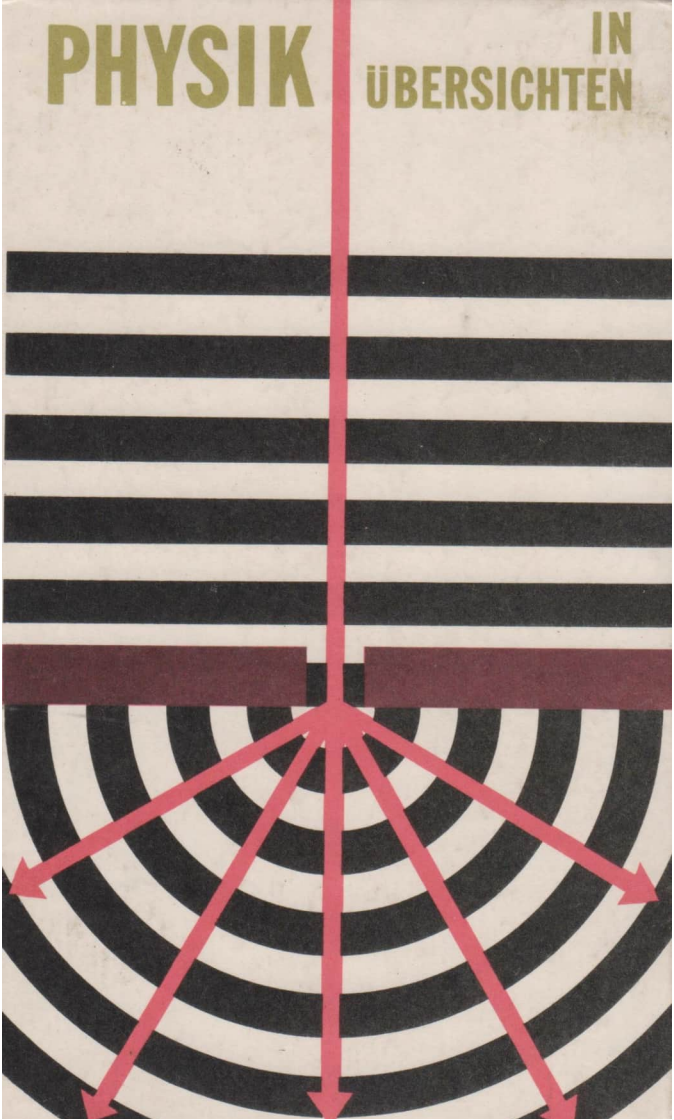
PHYSIK IN ÜBERSICHTEN



Wo steht was

MECHANIK M

WÄRMELEHRE W

ELEKTRIZITÄTSLEHRE E

OPTIK O

ATOMPHYSIK A

ANHANG A

SACHWORTVERZEICHNIS S

Physik in Übersichten

Kompendium

für die Oberschule

Volk und Wissen

Volkseigener Verlag Berlin

1970

Das Manuskript verfaßten

Werner Golm, Gerhard Heise, Horst Seidel (Abschnitt Mechanik),
Konrad Weber (Abschnitt Wärmelehre, Anhang Seiten 176 bis 191),
Helmut Menschel, Josef Peter (Abschnitt Elektrizitätslehre),
Eberhard Eichler (Abschnitt Optik),
Werner Damm (Abschnitt Atomphysik)
in Zusammenarbeit mit der Redaktion Physik des Verlages.

Redaktion: Werner Golm · Heinz Graff

Bei der Bearbeitung einzelner Textstellen wurden bisher erschienene Bücher des Verlages zum gleichen Thema berücksichtigt.

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

Ausgabe 1965
Einband und Vorsatz: Werner Fahr
Typografie: Manfred Behrendt
Redaktionsschluß: 15. 9. 1967
ES 11 H · Bestell-Nr. 02 08 08-8 · Preis: 2,20
Lizenz-Nr. 203 · 1000/70 (UN)
Satz: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden
Druck: Karl-Marx-Werk Pößneck (V/15/30)

Vorwort

In diesem Buch sind wesentliche Fakten des Physikunterrichts der Klassen 6 bis 10 in kurzer, knapper Form enthalten. Mit Hilfe dieses Buches ist es möglich, den im Unterricht behandelten Stoff nochmals durchzuarbeiten und zu wiederholen. Das wird besonders dann von Vorteil sein, wenn der Lehrstoff vergangener Schuljahre benötigt wird. Außerdem kann man sich einen ersten Überblick über noch nicht behandelte Stoffgebiete verschaffen.

Das Buch ist gegliedert nach den Hauptabschnitten Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre, Optik, Atomphysik und Anhang. Die Hauptabschnitte sind durch farbige Marken am Rande der Buchseiten leicht aufzufinden.

In dem Anhang befinden sich Angaben über physikalische Größen und Maßeinheiten, Beispiele für Versuchsauswertungen, Fehlerrechnungen, Lösungsweg einer physikalischen Aufgabe und zahlreiche Tabellen mit Umrechnungen und Zahlenwerten von physikalischen Größen.

Im Inhaltsverzeichnis sind die Unterabschnitte des jeweiligen Hauptabschnittes vermerkt. Innerhalb der Unterabschnitte sind alle wichtigen Begriffe herausgestellt; ihre Erläuterungen sind oftmals mit einem Beispiel verbunden.

Am Schluß des Buches befindet sich ein ausführliches Sachwortverzeichnis; mit seiner Hilfe ist es möglich, Begriffe zu finden, die man nicht sofort einem bestimmten Abschnitt zuordnen kann.

Viele Erscheinungen und Begriffe der Physik, beispielsweise Kraft, Energie, Schwingungen, treten in verschiedenen Stoffgebieten auf. Eine ausführliche Erläuterung erfolgt im allgemeinen nur an einer Stelle des Buches; an anderen Stellen wird auf die Seite mit der ausführlichen Erläuterung hingewiesen.

Es soll betont werden, daß dieses Buch weder den Unterricht noch das Lehrbuch ersetzen kann. Physikalische Ursachen erkennen zu lassen ist in erster Linie dem Unterricht mit seinen Versuchen, Demonstrationen und dem Lehrbuch vorbehalten.

Der englische Philosoph Francis Bacon sagte bereits im 17. Jahrhundert:

„Wissen heißt, vermittels der Ursachen wissen!“

Die Verlagsredaktion

Mechanik

M

6 Bewegungslehre
13 Kräftegleichgewicht bei ruhenden Körpern
18 Kraft und Bewegung
22 Energie
25 Einfache kraftumformende Einrichtungen
31 Molekularkräfte

32 *Mechanik der Flüssigkeiten und Gase*

32 Ruhende Flüssigkeiten und Gase
37 Strömende Flüssigkeiten und Gase

40 *Mechanische Schwingungen und Wellen*

40 Schwingungen
43 Wellen
49 Akustik

Mechanik

Die Mechanik ist die Lehre von den Bewegungszuständen der Körper (mechanische Bewegung) und ihren Ursachen, den Kräften. Der Sonderfall der Ruhe ist hierbei eingeschlossen.

Bewegungslehre

Die Lehre vom Ablauf der mechanischen Bewegungen (kurz Bewegung genannt) hinsichtlich Raum und Zeit ohne Berücksichtigung von Kräften wird Kinematik genannt.

Massenpunkt

In manchen Fällen wird ein räumlich ausgedehnter Körper wie ein Punkt behandelt, den man sich mit der Gesamtmasse des Körpers behaftet denkt.

Beispiel Frei fallende Körper, die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne, die Masse eines Fadenpendels können in bestimmten Fällen als Massenpunkt angesehen werden.

Starrer Körper

Ein System von miteinander verbundenen Massenpunkten, deren gegenseitige Abstände unveränderlich angenommen werden.

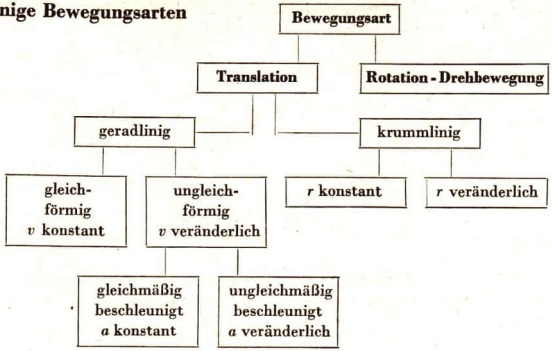
Translation

oder fortschreitende Bewegung ist die Bewegungsart eines Körpers, bei der seine sämtlichen Punkte zu jeder Zeit gleich große und gleichgerichtete Geschwindigkeiten haben. Die Kreisbewegung eines Massenpunktes (↗ S. 6) ist eine Translation.

Rotation — Drehbewegung

ist eine Bewegungsart, bei der sich alle Punkte eines starren Körpers auf konzentrischen Kreisen um eine ruhende Achse oder einen festen Punkt drehen.

Einige Bewegungsarten



Die Relativität der mechanischen Bewegung

Jede mechanische Bewegung ist relativ, d. h., sie ist bezogen auf ein als ruhend angenommenes Bezugssystem; in den meisten Fällen ist das die Erde.

Gleichförmige geradlinige Bewegung

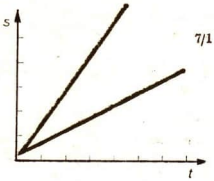
Eine gleichförmige geradlinige Bewegung liegt vor, wenn ein bewegter Körper längs einer Geraden in gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt.

Geschwindigkeit

Um den Bewegungszustand eines Körpers angeben zu können, muß seine Geschwindigkeit bestimmt werden.

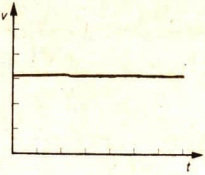
▷ **Die Geschwindigkeit v einer gleichförmigen Bewegung ist gleich dem Quotienten aus dem zurückgelegten Weg s und der dazu benötigten Zeit t.**

$$v = \frac{s}{t}$$



7/1

Die meisten Bewegungen sind ungleichförmig; die vorstehende Gleichung legt eine Durchschnittsgeschwindigkeit fest.



8/1 Das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung ist eine Gerade, die parallel zur Zeit-Achse verläuft

Es ergeben sich: $s = v \cdot t$ und $t = \frac{s}{v}$.

▶ **Maßeinheiten der Geschwindigkeit**

sind z. B. Meter je Sekunde $\left(\frac{m}{s}\right)$, Kilometer je Stunde $\left(\frac{km}{h}\right)$ und der Knoten (kn).
Das Meter je Sekunde ist die Geschwindigkeit eines sich gleichförmig bewegenden Körpers, der während der Zeit 1 s den Weg 1 m zurücklegt.

$1\,kn = \frac{1\,sm}{h}$; $1\,kn = \frac{1852\,m}{h}$.

Zusammensetzung von Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit gibt den Betrag und die Richtung einer Bewegung an. Sie ist eine vektorielle Größe (↗ S. 14).

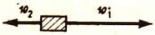
Geschwindigkeiten lassen sich zeichnerisch addieren und subtrahieren.

Folgende Fälle werden unterschieden:

1. $v_1 = -v_2$

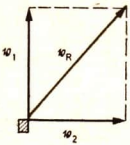
8/2 Körper bleibt in Ruhe

2. $v_1 \neq -v_2$



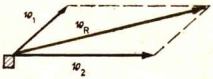
8/3 Körper bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v = v_1 - v_2$ in Richtung der größeren Geschwindigkeit

3. v_1 senkrecht zu v_2 (z. B. Fähre über einen Fluß)



8/4 Der Körper bewegt sich mit der resultierenden Geschwindigkeit v_R, die geometrisch die Diagonale des aus v_1 und v_2 gebildeten Rechtecks ist

4. v_1 und v_2 stehen in einem beliebigen Winkel zueinander.



8/5 Der Körper bewegt sich mit der resultierenden Geschwindigkeit v_R, die geometrisch die Diagonale des aus v_1 und v_2 gebildeten Parallelogramms ist

Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Ein Körper bewegt sich gleichmäßig beschleunigt, wenn die Geschwindigkeitsänderung in gleichen Zeitabschnitten konstant ist.

▷ **Der Quotient aus Geschwindigkeitsänderung und der dazu benötigten Zeit t heißt mittlere Beschleunigung a.**

Man bestimmt sie, indem die Geschwindigkeit zu Beginn (v_0) und am Ende (v) eines Zeitintervalls t gemessen und dann der Quotient aus der Geschwindigkeitsdifferenz und dem Zeitintervall gebildet wird.

▷ $$a = \frac{v - v_0}{t}$$

Beginnt die Geschwindigkeitsänderung aus der Ruhelage, dann ist $v_0 = 0$, und wir erhalten:

▷ $$a = \frac{v}{t} \quad \text{und} \quad v = a \cdot t$$

Die so ermittelten Werte der Beschleunigung sind Durchschnittswerte. Die Beschleunigung ist eine vektorielle Größe (↗ S. 14).

▶ **Maßeinheit der Beschleunigung**

ist Meter je Sekundenquadrat $\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\right)$.

Die Beschleunigung $1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ erfährt ein Körper, dessen Geschwindigkeit sich während der Zeit 1 s gleichmäßig um $\frac{1\,\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ ändert.

