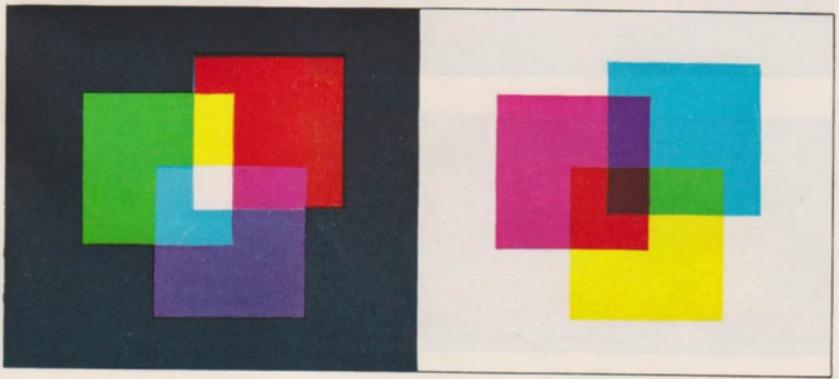
Brüggemann, Leipzig: 7; 14/3 · Bunschuh, Berlin: 35/1; 164; 191 · Deutsche Staatsbibliothek Berlin: 154/1 · Golm, Berlin: 174/2 · Krüger, Berlin: 25/2 · Krütgen: 12/1; 124/2; 145/1 · Levermann-Westerholz, Rostock: 31 · Märkisches Museum, Berlin: 111 · Meyer, Berlin: 15/1 · Schiffbau-Versuchsanstalt Berlin: 110 · Schmidt, Berlin: 135 · Schultze: Berlin: 185/1 · Seidel, Karl-Marx-Stadt: 207 · Staatliche Museen, Berlin: 40 · VEB Bergmann-Borsig, Berlin: 93/2 · VEB Carl Zeiss, Jena: 163 · VEB Funkwerk Erfurt: 148/3 · VEB Kamera- und Kinowerke Dresden: 200/1 · VEB Traktorenwerk Schönebeck: 14/3 · VWV Archiv: 45/1; 59/2; 63/1; 82/4; 91/2; 112/1; 123/1; 126; 132/2; 149/2; 156/1; 206/2; 215/1; 215/2 · VWV/Seifert: 11; 41 · Zentralbild Berlin: 19/2; 21; 24/1; 59/1; 77/1; 82/2; 82/3; 109; 131/1; 147; 155/2.

Reproduktionen aus: „Experimenta Nova“, Deutsche Staatsbibliothek: 26/2; 28/1 · „Geschichte der Luftfahrt“ VEB Verlag Technik Berlin: 58 · „Křidla vlasti“ Prag: 74 · „Aerosport“ Berlin: 179.



Additive Farbmischung

Subtraktive Farbmischung





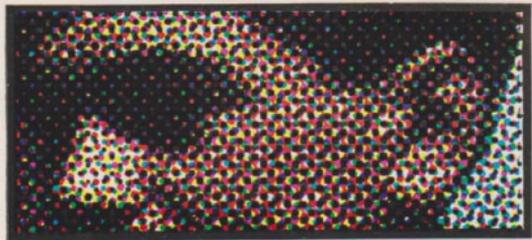
*Negativ einer Farbaufnahme*

Das Negativ zeigt die Komplementärfarben des Positivs



*Positiv einer Farbaufnahme*

Pionier-  
arbeitsgemeinschaft  
„Junge Flieger“



*Farbdruck*

Der vergrößerte  
Bildausschnitt zeigt die  
Farbpunkte, die durch  
additive Mischung  
im Auge den Farbeindruck  
hervorrufen