Es sind auch alle Einheiten zulässig, die als Quotient aus einer zulässigen Längeneinheit und dem Quadrat einer zulässigen Zeiteinheit gebildet werden.

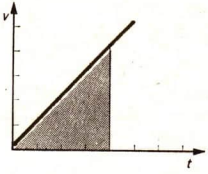
Beschleunigungen treten z. B. beim Anfahren und Bremsen eines Fahrzeuges auf. Beim Bremsen ist die Beschleunigung der Geschwindigkeit entgegen gerichtet. Auch die Bewegung eines Körpers auf der geneigten Ebene ist gleichmäßig beschleunigt.

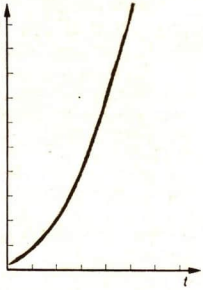
Das Weg-Zeit-Gesetz der beschleunigten Bewegung

Im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm (Bild 10/1) entspricht der Inhalt des Dreiecks dem Weg s: $s = \frac{v \cdot t}{2}$. Es ist aber $v = a \cdot t$.

Für den zurückgelegten Weg zum Zeitpunkt t ergibt sich:

$$\triangleright\ s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$





10/1 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung
Die Gerade läßt die lineare Zunahme der Geschwindigkeit erkennen

10/2 Weg-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Beispiel Ein Eisenbahnzug wird mit $0{,}3\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ beschleunigt.
Welchen Weg hat er nach 5 Sekunden zurückgelegt?

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2\ ;\ s = \frac{1}{2} \cdot 0{,}3\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5^2 \cdot \text{s}^2;\ \underline{\underline{s = 3{,}75\ \text{m}}}$$

Der freie Fall

ist ein Sonderfall einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung eines Körpers.
Die Beschleunigung eines Körpers beim freien Fall heißt **Fallbeschleunigung g**. Es ergibt sich:

Fallweg: $s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$; **Fallgeschwindigkeit:** $v = g \cdot t$.

Der Wert für die Fallbeschleunigung auf der Erde beträgt etwa $9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Der Wert in 45° nördlicher Breite in Höhe des Meeresspiegels beträgt $9{,}80665\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. In unseren Breiten wird oft mit $9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gerechnet. Für Näherungsrechnungen genügt auch der Näherungswert $g = 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Beispiel Welche Zeit benötigt ein Körper, um eine Strecke von 75 m zu durchfallen?

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2; \qquad t = \sqrt{\frac{2\,s}{g}}; \qquad t = \sqrt{\frac{150\,m}{10\,\frac{m}{s^2}}}; \qquad \underline{\underline{t = 3{,}8\,s}}$$

Die Gesetzmäßigkeiten beim freien Fall untersuchte der italienische Physiker GALILEO GALILEI (1564 bis 1642), der als Begründer der Experimentalphysik gilt.

Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell.

Läßt man eine Bleikugel und eine Flaumfeder in einem luftleer gepumpten Rohr gleichzeitig nach unten fallen, dann treffen beide gleichzeitig am Boden auf.

Der Wurf

Beim Wurf überlagern sich zwei Bewegungen. Die eine Bewegung ist der freie Fall, die andere Bewegung ist eine gleichförmige Bewegung und wird durch die Wurfrichtung und die Abwurfgeschwindigkeit vorgegeben.

Der senkrechte Wurf nach oben

Die Anfangsgeschwindigkeit und die Fallbeschleunigung sind entgegengesetzt gerichtet. Infolge des Abwurfs würde ein Körper in der Zeit t den Weg $s_1 = v_0 \cdot t$ zurücklegen. Der Fallweg in der gleichen Zeit t ist $s_2 = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$. Damit ergibt sich für den Abstand des Körpers von der Abwurfstelle:

Wurfweg nach oben: $s = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$

Die **Geschwindigkeit** zum Zeitpunkt t ergibt sich als Differenz aus der Anfangsgeschwindigkeit und der Fallgeschwindigkeit:

$$v = v_0 - g \cdot t$$

Der senkrechte Wurf nach unten

Die Anfangsgeschwindigkeit und die Fallbeschleunigung sind gleich gerichtet. Wege und Geschwindigkeiten addieren sich jeweils.

Wurfweg nach unten: $s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$

Geschwindigkeit: $v = v_0 + g \cdot t$

Der waagerechte Wurf

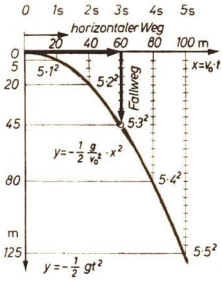
Die Anfangsgeschwindigkeit ist horizontal gerichtet.

In einem rechtwinkligen Koordinatensystem ergibt sich für den waagerechten Weg $x = v_0 \cdot t$ und für den Fallweg

$$-y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2.$$

Die **Gleichung der Wurfkurve** erhält man, wenn aus einer Gleichung die Zeit t ausgerechnet und in die andere eingesetzt wird. Es ergibt sich:

$$y = -\frac{1}{2} \cdot \frac{g}{v_0^2} \cdot x^2.$$



12/1 Die Kurve des waagerechten Wurfes ist eine Parabel

Die krummlinige Bewegung

ist eine Bewegungsart, bei der sich ständig die Richtung der Geschwindigkeit ändert.

Beispiel Kreisbewegung (↗ S. 12)

Die Kreisbewegung

ist eine spezielle krummlinige Bewegung eines Massenpunktes (↗ S. 6), dessen Bahn ein Kreis ist. Durch eine Kraft wird der Massenpunkt gezwungen, ständig den Radius r von einem Zentrum einzuhalten.
Wenn die Bahngeschwindigkeit des Massenpunktes einen konstanten Betrag hat, spricht man von **gleichförmiger Kreisbewegung**. Da sich aber die Richtung der Geschwindigkeit ständig ändert, handelt es sich tatsächlich um eine beschleunigte Bewegung (↗ S. 9).

Die Bahngeschwindigkeit der gleichförmigen Kreisbewegung

Die Zeit für einen vollen Umlauf heißt **Umlaufzeit** T.
Der reziproke Wert der Umlaufzeit T heißt **Umlaufzahl** n oder **Umlauffrequenz**.

▷ $$n = \frac{1}{T} \quad \text{und} \quad T = \frac{1}{n}$$

Die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung (↗ S. 7) errechnet man aus $v = \frac{s}{t}$. In der Umlaufzeit T legt ein Punkt den

Kreisumfang $2 \cdot r \cdot \pi$ zurück. Also ist die **Bahngeschwindigkeit**

▷ $\boldsymbol{v = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{T}}$ oder für $T = \frac{1}{n} \rightarrow \boldsymbol{v = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n}$.

Bei einer gleichförmigen Drehbewegung (↗ S. 6) führt jeder Punkt des Körpers eine gleichförmige Kreisbewegung aus.

Kräftegleichgewicht bei ruhenden Körpern

Die Kraft

Eine Kraft kann nach ihren Wirkungen beurteilt werden. Es sind zu unterscheiden:

▷ **Die statische Wirkung einer Kraft:**
Durch eine Kraft kann ein Körper verformt werden.

Die dynamische Wirkung einer Kraft:
Der Bewegungszustand eines Körpers wird verändert (↗ S. 18).

Für manche Kräfte sind besondere Bezeichnungen üblich, zum Beispiel Gewicht, Reibungskraft (↗ S. 19), Zentripetalkraft (↗ S. 21). Das Gewicht ist eine Wirkung der Schwerkraft (↗ S. 22).

Das Gewicht ist vom Ort abhängig.

Das Gewicht eines Körpers auf der Erde ist am Pol größer als am Äquator und auf einem hohen Berg geringer als in Meeresspiegelnähe.

▶ **Maßeinheiten der Kraft**
sind z. B. das Newton (N) (↗ S. 19), das Dyn (dyn) und das Kilopond (kp).

Umrechnungstabelle ↗ Seite 192

Der Druck

Die auf eine Fläche eines Körpers senkrecht wirkende Kraft wird **Druckkraft** genannt.

▷ **Der Druck p ist gleich dem Quotienten aus einer Druckkraft F und der gedrückten Fläche A.**

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

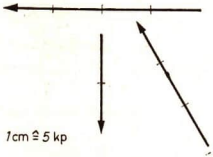
▶ **Maßeinheit des Druckes**

ist z. B. das Kilopond je Quadratzentimeter $\left(\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}\right)$.

Weitere Maßeinheiten (↗ S. 33) und Umrechnungen (↗ S. 193).

Darstellung von vektoriellen Größen

Physikalische Größen (z. B. die Kraft, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung), die durch Richtung und Betrag eindeutig bestimmt sind, lassen sich durch Vektoren darstellen. Sie heißen vektorielle Größen.



14/1 Der Pfeil gibt die Wirkungslinie an und die Richtung, in der die Kraft wirkt. Die Wirkungslinie ist die durch den Angriffspunkt der Kraft in Richtung der Kraft gehende Gerade. Die Länge des Pfeils in Verbindung mit einem Maßstab veranschaulicht den Betrag der Kraft

Diese vektoriellen Größen können durch eine gerichtete Strecke dargestellt werden, die die Richtung der Größe hat und deren Länge dem Betrag der Größe proportional ist.

Zusammensetzen von Kräften

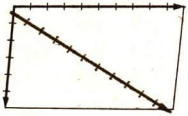
Wirken zwei oder mehrere Einzelkräfte (auch Komponenten genannt) auf einen Körper, so kann man sie zu einer Gesamtkraft (Resultierende oder resultierende Kraft genannt) zusammensetzen.

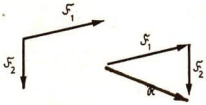
Gleiche Wirkungslinie

14/2 Haben **gleichgerichtete Kräfte** die gleiche Wirkungslinie, so ist der Betrag der Gesamtkraft gleich der Summe der Beträge der Einzelkräfte $F = F_1 + F_2$

15/1 Haben **entgegengesetzt gerichtete Kräfte** die gleiche Wirkungslinie, so ist der Betrag der Gesamtkraft gleich der Differenz der Beträge der Einzelkräfte $F = F_1 - F_2$

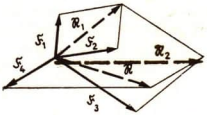
Gemeinsamer Angriffspunkt

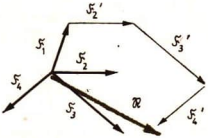




15/2 Die Resultierende zweier Kräfte, die an einem Punkt in beliebiger Richtung angreifen, wird mit Hilfe des **Parallelogramms** der Kräfte ermittelt

15/3 Die Resultierende kann auch mit Hilfe des **Kraftecks** ermittelt werden

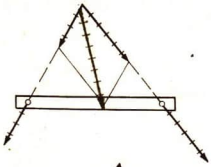




15/4 Greifen an einem Punkt eines Körpers mehr als zwei Kräfte an, so ermittelt man zuerst die Resultierende R_1 aus zwei Einzelkräften (F_1 und F_2). R_2 ermittelt man dann aus R_1 und einer weiteren Einzelkraft F_3. Dieses Zusammensetzen wird so lange fortgeführt, bis alle Kräfte erfaßt sind

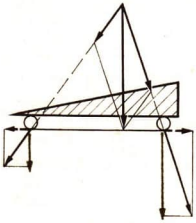
15/5 Die Resultierende in einer Ebene liegender Kräfte ermittelt man zweckmäßig durch Anwenden des **Kräftepolygons.** Hierbei werden die Kräfte so weit parallel verschoben, daß sie aneinandergesetzt werden können

Verschiedene Angriffspunkte



15/6 Greifen zwei Kräfte an einem Körper mit **verschiedenen Angriffspunkten** an, so kann man die beiden Kräfte bis zum Schnittpunkt der beiden Wirkungslinien verschieben

Parallele Kräfte

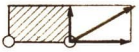


15/7 **Parallelen Kräften** fügt man zwei gleich große entgegengesetzt gerichtete Kräfte hinzu. Man ermittelt die resultierenden Kräfte, verschiebt diese bis zum Schnittpunkt und ermittelt daraus die resultierende Kraft der beiden Einzelkräfte

Zerlegen von Kräften

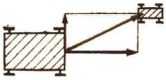
Eine Kraft läßt sich in zwei Komponenten vorgegebener Richtung zerlegen. Von der einen Komponente kann man auch die Richtung und den Betrag vorgeben.

Wirkt eine Kraft nicht in Bewegungsrichtung, so ist für die Bewegung des Körpers nur die Bewegungskomponente wirksam.



Ziehen eines Handwagens

Kraft wird in Hub- und Bewegungskomponente zerlegt.



Ziehen eines Eisenbahnwagens durch einen Traktor

Kraft wird in Druck- und Bewegungskomponente zerlegt.

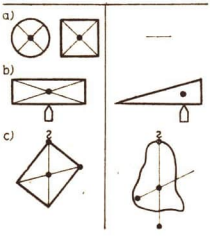
Fahrzeug auf geneigter Ebene

Gewicht wird in Normalkraft und Hangabtriebskraft zerlegt.

Schwerpunkt

Bei Körpern, die nur der Schwerkraft unterworfen sind, ist der Schwerpunkt der **Massenmittelpunkt**. Es ist der Punkt, in dem man sich die gesamte Masse des Körpers vereinigt denken kann.

Dieser Massenpunkt ist ein Denkmodell. Es ist möglich, den Schwerpunkt als Angriffspunkt der Kraft zu betrachten.



16/2 Der Schwerpunkt kann zum Beispiel ermittelt werden:
a) zeichnerisch,
b) experimentell durch Ausbalancieren,
c) experimentell, indem man den Körper nacheinander an zwei Punkten aufhängt und die Lote durch die Aufhängepunkte zum Schnitt bringt

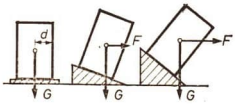
Gleichgewichtslagen

Ein Körper befindet sich im Gleichgewicht, wenn alle auf ihn einwirkenden Drehmomente (↗ S. 28) sich gegenseitig aufheben (wenn die Summe der Drehmomente gleich 0 ist), und die resultierende Kraft

Null ist. Nach dem Verhalten der Körper bei kleinen Lageänderungen unterscheidet man drei Gleichgewichtslagen:

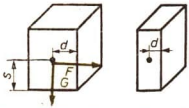
Gleichgewichtslage	Kennzeichen	Beispiele
Stabiles Gleichgewicht	Der Schwerpunkt wird bei einer kleinen Lageänderung stets gehoben.	Schaukel, Wandpendel, Wandbild, Stehaufmännchen
Labiles Gleichgewicht	Der Schwerpunkt liegt über dem Unterstützungspunkt. Der Schwerpunkt senkt sich bei einer kleinen Lageänderung.	Stabhochsprung Seiltänzer
Indifferentes Gleichgewicht	Der Schwerpunkt liegt in Höhe des Unterstützungspunktes. Bei einer kleinen Lageänderung bleibt der Schwerpunkt stets in gleicher Höhe.	Schwungräder, Turbinenlaufräder, Fahrzeugräder, Propeller

Standfestigkeit



ist die Eigenschaft eines Körpers, entgegen einer Kraftwirkung in seiner Lage zu verharren.
Man unterscheidet das Kippmoment $F \cdot s$ und das Standmoment $G \cdot d$. Setzt man beide Momente (↗ S. 28) gleich, so erhält man mit der Kippkraft F ein Maß für die Standfestigkeit:

$$F = \frac{G \cdot d}{s}$$



$G \cdot d = 1500\,\text{p} \cdot 10\,\text{cm}$ $\quad$ $1500\,\text{p} \cdot 5\,\text{cm}$
$= \underline{15\,000\,\text{pcm}}$ $\quad$ $= \underline{7500\,\text{pcm}}$

17/3 Ein Körper steht um so fester,

je größer sein Gewicht ist,

je tiefer sein Schwerpunkt liegt und

je größer der Abstand der Kippkante von der Schwerelinie ist

Kraft und Bewegung

Die Lehre vom Zusammenhang zwischen der Kraft und der Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers wird als **Dynamik** bezeichnet.

Die Masse

Alle Körper haben eine bestimmte Masse. Die Körper haben die Eigenschaften, träge und schwer zu sein.

▶ **Maßeinheit der Masse**
ist das Kilogramm (kg).
Das Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps. Weitere Einheiten sind das Gramm (g) und die Tonne (t).

1 g = 0,001 kg 1 t = 1000 kg

Das erste Newtonsche Prinzip

Drei von ISAAC NEWTON formulierte Prinzipien werden als Grundgesetze der Dynamik bezeichnet.

▶ **Jeder Körper ist träge. Er beharrt in Ruhe oder in gleichförmiger geradliniger Bewegung, solange die resultierende Kraft aller einwirkenden Kräfte Null ist.**

Dieses Gesetz wird auch **Trägheitssatz** genannt.

Die Trägheit beobachtet man z. B. beim Anfahren und Halten eines Zuges. Fährt der Zug an, so fällt man nach hinten, da unser Körper seine Ruhestellung erhalten will.
Die Trägheit eines Körpers wird durch die physikalische Größe **Masse** charakterisiert.

▶ **Ein Körper ändert seinen Bewegungszustand, wenn die auf ihn einwirkenden Kräfte einander nicht aufheben.**

Das zweite Newtonsche Prinzip

▶ **Die Kraft F ist gleich dem Produkt aus Masse m und Beschleunigung a.**

$$F = m \cdot a$$

Dieses Gesetz wird auch **Grundgesetz der Dynamik** oder **Kraftwirkungsgesetz** genannt.

▶ **Die Maßeinheit der Kraft**

ist aus den Einheiten der Masse und der Beschleunigung abgeleitet:

$\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$. **Man nennt sie Newton (N).** $1\,\text{N} = \frac{1\,\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}$

Eine Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg eine Beschleunigung von $\frac{1\,\text{m}}{\text{s}^2}$ **erteilt, ist gleich 1 Newton.**

Umrechnungen von Maßeinheiten der Kraft ↗ Seite 192

Ist die Beschleunigung a gleich der Fallbeschleunigung g, so nennt man die Druckkraft, mit der ein Körper auf seine Unterlage drückt, das **Gewicht** des Körpers.

Das dritte Newtonsche Prinzip

Eine Kraft kann nie für sich allein auftreten.

▶ **Zu jeder Kraft gehört eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft.**

Dieses Gesetz wird auch **Gegenwirkungsprinzip** genannt.

Beispiele Bei einer auseinandergezogenen Feder ist die angreifende Kraft, z. B. die Muskelkraft, mit der Kraft der Feder im Gleichgewicht.
Beim Heranziehen eines Körpers mit der Hand empfindet man einen Zug in entgegengesetzter Richtung.
Die Anwendung dieses Prinzips findet man z. B. auch in der Rakete. Die Teilchen der Verbrennungsgase treffen auf die Wände der Brennkammer. Ist die Kammer vollständig geschlossen, so gleichen sich die Stoßkräfte aus, und die Kammer bleibt in Ruhe. Wird an einer Stelle eine Öffnung angebracht (Düse), werden die Verbrennungsgase durch den Gasdruck beschleunigt, und die Gegenkraft zu diesen Beschleunigungskräften treibt die Rakete vorwärts.

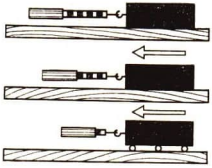
Die Reibung

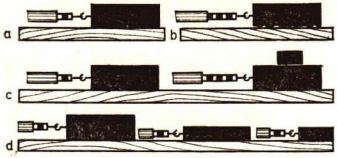
Die Haftreibungskraft muß überwunden werden, um einen Körper, der auf einer Unterlage ruht, in Bewegung zu setzen.

Die Gleitreibung und **Rollreibung** (Wälzwiderstand) treten während des Bewegungsvorganges auf. Die Rollreibungskraft ist dabei um ein vielfaches geringer als die Gleitreibungskraft (Bild 19/1).

Die Reibungskraft F_R ist eine Kraft, die der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist.

19/1

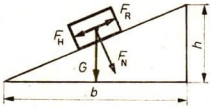




20/1

Die Reibungskraft ist **abhängig**
vom **Stoff** (Bild 20/1 a) (Adhäsionskräfte zwischen den Stoffen),
von der **Beschaffenheit der Oberflächen** (Bild 20/1 b),
vom **Gewicht** G bzw. der **Normalkraft** F_N, mit welcher der Körper (Bild 20/1 c) auf die Unterlage drückt.
Die Reibungskraft (bei einem Körper) ist **unabhängig**
von der **Größe der sich berührenden Flächen** (Bild 20/1 d).

▷ $\boldsymbol{F_R = \mu \cdot F_N}$ $\qquad$ $\boldsymbol{F_R = \mu_o \cdot F_N}$



20/2 Die Normalkraft F_N ist die Kraft, mit der der Gleitkörper infolge seines Gewichtes senkrecht gegen die Unterlage gepreßt wird

Durch Schmiermittel werden die reibenden Stoffe voneinander getrennt. Zum Beispiel ist die Reibungskraft zwischen Ölschichten u. ä. geringer als die Reibungskraft zwischen den Flächen fester Stoffe.

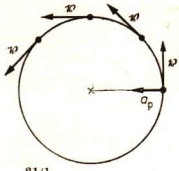
Reibungskoeffizienten

sich reibende Stoffe	Haftreibungszahl μ_0	Gleitreibungszahl μ
Stahl auf Stahl	0,15	0,10
Metall auf Holz	0,5 bis 0,6	0,2 bis 0,5
Holz auf Holz	0,65	0,2 bis 0,4
Lederriemen auf Metallguß	0,56	0,28

Die Zentripetalkraft, die Zentripetalbeschleunigung

Bei der gleichförmigen Kreisbewegung (↗ S. 12) ändert sich ständig die Richtung der Geschwindigkeiten (Bild 21/1). Nach dem 1. Newtonschen Prinzip ist das nur möglich, wenn eine Kraft auf einen

Körper einwirkt. Es findet eine Beschleunigung senkrecht zur Geschwindigkeit statt, damit der Körper auf seiner Bahn bleibt. Diese Beschleunigung heißt **Zentripetalbeschleunigung** (auch Zentralbeschleunigung genannt) a_p.
Die sie verursachende Kraft heißt **Zentripetalkraft** F_p (auch Zentralkraft), diese wirkt ebenfalls in Richtung des Radius.



21/1

Den Betrag der Zentripetalbeschleunigung errechnet man aus der Gleichung

▷ $$a_p = \frac{v^2}{r}.$$

Die Zentripetalkraft erhält man aus dem 2. Newtonschen Prinzip (↗ S. 18), wenn man für a die Zentripetalbeschleunigung einsetzt:

▷ $$F_p = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

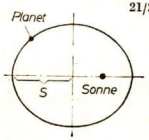
Ein Beobachter, der sich mit dem Körper auf der Kreisbahn bewegt, verspürt eine Kraft nach außen, die **Fliehkraft** F_f (auch Zentrifugalkraft genannt). Sie ist dem Betrag nach gleich der Zentripetalkraft.

Die Fliehkraft ist eine Trägheitskraft, sie wird nur vom mitbewegten Beobachter wahrgenommen. Es ist oft zweckmäßig, diesen Standpunkt einzunehmen. Die Gegenkraft zur Zentripetalkraft verspürt man als Zugkraft bei einem an einem Strick geschleuderten Stein. In der Technik nutzt man die an bewegten Körpern angreifende Fliehkraft aus (Kreiselpumpen, Fliehkraftregler, Zentrifuge). Die Überhöhung von Straßenkurven soll verhindern, daß Fahrzeuge aus der Bahn getragen werden.

Die Gravitation

Alle Körper haben auf Grund ihrer Masse die Eigenschaft, sich gegenseitig anzuziehen. Diese Eigenschaft heißt **Gravitation**, die Anziehungskraft heißt **Gravitationskraft**.

Die Keplerschen Gesetze



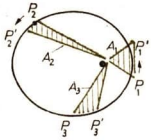
21/2

1. Gesetz:

▷ **Alle Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.**

2. Gesetz:

▷ **Ein von der Sonne zum Planeten gezogener Leitstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.**



22/1

Folgerung:

Der Betrag der Geschwindigkeit ist nicht konstant (in Sonnennähe ist sie größer als in Sonnenferne).

3. Gesetz:

▷ **Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen s ihrer Bahnen.**

$(T_1^2 : T_2^2 = s_1^3 : s_2^3)$

Folgerung:

Der Quotient $\frac{T^2}{s^3}$ ist für alle Planeten eines Sonnensystems konstant.

Das Gravitationsgesetz

▷ **Zwei Körper ziehen sich gegenseitig mit einer Kraft an, die dem Produkt ihrer Massen direkt, dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist.**

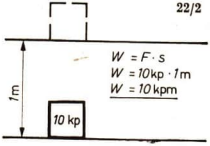
$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Die Konstante k ist die **Gravitationskonstante**, sie ist eine universelle Konstante. Ihr Wert beträgt: $k = \frac{(6{,}670 \pm 0{,}007)}{10^{11}} \frac{\mathrm{N\,m^2}}{\mathrm{kg^2}}$.

Die Schwerkraft an der Erdoberfläche beruht auf der Gravitation. Beim Start von künstlichen Raumkörpern muß die Geschwindigkeit so gewählt werden, daß die Anziehungskraft der Erde überwunden wird. Die Kreisbahngeschwindigkeit beträgt 7,9 $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ (1. astronautische Geschwindigkeit). Soll der künstliche Raumkörper den Gravitationsbereich der Erde verlassen, so ist eine Entweichgeschwindigkeit von 11,2 $\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$ nötig (2. astronautische Geschwindigkeit).

Energie

Die Arbeit

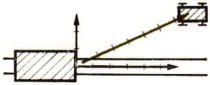


22/2

Wird ein Körper gehoben oder wird allgemein eine Kraft gegen einen Widerstand wirksam, so wird eine Arbeit verrichtet.

▷ **Unter Arbeit versteht man das Produkt aus aufgewendeter Kraft und zurückgelegtem Weg, wenn Kraftrichtung und Bewegungsrichtung zusammenfallen.**

$$W = F \cdot s$$



23/1 Wird ein Eisenbahnwagen zum Beispiel von einem neben den Schienen fahrenden Traktor fortbewegt, so ist durch die seitliche Verschiebung — Druckkomponente — die in Bewegungsrichtung wirkende Kraft geringer als die aufgewendete Kraft

▶ **Maßeinheiten der Arbeit**

sind z. B. das Newtonmeter (Nm), das Joule (J), die Wattsekunde (Ws).

1 Nm = 1 J = 1 Ws

Das Newtonmeter, das Joule oder die Wattsekunde ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn ein Körper von einer Kraft von 1 Newton in Richtung der Kraft um 1 Meter verschoben wird.
Eine weitere Maßeinheit der Arbeit ist das Kilopondmeter (kpm).

1 Nm ≈ 0,102 kpm

Das Kilopondmeter ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn sich der Angriffspunkt einer Kraft von 1 kp in Richtung der Kraft um 1 m verschiebt.

Umrechnungstabelle zur Arbeit ↗ Seite 194.

Gesetz von der Erhaltung der Arbeit

▶ **Bei allen kraftumformenden Einrichtungen ist die Arbeit auf der Kraftseite gleich der Arbeit auf der Lastseite.**

$$W_1 = W_2 \qquad F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$$

Last ist die dabei zu überwindende Kraft.

Die Leistung

▷ **Unter Leistung P versteht man den Quotienten aus einer Arbeit W und der Zeit t, in der die Arbeit verrichtet wird.**

$$P = \frac{W}{t}$$

▶ **Maßeinheiten der Leistung**

sind z. B. das Watt (W) und das Kilopondmeter je Sekunde $\left(\frac{\text{kpm}}{\text{s}}\right)$.

Das Watt ist die Leistung von $1\,\frac{J}{s}$.

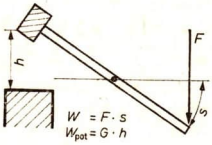
Bei Kraftfahrzeugen erfolgt die Leistungsangabe noch in Pferdestärken (PS).
Umrechnungstabelle zur Leistung ↗ Seite 195.

Mechanische Energie

Es gibt zwei Arten der mechanischen Energie: die Lageenergie und die Bewegungsenergie.

Lageenergie (potentielle Energie)

Beim Heben eines Körpers muß die Arbeit $W = G \cdot s$ aufgewendet werden. Beim Herabfallen kann der Körper diese Arbeit wieder verrichten. Diese aufgespeicherte Hubarbeit nennt man das **Arbeitsvermögen** des gehobenen Körpers oder seine **potentielle Energie** oder **Lageenergie** W_{pot}.



24/1 Potentielle Energie eines Hammers

▷ **Die Lageenergie W_{pot} eines gehobenen Körpers ist gleich dem Produkt aus seinem Gewicht G und der Höhe s, um die er gehoben wurde.**

$$W_{pot} = G \cdot s$$

▶ **Die Maßeinheiten sind die gleichen wie die Maßeinheiten der Arbeit und des Drehmoments.**

Es ist aber zu beachten:

Das Drehmoment (↗ S. 28) ist eine Größe, die sich auf den Gleichgewichtszustand eines drehbaren Körpers bezieht; die Arbeit (↗ S. 23) ist das Ergebnis eines zeitlich ablaufenden Vorganges; die Energie ist eine Zustandsgröße, die über die Fähigkeit eines Körpers aussagt, Arbeit zu verrichten.

Bewegungsenergie (kinetische Energie)

Jeder in Bewegung befindliche Körper vermag Arbeit zu verrichten. Das Arbeitsvermögen eines bewegten Körpers nennt man auch **kinetische Energie** oder **Bewegungsenergie** W_{kin}.

▷ **Die Bewegungsenergie W_{kin} eines Körpers hängt von seiner Masse m und von seiner Geschwindigkeit v ab.**

$$W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

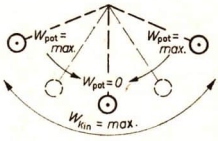
(Nur gültig, wenn v sehr viel kleiner als c; c: Lichtgeschwindigkeit ↗ S. 124.)

Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie

▶ **Bei der Umwandlung der mechanischen Energieformen ineinander bleibt die Summe der mechanischen Energie erhalten, wenn man von Reibungsverlusten – Umwandlung in Wärmeenergie – absieht.**

$$W_{pot} + W_{kin} = \text{const.}$$

Das Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie ist nur ein Sonderfall des allgemeingültigen SATZES VON DER ERHALTUNG DER ENERGIE (↗ S. 66 und S. 95).



25/1
Energieumwandlung am Pendel

Der Wirkungsgrad

Ein Teil der Antriebsarbeit einer Maschine wird stets durch Reibung in Wärme umgewandelt. Die abgegebene Leistung oder **effektive Leistung** P_e (Nutzleistung genannt) ist immer kleiner als die aufgenommene oder **indizierte Leistung** P_i (Antriebsleistung genannt).

▷ **Den Quotienten aus der effektiven Leistung P_e und der indizierten Leistung P_i nennt man den Wirkungsgrad η einer Maschine.**

$$\eta = \frac{P_e}{P_i} \qquad \eta\text{: Eta}$$

Der Wirkungsgrad ist immer kleiner als eins ($\eta < 1$) und wird oft in Prozent angegeben (z. B. $\eta = 0{,}8$; $\eta = 80\,\%$).

Einfache kraftumformende Einrichtungen

Der Hebel

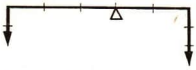
Ein Hebel ist ein starrer Körper (↗ S. 6), der drehbar gelagert ist und zum Übertragen von Kräften benutzt wird. Er wird meist so verwendet, daß eine kraftsparende Wirkung eintritt.

Hebelgesetz

▷ **Ein Hebel ist im Gleichgewicht, wenn das Produkt aus Kraft F_1 und Kraftarm l_1 gleich dem Produkt aus Kraft F_2 und Kraftarm l_2 ist.**

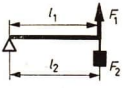
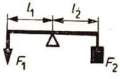
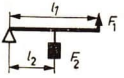
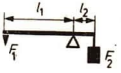
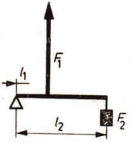
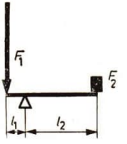
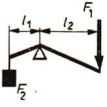
$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$$

Die Gleichgewichtsbedingungen beim Hebelgesetz – ein Sonderfall des Momentensatzes (↗ S. 28) – gelten, wenn die Kräfte senkrecht zum Hebel wirken.



26/1 Gleichgewicht bei rechtwinklig angreifenden Kräften

Einteilung der Hebel

	einseitig	Beispiel	zweiseitig	Beispiel
gleicharmig				Balkenwaage, Wippe
ungleicharmig		Sicherheitsventil, Nußknacker, Schubkarren		Dezimalwaage, Türklinke
Wurfhebel		Unterarm		
Winkelhebel				Typenhebel an Schreibmaschine

Rollen, Flaschenzüge, Wellrad

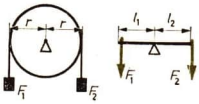
Die Rollen dienen zur Übertragung von Kräften mittels Seilen. Dabei verhalten sich ihre Radien wie Hebelarme.

Die feste Rolle dient zum Ändern der Richtung einer Kraft – Umlenkrolle –. Sie wirkt wie ein zweiseitiger gleicharmiger Hebel.

An der festen Rolle herrscht Gleichgewicht, wenn die Kraft F_1 gleich der Kraft F_2 ist.

$$F_1 = F_2$$

Die lose Rolle wirkt wie ein einseitiger ungleicharmiger Hebel.



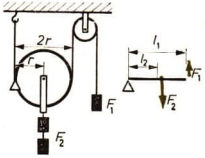
27/1 Feste Rolle — zweiseitiger gleicharmiger Hebel

An der losen Rolle herrscht Gleichgewicht, wenn die am freien Seilende angreifende Kraft F_1 halb so groß wie die Kraft F_2 ist.

$$F_1 = \frac{F_2}{2}$$

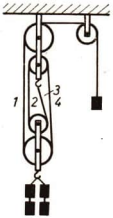
Der Flaschenzug besteht aus einer Anzahl übereinander oder nebeneinander angeordneter fester und loser Rollen. Die aufzuwendende Kraft ergibt sich als Quotient aus der angreifenden Kraft und der Anzahl n der tragenden Seilstücke.

$$F_1 = \frac{F_2}{n}$$



27/2 Lose Rolle — einseitiger ungleicharmiger Hebel
$l_1 = 2\,l_2$; $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$

Das Wellrad ist eine feste Verbindung eines Rades mit einer Welle. Es wirkt wie ein zweiseitiger ungleicharmiger Hebel. Der Radius r_1 des Rades bzw. der Radius r_2 der Welle entsprechen den Hebelarmen.

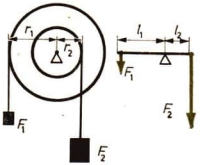


27/3 Flaschenzug

Am Wellrad herrscht Gleichgewicht, wenn das Produkt aus der Kraft F_1 und dem Radradius r_1 gleich ist dem Produkt aus der Kraft F_2 und dem Wellenradius r_2.

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

Die Kurbel entspricht einem Wellrad, dessen Rad bis auf eine Speiche ausgespart wurde.

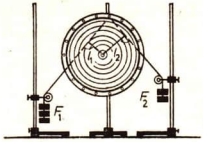


27/4 Wellrad — ungleicharmiger Hebel

Drehmomentensatz bei kraftumformenden Einrichtungen

Mit Hilfe des Drehmomentensatzes lassen sich die Gesetze der kraftumformenden Einrichtungen einheitlich zusammen-

fassen. Greifen Kräfte im beliebigen Winkel an einen drehbaren Körper an, so ist das Produkt aus der Kraft F und dem senkrechten Abstand l der Kraftwirkungslinie vom Drehpunkt – **das Drehmoment M** – wirksam. Diese Zusammenhänge werden durch den Momentensatz erfaßt. Wenn die rechtsdrehenden Momente mit einem negativen Vorzeichen versehen werden, gilt:



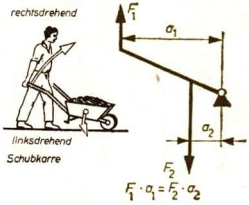
28/1 **Drehmomente bei beliebig angreifenden Kräften**

▷ **Ein um eine Achse drehbarer Körper ist im Gleichgewicht, wenn die Summe aller Drehmomente gleich Null ist.**

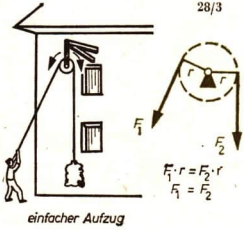
$$F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + \cdots + F_n \cdot l_n = 0$$

$$\boldsymbol{M_1 + M_2 + \cdots + M_n = 0}$$

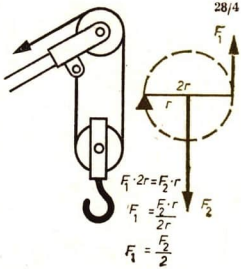
28/2



28/3



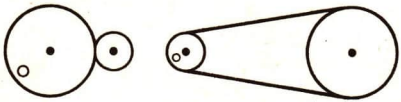
28/4



Die Kraftübertragung

28/5 Reibradtrieb

28/6 Riementrieb

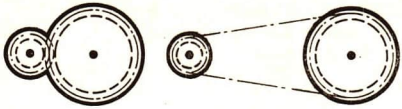


Schlupfmöglichkeit

Der Schlupf ist erwünscht, wenn bei zu hoher Belastung der Maschine der Motor nicht überlastet werden soll, z. B. Dreschmaschine

29/1 Zahnradtrieb

29/2 Kettentrieb

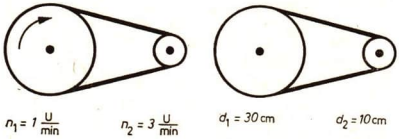


Keine Schlupfmöglichkeit
Der Schlupf ist unerwünscht, wenn trotz hoher Belastung ein Gleichlauf unbedingt erforderlich ist, z. B. Ventilsteuerung

Das Übersetzungsverhältnis

▷ **Das Übersetzungsverhältnis ist gleich dem Quotienten aus Drehzahl des treibenden Rades und Drehzahl des getriebenen Rades.**

$$i = \frac{n_1}{n_2}$$



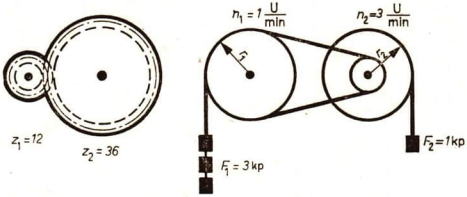
29/3

Das Übersetzungsverhältnis kann auch aus den Umfängen oder Durchmessern ermittelt werden (Bild 29/3).

$$i = \frac{U_2}{U_1}\left(= \frac{31{,}4\text{ cm}}{94{,}2\text{ cm}} = 0{,}3\right); \quad i = \frac{d_2}{d_1}\left(= \frac{10\text{ cm}}{30\text{ cm}} = 0{,}3\right)$$

Bei Zahnrädern gilt (Bild 29/4 links).

$$i = \frac{Z_2}{Z_1}\left(\frac{36}{12} = 3\right)$$



29/4

Mit einem Getriebe kann eine zu übertragende Kraft vergrößert oder verkleinert werden, wenn ein Rad des Getriebes ein Wellrad ist (Bild 29/4 rechts).

▷ Wenn $r_1 = r_2$, dann gilt $F_2 = F_1 \cdot i$.

Beispiel Kraftübertragung an einem Fahrrad

Tretkurbel: $l = 20$ cm
Tretrad: $r = 10$ cm; $Z = 40$ } Wellrad
Kettenrad: $r = 4$ cm; $Z = 16$
Hinterrad: $r = 40$ cm } Wellrad

Treibende Kraft: $F_1 = 2$ kp

Rechnung:

Wellrad: $$F_2 = \frac{F_1 \cdot r_1}{r_2} = \frac{2\text{ kp} \cdot 20\text{ cm}}{10\text{ cm}} = \underline{\underline{4\text{ kp}}}$$

Kettentrieb: Der Kettentrieb bewirkt lediglich die Übertragung dieser Kraft.

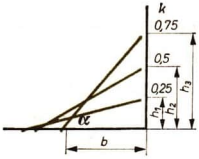
Wellrad: $$F_3 = \frac{F_2 \cdot r_3}{r_4} = \frac{4\text{ kp} \cdot 4\text{ cm}}{40\text{ cm}} = \underline{\underline{0{,}4\text{ kp}}}$$

Am Hinterrad wird eine Kraft von 0,4 kp – Reibungsverluste sind vernachlässigt – wirksam.

Die geneigte Ebene

Die Steigung *k* einer geneigten Ebene ist der Quotient aus der Höhe *h* und der Länge *l*.

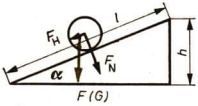
$$k = \frac{h}{l} \qquad \frac{h}{l} = \sin\alpha$$



30/1 Steigungen einer geneigten Ebene bei gleicher Länge

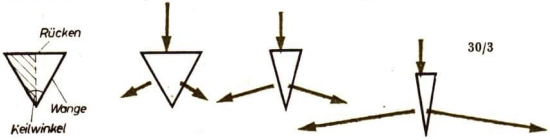
▷ **Die Hangabtriebskraft verhält sich zum Gewicht wie die Höhe zur Länge.**

$$\frac{F_H}{F} = \frac{h}{l}$$



30/2 Körper auf geneigter Ebene

Der Keil wirkt wie eine geneigte Ebene. Bei gleichbleibender **Rückenkraft** sind die **Wangenkräfte** um so größer, je kleiner der **Keilwinkel** ist.



30/3

Alle Werkzeuge der spanabhebenden Formgebung sind Keile.
Spaltkeile: Messer, Beil, Säge, Drehmeißel usw.

Befestigungskeile: Keile in Hammerstielen u. ä., Festkeilen von Stützen beim Bau und im Bergwerk

Verbindungskeile: Verbinden von Maschinenteilen

Die Schraube wirkt wie eine geneigte Ebene. Je kleiner die Ganghöhe – Steigung bei der geneigten Ebene –, um so geringer ist die für eine bestimmte Arbeit aufzuwendende Kraft.

Molekularkräfte

Die Kohäsion

Die Teilchen eines Stoffes werden durch eine Kraft, die **Kohäsionskraft**, zusammengehalten.

31/1

Stahl und ähnliche Stoffe setzen dem Trennen der Teile einen großen Widerstand entgegen. Beim Trennen von Holz u. ä. ist ein geringerer Widerstand zu überwinden.

In Flüssigkeiten sind die Moleküle leicht verschiebbar, die Kohäsionskraft ist aber so groß, daß Flüssigkeiten ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Oberfläche haben.
Bei Gasen sind die Kohäsionskräfte nur unter besonderen Umständen merklich.

Die Adhäsion

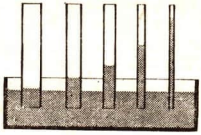
Die **Adhäsionskraft** ist eine Kraft, die die Teilchen unterschiedlicher Stoffe zusammenhält.

Das Haften der Kreide an der Wandtafel, der Farbe an der Wand u. v. a. sind Folge der Adhäsion.
Adhäsionsplatten haften aneinander, weil sich zwischen ihnen ein anderer Stoff – Luft oder Wasser – befindet.

31/2 a) Wasser in einem Reagenzglas: Die Adhäsionskräfte zwischen dem Wasser und dem Glas sind größer als die Kohäsionskräfte im Wasser. Solche Flüssigkeiten heißen **benetzende Flüssigkeiten**
b) Quecksilber in einem Reagenzglas: Die Adhäsionskräfte zwischen dem Quecksilber und dem Glas sind geringer als die Kohäsionskräfte im Quecksilber. Solche Flüssigkeiten heißen **nicht benetzende Flüssigkeiten**

Die Kapillarität

Feine Röhrchen werden Kapillaren oder Haarröhrchen genannt. Die Adhäsionskraft bewirkt, daß z. B. Wasser in Kapillaren steigt (kapillare Erhebung).
Bei manchen Flüssigkeiten, z. B. Quecksilber, tritt eine kapillare Senkung ein.



32/1

Mechanik der Flüssigkeiten und Gase

Das Verhalten ruhender Flüssigkeiten und Gase wird in der *Hydro-* bzw. *Aerostatik* untersucht, das Verhalten strömender Flüssigkeiten und Gase in der *Hydro-* bzw. *Aerodynamik.*

Ruhende Flüssigkeiten und Gase

Die freie Oberfläche

einer Flüssigkeit paßt sich der Erdkrümmung an (Bild 32/2 links). Bei kleineren Oberflächen ist die Krümmung so gering, daß man von waagerechten Ebenen sprechen kann (Bild 32/2 rechts).

32/2

Verbundene Gefäße

heißen solche Gefäße, die unter der Flüssigkeitsoberfläche eine Verbindung aufweisen (Bild 32/3). In nicht zu engen verbundenen Gefäßen liegen die Flüssigkeitsoberflächen in einer waagerechten Ebene. (Die Erscheinungen bei engen Gefäßen ↗ Seite 32 oben)

32/3 a) Geruchsverschluß b) Kanalwaage c) Wasserstandswaage

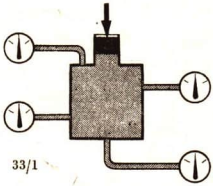
Druckausbreitung in Flüssigkeiten

Das Volumen von Flüssigkeiten kann auch mit sehr großen Drücken (↗ S. 14) nicht wesentlich verringert werden. Ein Druck, der von außen auf eine ruhende Flüssigkeit ausgeübt wird, breitet sich in ihr gleichmäßig nach allen Seiten aus (Bild 33/1).

▷ **Unter Kolbendruck p versteht man den Quotienten aus der Kolbendruckkraft F und der gedrückten Fläche A.**

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

Die Kolbendruckkraft wirkt senkrecht auf die Fläche.



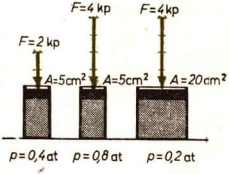
33/1

▶ **Maßeinheiten des Druckes**

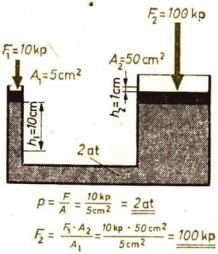
sind z. B. das Newton je Quadratmeter $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

das Kilopond je Quadratzentimeter $\left(\frac{kp}{cm^2}\right)$, auch technische Atmosphäre (at) genannt. $1\,\frac{kp}{cm^2} = 1\,at$

Umrechnungstabelle ↗ Seite 193



33/2 Druck bei verschiedenen Druckkräften und Kolbenflächen



33/3 Schema eines hydraulischen Wagenhebers oder einer hydraulischen Presse

▷ **Die Druckkräfte verhalten sich wie die dazugehörigen Flächen.**

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

Aus dem Gesetz von der Erhaltung der Arbeit (↗ Seite 23) folgt:

▷ **Zwischen den Kräften und Wegen bestehen gleiche Verhältnisse wie zwischen den Kräften und Wegen an starren Körpern.**

$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$$

Der Schweredruck

in einer Flüssigkeit (in einem Gas) entsteht durch das Eigengewicht der Flüssigkeit (des Gases).

▷ **Der Schweredruck p in einer Schicht in der Flüssigkeit ist das Produkt aus der Höhe h der Flüssigkeitssäule über dieser Schicht und der Wichte γ der Flüssigkeit.**

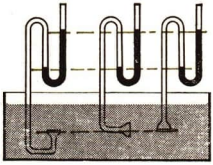
$$p = h \cdot \gamma$$

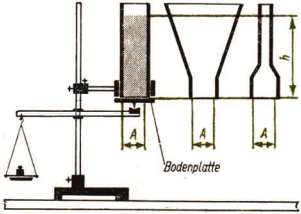
Wenn (ab Klasse 9) die Fallbeschleunigung g bekannt ist, wird mit folgender Größengleichung gerechnet:

▷ $p = h \cdot \varrho \cdot g$ $\qquad$ ϱ **: Dichte** $\qquad$ $\varrho = \frac{m}{V}$

Der Schweredruck einer 10 Meter hohen Wassersäule beträgt eine technische Atmosphäre (1 at).

Je nach Lage der gedrückten Fläche unterscheidet man **Bodendruckkraft, Seitendruckkraft** und **Aufdruckkraft.**





34/1 Der Druck in einer Flüssigkeit ist in gleicher Tiefe nach allen Seiten hin gleich groß

34/2 Die Bodendruckkraft ist von der Form des Gefäßes unabhängig. Sie hängt nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule und der Wichte der Flüssigkeit ab (bei A = const)

Hydrostatischer Druck

heißt die Summe von Kolbendruck und Schweredruck.

Eigenschaften ruhender Gase

Fast keine Kohäsion, Teilchen sind leicht verschiebbar, keine feste Gestalt, sehr geringe Dichte $\left(\text{Luft: } \varrho = 0{,}0013 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$, dehnen sich beim Erwärmen aus (↗ S. 57), sind zusammendrückbar. Der Druck in Gasen breitet sich nach allen Seiten gleichmäßig aus.

Das Boylesche Gesetz

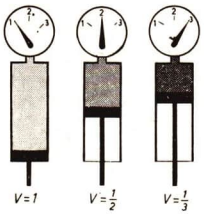
▷ **Bei gleichbleibender Temperatur einer abgeschlossenen Gasmenge ist das Produkt aus Druck und Volumen konstant.**

$p_1 \cdot V_1 = \text{const.}$

Daraus folgt:

$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$ und $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$

(↗ S. 58)



35/1 Darstellung des Boyleschen Gesetzes

Der Luftdruck

Die Erde ist von einer Lufthülle umgeben. Die Luft übt auf alle Körper, die sie umgibt, einen Druck aus. Es wirkt der Schweredruck (↗ S. 34) der Luft, Luftdruck genannt.

▶ **Maßeinheiten**

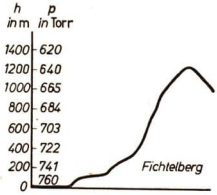
Der mittlere Luftdruck beträgt in Meeresspiegelhöhe 760 Torr, das ist gleich einer physikalischen Atmosphäre (1 atm).

$$1\ \text{atm} = 1{,}033\ \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 1{,}033\ \text{at}$$

1 Torr ist der Druck, der einer Quecksilbersäule von 1 mm Höhe das Gleichgewicht hält. 1 atm = 760 Torr

Für Luftdruckmessungen verwendet man noch die Einheit Bar (bar).

Umrechnungstabelle zum Druck ↗ Seite 193



35/2 Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe. Der Luftdruck verringert sich je 10,5 m Höhenunterschied um etwa 1 Torr. Dies gilt jedoch nur für die unteren Luftschichten; in größeren Höhen erfolgt die Druckverminderung allmählicher

Das Archimedische Gesetz (Der Auftrieb)

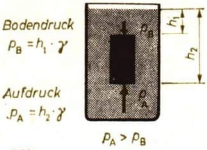
Beim Eintauchen in eine Flüssigkeit bzw. in ein Gas wird ein Körper leichter; er erfährt durch die größere Aufdruckkraft auf die Unterfläche gegenüber der geringeren Bodendruckkraft auf die Oberfläche

(Bild 36/1) eine **Auftriebskraft**, auch **Auftrieb** oder **statischer Auftrieb** genannt.

▷ **Der Auftrieb F_A eines in eine Flüssigkeit bzw. in ein Gas eingetauchten Körpers ist gleich dem Gewicht G_{Fl} der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge bzw. Gasmenge.**

$$F_A = G_{Fl}$$

$$F_A = V_K \cdot \gamma_{Fl} \quad \text{oder} \quad F_A = V_K \cdot \varrho_{Fl} \cdot g$$

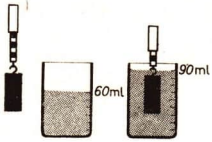


36/1

Beispiel

Wie groß ist das Volumen eines Körpers, der vollkommen in reinem Wasser eingetaucht einen Auftrieb von 30 p erfährt?

$$V = \frac{F_A}{\gamma_{Fl}}; \quad V = \frac{30\ \text{p}}{1\ \frac{\text{p}}{\text{cm}^3}}; \quad \underline{\underline{V = 30\ \text{cm}^3}}$$



36/2
Gewichtsverlust eines Körpers beim Eintauchen in Flüssigkeit

Steigen, schweben, sinken, schwimmen

▷ **Ein Körper**

steigt in einer Flüssigkeit (in einem Gas), wenn sein Gewicht kleiner ist als der Auftrieb ($G_K < F_A$), (er taucht bei einer Flüssigkeit an der Oberfläche nur teilweise ein, man sagt, er schwimmt; es ist $G_K = F_A$);
schwebt in einer Flüssigkeit (in einem Gas), wenn sein Gewicht gleich ist dem Auftrieb ($G_K = F_A$);
sinkt in einer Flüssigkeit (in einem Gas), wenn sein Gewicht größer als der Auftrieb ($G_K > F_A$) ist.

Zu dieser Feststellung kommt man bei massiven Körpern auch durch den Vergleich der Dichte des Körpers mit der Dichte der Flüssigkeit.

Bestimmung der Dichte

Aus der Eintauchtiefe eines Körpers in einer Flüssigkeit kann man die Dichte des Körpers oder der Flüssigkeit bestimmen, wenn die Dichte der Flüssigkeit oder des Körpers bekannt sind.

$$\frac{\text{eintauchendes Volumen}}{\text{Gesamtvolumen des Körpers}} = \frac{\text{Dichte des schwimmenden Körpers}}{\text{Dichte der Flüssigkeit}}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\varrho_K}{\varrho_{Fl}}$$

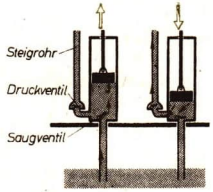
Beispiel

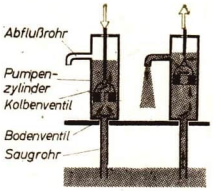
Welche Dichte hat ein mit $\frac{1}{5}$ seines Volumens ins Wasser eintauchender massiver Körper?

$$\varrho_K = \frac{V \cdot \varrho_{Fl}}{V_K} = \frac{0{,}2 \cdot 1 \frac{g}{cm^3}}{1}; \qquad \underline{\underline{\varrho_K = 0{,}2 \frac{g}{cm^3}}}$$

Flüssigkeitspumpen

Die Wirkungsweise der Flüssigkeitspumpen beruht darauf, daß beim Saugen der Luftdruck dem Druck einer Flüssigkeitssäule von bestimmter Höhe das Gleichgewicht hält. Bei Flüssigkeitspumpen erfolgt das Ansaugen durch Erzeugen eines geringeren Druckes (Unterdruckes) als der Druck der Umgebung.





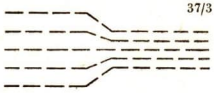
37/1 Prinzip der Saugpumpe: Wird der Kolben nach oben bewegt, so entsteht im Saugrohr ein luftverdünnter Raum, und der Luftdruck drückt das Wasser bis zu 10 m Höhe hoch. Da Kolben den Raum nicht vollkommen abdichten, beträgt die Saughöhe in der Praxis nur 5 bis 7 m

37/2 Die Pumpen sind meist als Saug-Hub-Pumpe oder Saug-Druck-Pumpe ausgebildet

Strömende Flüssigkeiten und Gase

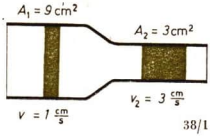
Die stationäre Strömung

Der Weg eines Teilchens in einer Strömung heißt **Bahnlinie (Stromlinie)**, sofern die Strömung ein gleichbleibendes Verhalten zeigt. Die Gesamtheit der Stromlinien einer Strömung bezeichnet man als **Stromlinienbild**. Eine Strömung heißt **stationäre** Strömung (Bild 37/3), wenn sich das Stromlinienbild nicht mit der Zeit ändert.



37/3

Je kleiner der Strömungsquerschnitt ist, d. h. je dichter die Stromlinien verlaufen, um so größer ist die Strömungsgeschwindigkeit (Bild 38/1).



38/1

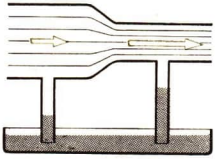
Für inkompressible Flüssigkeiten gilt:

▷ **Das Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsquerschnitt ist bei einer stationären Strömung konstant.**

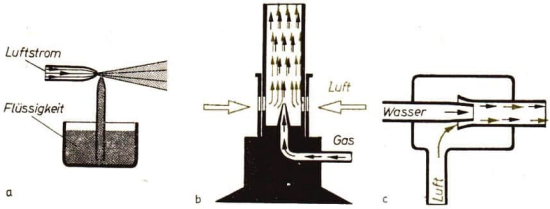
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Druck in strömenden Flüssigkeiten und Gasen

Der Druck, der senkrecht zur Strömungsrichtung gemessen wird, heißt **statischer Druck p_{stat}.**



38/1 Messen des statischen Druckes bei verschiedenen Querschnitten. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit, um so geringer ist der statische Druck



38/2 a) Zerstäuber b) Bunsenbrenner c) Wasserstrahlpumpe

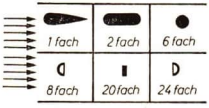
Der Strömungswiderstand

ist die Kraft, die der Bewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit oder in einem Gas entgegenwirkt. Der Strömungswiderstand ist für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich

der angeströmten Fläche proportional,
der Dichte des Mediums proportional,
dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional,
abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers und von seiner Form.

Den geringsten Strömungswiderstand hat ein Stromlinienkörper (Regentropfenform).

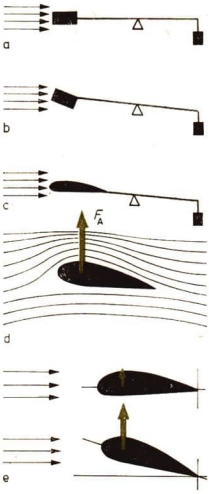
Strömungswiderstand verschieden geformter Körper von gleichem Querschnitt



39/1 Vergleich der Strömungswiderstände

Der dynamische Auftrieb

An der Oberseite einer bewegten Tragfläche entsteht gegenüber der umgebenden Flüssigkeit oder dem umgebenden Gas ein Unterdruck (Sog) und an der Unterseite ein Überdruck. Überdruck und Sog rufen eine Kraft hervor, die **dynamische Auftriebskraft F_A**, kurz **dynamischer Auftrieb** genannt.
Die dynamische Auftriebskraft wird bei Flugzeugen ausgenutzt.



39/2

a) Eine ebene Platte, die waagerecht in einer Strömung steht, erfährt keine Veränderung

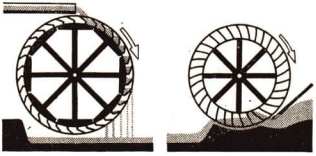
b) Sie wird angehoben, sobald sie winklig zur Strömungsrichtung steht

c) Gibt man der Platte ein besonderes Profil — Tragfläche —, so erfährt sie auch in waagerechter Lage einen **Auftrieb**

d) Stromlinien verlaufen über der Tragfläche sehr eng; deshalb kleinerer statischer Druck gegenüber dem umgebenden Medium — rufen eine Kraft hervor, die **dynamische Auftriebskraft**

e) Der Betrag der Auftriebskraft hängt vom Anstellwinkel ab. Jedoch darf ein bestimmter Winkel nicht überschritten werden

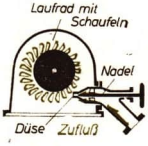
Energieumwandlung in Wasserkraftwerken bei strömenden Flüssigkeiten



39/3 Das **oberschlächtige Wasserrad** wird durch die potentielle Energie der Flüssigkeit angetrieben

39/4 Das **unterschlächtige Wasserrad** wird durch die kinetische Energie der strömenden Flüssigkeit bewegt

40/1 Die **Freistrahlturbine** wird durch die kinetische Energie des Wassers in Bewegung versetzt. Die Schaufeln sind so geformt, daß fast die gesamte kinetische Energie genutzt wird.
Für den Antrieb einer Freistrahlturbine (z. B. Peltonrad) werden nur geringe Wassermengen benötigt; jedoch ist ein hoher Druck erforderlich (hochliegender Stausee)



40/2 Die **Überdruckturbine** wird vorwiegend durch die potentielle Energie des Wassers angetrieben. Die große Wassermenge über dem Leitrad übt einen Druck auf die schrägstehenden Schaufeln aus.
Die Überdruckturbine (z. B. Kaplanturbine) benötigt zum Antrieb sehr große Wassermengen bei einer geringen Gefällhöhe

Mechanische Schwingungen und Wellen

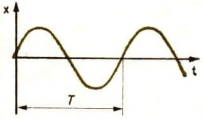
Schwingungen

Wiederholt sich ein Bewegungszustand in gleichen Zeitabschnitten in allen Einzelheiten, dann bezeichnet man ihn als **periodische Bewegung** oder auch als **Schwingung**

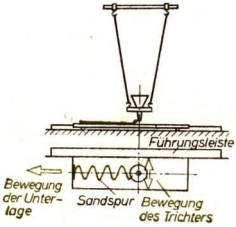
▷ **Die mechanische Schwingung ist ein periodischer Vorgang, bei dem sich ständig potentielle und kinetische Energie ineinander umwandeln.**
(↗ S. 24)

Darstellung einer Schwingung

Die Schwingung kann in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt werden (Bild 40/3).



40/3 Das Weg-Zeit-Diagramm einer Schwingung ist eine „Wellenlinie"



40/4 Mit einem Sandpendel, unter dem eine Pappe gleichmäßig entlanggezogen wird, kann eine Schwingung aufgezeichnet werden

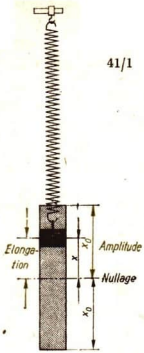
Einteilung der Schwingungen nach der Art der Kräfte

Bei **elastischen Schwingungen** sind die Kräfte durch elastische Eigenschaften der Stoffe bedingt.

Beispiel Federschwinger

Pendelschwingungen erfolgen unter dem Einfluß der Schwerkraft.

Beispiel Uhrenpendel



Kenngrößen einer Schwingung

Kenngröße	Formelzeichen	Merkmal	Beziehungen
Elongation oder **Ausschlag**	x	ist der Abstand des schwingenden Körpers von der Nullage (Bild 41/1)	–
Amplitude oder **Schwingungsweite**	x_0	ist der größte Abstand des schwingenden Körpers von der Nullage (Bild 41/1)	–
Periode oder **Schwingungsdauer**	T	ist die Zeitdauer einer vollen Schwingung, d. h. eines vollständigen in- und Herganges (n = Anzahl der Schwingungen)	$T = \frac{t}{n}$ $T = \frac{1}{f}$
Frequenz oder **Schwingungsanzahl**	f oder ν	ist der Quotient aus der Anzahl der Schwingungen und der dabei verflossenen Zeit	$f = \frac{n}{t}$ $f = \frac{1}{T}$
Phase		ist der Schwingungszustand zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dazu ist die Angabe der Elongation und der Schwingungsrichtung notwendig	

▶ **Maßeinheit der Frequenz ist das Hertz (Hz).**

Ein Hertz ist die Frequenz eines periodischen Vorganges von der Periodendauer 1 s.

$1\ \text{Hz} = 1\ \text{s}^{-1}$ $\quad 1000\ \text{Hz} = 1\ \text{kHz}$

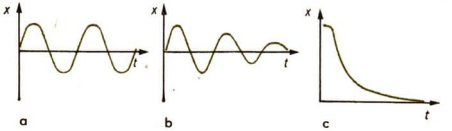
Beispiel $n = 20$ Schwingungen $t = 15$ Sekunden

$$f = \frac{n}{t}; \qquad f = \frac{20}{15} \cdot s^{-1}; \qquad \underline{\underline{f = 1{,}33\ \text{Hz}}}$$

Arten der Schwingung

Ungedämpfte Schwingung. Die Amplituden bleiben gleich groß (Bild 42/1 a).

Gedämpfte Schwingung. Die Amplituden werden mit der Zeit immer kleiner (Bild 42/1 b).
Die Ursache der Dämpfung ist die Reibung zwischen dem schwingenden Körper und seiner Umgebung und die innere Reibung des Körpers.



42/1

Aperiodische Bewegung. Durch starke Dämpfung schwingt der Körper bis zur Nullage zurück (Bild 42/1 c).

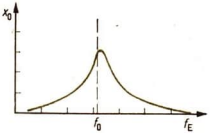
Die aperiodische Bewegung findet man z. B. bei Meßinstrumenten, deren Zeiger nur langsam in die Nullstellung zurückgeht.

Resonanz

Eigenschwingungen führen Körper aus, die nach einmaligem Anstoß zum Schwingen mit der Eigenfrequenz f_0 angeregt werden.

Erzwungene Schwingungen führt ein Körper aus, wenn er durch äußere Einwirkungen zum Schwingen gebracht wird.
Dieses Einwirken kann mit unterschiedlichen Erregerfrequenzen (Anstoßfrequenzen) geschehen. Bei einer bestimmten Erregerfrequenz f_E ist die Amplitude des angeregten Körpers am größten. Diesen Fall nennt man **Resonanz.**

Ein schwingungsfähiger Körper wird durch regelmäßige Anstöße in Schwingungen sehr großer Amplitude versetzt, wenn die Erregerfrequenz f_E mit der Eigenfrequenz f_0 übereinstimmt.



42/2 Resonanzkurve
Erregerfrequenz f_E und Eigenrequenz f_0 stimmen bei geringer Dämpfung fast überein

In der Technik wird die Resonanz z. B. zum Bestimmen der Frequenz von Schwingungen benutzt (Zungenfrequenzmesser). In vielen Fällen wirkt die Resonanz störend; denn durch kleinste periodische Anstöße können schwingungsfähige Körper in starke Schwingungen versetzt und dadurch oft zerstört werden (Schwingen von Brücken, Klirren von Fensterscheiben usw.).

Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Schwingungen

Zwischen den mechanischen und den elektromagnetischen Schwingungen (↗ S. 107) gibt es bestimmte Beziehungen.

Federschwinger (↗ S. 41)	Elektrischer Schwingkreis (↗ S. 107)
Die gespannte Feder enthält potentielle Energie.	Der Kondensator enthält nach dem Anlegen einer Spannung elektrische Feldenergie.
Die bewegte Masse besitzt kinetische Energie.	Die stromdurchflossene Spule besitzt magnetische Feldenergie.
Die Spannkraft der Feder treibt die Masse in die Gleichgewichtslage.	Die Spannung am Kondensator verursacht einen Ladungsausgleich.
Infolge seiner trägen Masse bewegt sich der Schwinger über die Gleichgewichtslage hinaus.	Infolge der Induktivität der Spule fließt der Strom nach Entladung des Kondensators weiter.
Durch den Reibungswiderstand wird die Schwingung gedämpft.	Durch den Ohmschen Widerstand des Schwingkreises wird die Schwingung gedämpft.
Die Federkraft ist der Auslenkung proportional:	Die Kondensatorspannung ist der Ladung proportional:
$F = k \cdot s$.	$U = \frac{1}{C} Q$.
Schwingungsdauer der Federschwingung	Schwingungsdauer der elektromagnetischen Schwingung
$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$.	$T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$.

Wellen

Begriffe und Gesetze, die für mechanische Wellen gelten, können auch für Wellen in anderen Gebieten der Physik angewendet werden (↗ S. 109; ↗ S. 138). Man benutzt die Erscheinungen der mechanischen Welle als Modell.

Die Welle

Voraussetzung für das Entstehen einer fortschreitenden mechanischen Welle ist eine Anzahl von **Schwingern**, man nennt sie **Oszillatoren**, die miteinander gekoppelt sind.

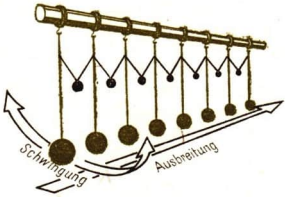
▷ **Eine mechanische Welle ist ein Vorgang, bei dem sich die Elongation von Oszillatoren örtlich und zeitlich ändert und bei dem Energie übertragen wird.**

Die dem ersten Oszillator erteilte Energie wird bis zum letzten Oszillator übertragen. Dabei braucht sich der Körper als Ganzes nicht zu bewegen (Schallwellen in einem Stab).

Ausbreitungsrichtung

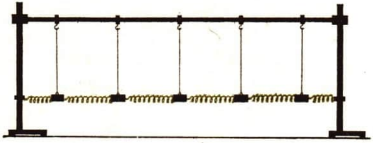
der Welle ist die Richtung, in der die Energie übertragen wird.

Transversalwelle oder **Querwelle**: Schwingungsrichtung der Oszillatoren und Ausbreitungsrichtung der Welle stehen senkrecht zueinander (Bild 44/1).



44/1

Longitudinalwelle oder **Längswelle**: Schwingungsrichtung der Oszillatoren und Ausbreitungsrichtung der Welle sind gleich gerichtet (Bild 44/2).



44/2

Lichtwellen, Funkwellen sind Transversalwellen.
Schallwellen sind Longitudinalwellen.
Wasserwellen sind Oberflächenwellen (die Wasserteilchen an der Oberfläche führen hierbei kreisende Bewegungen aus).

(↗ S. 109 und ↗ S. 50)

Kenngrößen einer Welle

Kenngröße	Formelzeichen	Merkmal	Maßeinheit
Frequenz	f	einer Welle ist gleich der Schwingungsfrequenz der einzelnen Oszillatoren	Hz
Amplitude	x_0	einer Welle ist gleich der Amplitude der Schwinger. Mit dem Fortschreiten der Welle nimmt die Amplitude infolge Dämpfung ab	
Phase		Zwei Schwinger einer Welle haben die gleiche Phase, wenn sie in der Elongation und in der Schwingungsrichtung übereinstimmen	
Gangunterschied		zweier Wellen ist der Unterschied in der Schwingungsphase gleichliegender Schwinger zu einem bestimmten Zeitpunkt. Er wird z. B. in Bruchteilen der Wellenlänge angegeben	m
Wellenlänge	λ	ist der Abstand zweier benachbarter Teilchen einer Welle, die sich in gleicher Phase befinden	m
Ausbreitungsgeschwindigkeit	c	einer Welle ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine bestimmte Phase (nicht der Schwinger!) ausbreitet (Bild 45/1)	$\frac{m}{s}$

Sie wird errechnet als Quotient aus der Strecke s, die ein Schwingungszustand zurücklegt, und der dafür benötigten Zeit t.

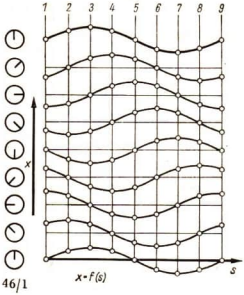
$$c = \frac{s}{t}$$

45/1

Darstellung einer Welle

Bei der grafischen Darstellung einer Welle wird die Elongation der einzelnen Oszillatoren in Abhängigkeit des Abstandes s vom Erreger-

zentrum aufgetragen. Stellt man eine Welle zu verschiedenen Zeiten t dar, so ist das Fortschreiten zu erkennen (Bild 46/1).



46/1

Das grafische Bild einer Welle darf nicht mit der Darstellung der Schwingung verwechselt werden. Bei der Welle werden auf der Abszissenachse und der Ordinatenachse jeweils Längen abgetragen. Bei der Schwingung wird auf der Abszissenachse die Zeit und auf der Ordinatenachse eine Länge abgetragen.
Als **Wellenberg** wird in der grafischen Darstellung einer Oberflächenwelle (z. B. Wasserwelle) jener Teil der Welle bezeichnet, der über der Abszissenachse liegt. Der unter der Abszissenachse liegende Teil heißt **Wellental.**

Gesetz der Wellenausbreitung

Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz einer Welle sind miteinander verknüpft. Die Zeit, die benötigt wird, damit sich eine Welle um eine Wellenlänge ausbreitet, ist gleich der Schwingungsdauer T eines Teilchens. Für diesen Fall ergibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \frac{\lambda}{T}$. Setzt man $f = \frac{1}{T}$, so ergibt sich:

▷ $\mathbf{c = \lambda \cdot f}$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist gleich dem Produkt aus Wellenlänge und Frequenz (↗ S. 41).

Beispiel Wie groß ist die Wellenlänge einer Welle, deren Frequenz 50 Hz und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit $150\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ beträgt?

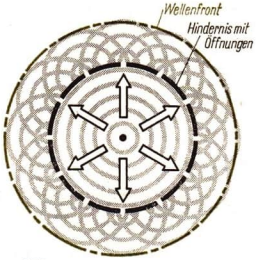
$$c = \lambda \cdot f; \quad \lambda = \frac{c}{f}; \quad \lambda = \frac{150\ \text{m} \cdot \text{s}}{50\ \text{s}}; \quad \underline{\underline{\lambda = 3\ \text{m}}}$$

Das Huygenssche Prinzip

Der Holländer CHRISTIAN HUYGENS (1629 bis 1695) untersuchte die Entstehung von Wellen. Dabei stellte er folgendes Prinzip der Beschreibung von Wellen auf:

▷ **Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt von neuen kugelförmigen Wellen, von Elementarwellen. Die Elementarwellen setzen sich zu einer neuen Wellenfront zusammen. Diese neue Wellenfront ist geometrisch die Einhüllende der Elementarwellen.**

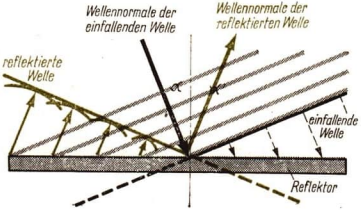
Einen Modellversuch zum Huygensschen Prinzip zeigt Bild 47/1. Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips ist es möglich, Wellenerscheinungen zu erklären.



47/1

Reflexion von Wellen

Die **Wellennormale** ist das Lot auf die Wellenfront und gibt die Ausbreitungsrichtung an (Bild 47/2).
Der **Einfallswinkel** α ist der Winkel zwischen Einfallslot und Wellennormalen der einfallenden Welle.
Der **Reflexionswinkel** α' ist der Winkel zwischen Einfallslot und Wellennormalen der reflektierten Welle.



47/2

▷ **Reflexionsgesetz**

Der Reflexionswinkel α' ist bei der Reflexion einer ebenen Welle an einem ebenflächigen Hindernis gleich dem Einfallswinkel α. Einfallender und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene.

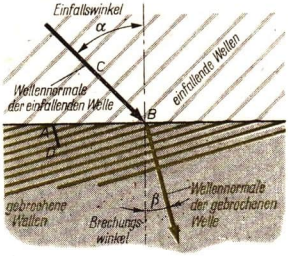
Brechung von Wellen

Tritt eine Welle von einem Medium in ein anderes über, das wellenmäßig dichter oder dünner ist, so ändert sie ihre Richtung. Die Richtungsänderung heißt **Brechung.**

> **Das Brechungsverhältnis ist gleich dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten in den beiden Medien.**

$$n = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Ursache der Brechung ist die unterschiedliche Geschwindigkeit der Welle in den Medien.



Die Strecken $\overline{CB}$ und $\overline{AD}$ werden in der gleichen Zeit von der Welle mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen. Es ist $\overline{CB} = c_1 \cdot t$ und $\overline{AD} = c_2 \cdot t$. Rechnet man aus einer Gleichung t aus und setzt in die andere ein, so erhält man:

$$\frac{\overline{CB}}{\overline{AD}} = \frac{c_1}{c_2} = n \qquad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

Dieser Quotient heißt **Brechungsverhältnis** (Bild 48/1).

48/1

Beugung von Wellen

Wenn Wellen an einem scharf begrenzten Hindernis vorbeilaufen, so breiten sie sich auch bei gleichem Medium hinter dem Hindernis in das abgeschirmte Gebiet aus. Diese Erscheinung heißt **Beugung** (48/2).

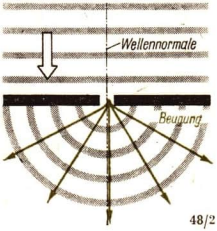
Überlagerung von Wellen — Interferenz

Überlagern sich zwei Wellen, so entsteht eine resultierende Welle, deren Elongation (↗ S. 41) sich aus der Summe der Elongationen der Oszillatoren ergibt.

Man bezeichnet diese Überlagerung als **Interferenz.**

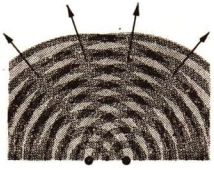
▷ **Interferenz im engeren Sinne nennt man die Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen gleicher Wellenlänge, die zur Verstärkung bzw. Auslöschung der Welle im Überlagerungsgebiet führt.**

Wird ein Spalt als Erregerzentrum betrachtet und wendet man auf jeden Oszillator im Spalt das Huygenssche Prinzip an, so ist die Interferenzerscheinung bei der Beugung von Wellen an einem Spalt zu erklären. Solche Erscheinungen sind besonders in der Optik von Bedeutung. (↗ S. 139)



48/2

48/3



Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Wellen

Bei der elektromagnetischen Welle (↗ S. 109; ↗ S. 139) treten an die Stelle von zeitlich und örtlich sich verändernden Bewegungsvorgängen der Oszillatoren einer mechanischen Welle die periodischen Veränderungen der elektrischen und magnetischen Feldstärke an dem betreffenden Ort auf.
Der Begriff Welle ist in der Physik eine Abstraktion für Erscheinungen gleicher Struktur.

Akustik

Die Grundlagen der Akustik sind die Gesetze der Schwingungs- und Wellenlehre.

Schallentstehung, Schallausbreitung

Schall werden Schwingungen in elastischen Stoffen genannt, die einen Frequenzbereich von 16 Hz bis 20 000 Hz haben.
Ursache des Schalls ist das Schwingen eines festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers.
Schallquellen sind Körper, die Schall erzeugen (z. B. Klingel, Lochsirene, Stimmgabel, Geigensaite, Automotor usw.).
Die **Ausbreitung des Schalls** erfolgt hauptsächlich als Longitudinalwelle (↗ S. 41) und ist stets an Stoffe gebunden. Im luftleeren Raum breiten sich Schallwellen nicht aus.
Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls** ist in den verschiedenen Stoffen unterschiedlich, sie ist abhängig von der Temperatur.

Beispiele

Verschiedene Schallgeschwindigkeiten

Stoff	c in $\frac{m}{s}$	Stoff	c in $\frac{m}{s}$
Luft	332 (bei 0 °C)	Wasser	1 400 (bei 4 °C)
Wasserstoff	1 261 (bei 60 °C)	Blei	1 300 (bei 18 °C)
Benzol	1 342 (bei 0 °C)	Stahl	5 100 (bei 18 °C)

Das menschliche Ohr kann Schall mit Frequenzen von 16 Hz bis 20 000 Hz aufnehmen. Frequenzen oberhalb dieser Grenze gehören ins Ultraschallgebiet, Frequenzen unterhalb dieser Grenze ins Infraschallgebiet.

Schallarten, Tonhöhe, Tonstärke

Ton. Regelmäßige Grundschwingung. Amplitude stets gleich (Bild 50/1 a).

Klang. Unregelmäßige Schwingung. Amplitude stets gleich (Bild 50/1 b).

Geräusch. Schwingung sehr unregelmäßig. Amplitude unterschiedlich groß (Bild 50/1 c).

Knall. Sehr kurze Schwingung. Amplituden nehmen rasch ab (Bild 50/1 d).

50/1 a b c d

Die **Tonhöhe** ist abhängig von der Frequenz der Grundschwingung. Je höher die Frequenz, desto höher ist der Ton.

Die **Tonstärke** ist abhängig von der Amplitude. Je größer die Amplitude, desto lauter der Ton.

Reflexion des Schalls

An elastischen Stoffen wird der Schall reflektiert (↗ S. 47).

Echo. Benötigt der Schall von der Schallquelle zur reflektierenden Wand und von dort bis zum Ohr mehr als $\frac{1}{10}$ Sekunde, so nimmt das Ohr die einzelnen Schallimpulse getrennt wahr. Diese Erscheinung heißt Echo. Die Mindestentfernung der reflektierenden Wand muß 17 Meter betragen.

Echolot. Zur Tiefenlotung auf See benutzt man Ultraschall. Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser und der Zeit, die vom Aussenden des Impulses bis zum Empfang des reflektierten Impulses vergangen ist, kann die Tiefe ermittelt werden.

Schallverstärkung. Durch mehrmalige Reflexion, die eine Bündelung der Schallwellen zur Folge hat, wird der Schall verstärkt, z. B. Sprachrohr.

Wärmelehre

52 Struktur der Körper – Temperatur
54 Temperaturmessung
55 Ausdehnung der Körper bei Temperaturänderungen
59 Wärmemenge und spezifische Wärme
62 Wärmeausbreitung
63 Änderungen des Aggregatzustandes
66 Energieumwandlungen
67 Wärmekraftmaschinen

Wärmelehre

In der Wärmelehre wird das Verhalten der Körper beim Zu- und Abführen von Wärmeenergie und bei Temperaturänderungen untersucht. Die Wärmelehre kann auf zwei Arten beschrieben werden:

Phänomenologische Betrachtungsweise	**Kinetische Betrachtungsweise**
Man geht von den äußeren **Erscheinungen** aus, die direkt beobachtbar sind. „phainomenon" (gr.): das Erscheinende	Man geht von den **Bewegungsvorgängen** der Atome und Moleküle aus, die den äußeren Erscheinungen zugrunde liegen. „kinema" (gr.): Bewegung
Zur Beschreibung dienen **kalorische** Größen: Temperatur Wärmemenge	Zur Beschreibung dienen **mechanische** Größen: Masse Geschwindigkeit Bewegungsenergie (z.B. der Moleküle)

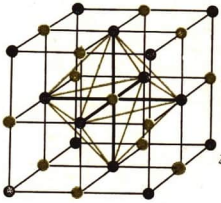
Struktur der Körper — Temperatur

Struktur der Körper

Alle Körper bestehen aus kleinen stofflichen Teilchen, z. B. den **Atomen** und **Molekülen**. (↗ S. 148 und 31)

Festkörper	**Flüssigkeiten**	**Gase**
Bestimmtes Volumen	Bestimmtes Volumen	Unbestimmtes Volumen
Bestimmte Form	Unbestimmte Form	Unbestimmte Form
Große Kohäsionskräfte, daher Teilchen in bestimmter räumlicher Anordnung zueinander (↗ S. 31)	Geringe Kohäsionskräfte, daher Teilchen gegeneinander verschiebbar	Kohäsionskräfte können im allgemeinen vernachlässigt werden (ideales Gas)

Teilchen schwingen um bestimmte Ruhelage	Teilchen in ungeordneter Bewegung	Teilchen in ungeordneter Bewegung



Modell eines Kochsalzkristalls	Diffusion	Brownsche Bewegung
Die Teilchen (Ionen) führen Schwingungen um ihre „Ruhelage" aus (schwarz: Na^+-Ion) (farbig: Cl^--Ion)	Die Teilchen führen ohne äußere Krafteinwirkung ungeordnete Bewegungen (auch entgegen der Schwerkraft) aus und durchdringen sich gegenseitig (in Flüssigkeiten und Gasen)	Bild von Schwebestoffteilchen. Die Bahn des Teilchens kommt durch die ungeordnet aufprallenden Moleküle zustande (in Flüssigkeiten und Gasen)

Temperatur

ist eine Zustandsgröße, die den Wärmezustand eines Körpers beschreibt. Die Temperatur ist um so höher, je größer der Energieinhalt seiner Atome bzw. Moleküle ist.

▷ **Die absolute Temperatur eines Gases ist der mittleren kinetischen Energie seiner Moleküle proportional.**

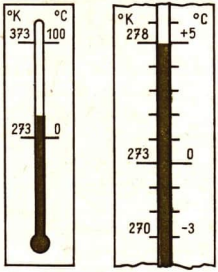
$$T \sim \frac{m}{2}\,\bar{v}^2 = \overline{W}_{kin}$$

Es bedeuten T: Absolute oder Kelvin-Temperatur
t bzw. δ: Celsius-Temperatur

▶ **Maßeinheit**

der Kelvin-Temperatur ist der Grad Kelvin (°K)	der Celsius-Temperatur ist der Grad Celsius (°C)

Die tiefste Temperatur beträgt –273 °C (genauer – 273,15 °C).
Bei Angabe von Temperaturdifferenzen werden die Kurzzeichen °K und °C durch das Kurzzeichen grd ersetzt!
Temperaturabhängig sind der Aggregatzustand der Körper (↗ S. 63), das Volumen der Körper (↗ S. 55 bis 59) und Stoffkonstanten (z. B. spezifischer Widerstand ↗ S. 90).



54/1

Beziehung zwischen Celsius- und Kelvin-Temperatur

▷ $\frac{T}{°K} = \frac{t}{°C} + 273$

273 °K = 0 °C
278 °K = + 5 °C
270 °K = — 3 °C

Temperaturmessung

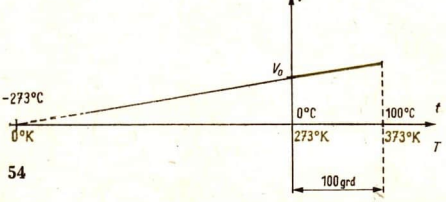
Meßverfahren

Temperaturmeßgeräte nennt man Thermometer.

Zum Messen der Temperatur sind Verfahren geeignet, bei denen ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen der Änderung der physikalischen Größe Temperatur und der Änderung anderer physikalischer Größen besteht.

Temperaturmessung durch Ausdehnung

Körper ändern bei Temperaturänderung ihr Volumen (↗ S. 55 bis 59).
Da die meisten Gase sich annähernd gleich stark ausdehnen, benutzt man sie als Bezugsstoff, um die Maßeinheit der Temperatur festzulegen. Der Volumenzuwachs des Gases zwischen der Siede- und der Gefriertemperatur des



54/2

Wassers bei normalem Luftdruck wird in 100 gleiche Teile eingeteilt. Einem solchen Teil wird die Temperaturdifferenz ein Grad zugeordnet.
Trägt man in einem Diagramm das Gasvolumen über der Temperatur auf und verlängert die Gerade über den gemessenen Bereich hinaus, so bedeutet der Schnittpunkt mit der T-Achse ein Volumen 0. Das Volumen eines Gases kann aber nicht verschwinden, da seine Moleküle ein Volumen haben. In diesen Punkt – der praktisch nie erreicht werden kann – legt man den Nullpunkt der Kelvin-Skale.

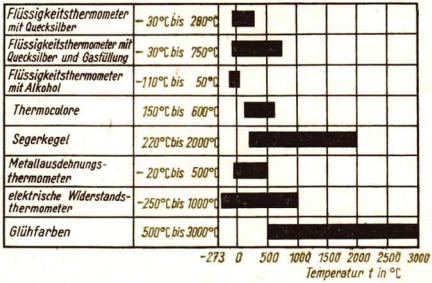
Flüssigkeitsthermometer sind für die meisten Zwecke besser geeignet als Gasthermometer (einfachere Handhabung). Als Thermometerflüssigkeiten benutzt man Stoffe, die sich in einem bestimmten Bereich gleichmäßig ausdehnen (z. B. Quecksilber, Alkohole, Kohlenwasserstoffe).

W

Elektrische Temperaturmessung

Der Widerstand elektrischer Leiter ist temperaturabhängig. Ist der Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen Widerstand und Temperatur bekannt, kann aus dem gemessenen Widerstand die Temperatur bestimmt werden (Widerstandsthermometer).

Meßbereiche von Temperaturmeßverfahren



55/1

Ausdehnung der Körper bei Temperaturänderungen

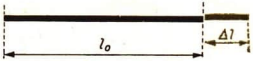
Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten

Bei einer Temperaturänderung ändert sich das Volumen eines Körpers.

Lineare Ausdehnung von Festkörpern

Für viele praktische Zwecke betrachtet man bei Festkörpern (z. B. Stäbe und Drähte) die Ausdehnung oft nur in einer Richtung (Längenausdehnung).

56/1



l_0: Ausgangslänge bei $t_0 = 0$ °C

Δl: Längenzunahme beim Erwärmen auf t_1 $\quad t_1 > t_0$

Für die meisten Stoffe gilt annähernd:

Die Längenzunahme ist der Temperaturänderung proportional.

$$\Delta l \sim \Delta t$$

▷ $$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t} \qquad [\alpha] = \frac{1}{\text{grd}}$$

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

Diese Gleichung gilt streng nur für eine Anfangstemperatur von $t_0 = 0$ °C. Die Abweichungen sind bei anderen Anfangstemperaturen aber meist so gering, daß sie vernachlässigt werden können. Für andere Anfangstemperaturen hat die Gleichung die Form $l_2 = l_1 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$.
Weiterhin läßt sich nach den angegebenen Formeln die Ausdehnung nur für einen bestimmten Temperaturbereich exakt ermitteln, da der Ausdehnungskoeffizient nicht für alle Temperaturbereiche konstant ist.

Beispiel

Eine Dampfleitung aus Eisen hat bei 0 °C eine Länge von 400 Metern. Welche Länge hätte sie bei einer Betriebstemperatur von 200 °C? (Hinweis: Ausgleichbögen.)

$$\alpha_{Fe} = 0{,}000\,012 \frac{1}{\text{grd}} = 1{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{grd}^{-1}$$

$$l = l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

$$l = 400\ \text{m}\ (1 + 0{,}000\,012 \frac{1}{\text{grd}} \cdot 200\ \text{grd})$$

$$l = 400\ \text{m}\ (1 + 0{,}0024)$$

$$\underline{\underline{l = 400{,}96\ \text{m}}}$$

Kubische Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten

Es wird die Ausdehnung in allen drei Richtungen betrachtet.

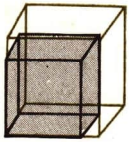
▷ **Kubischer Ausdehnungskoeffizient**

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta t} \qquad [\gamma] = \frac{1}{\text{grd}}$$

Gesamtvolumen

▷ $V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t)$ Es ist $\gamma \approx 3\alpha$.

Diese Gleichung gilt für die Anfangstemperatur $t_0 = 0$ °C.



57/1 Der Würfel dehnt sich in allen drei Richtungen aus.

W

Ausdehnung von Gasen

Beim Erwärmen eines Gases sind Temperatur, Volumen und Druck stets zusammen zu betrachten.
Ein Gas, für das die Gasgesetze genau gelten, nennt man ein **ideales Gas.** Solche Gase gibt es in Wirklichkeit nicht. Die wirklich existierenden Gase nennt man reale **Gase.** Viele dieser Gase (z. B. Luft, Wasserstoff und Sauerstoff) verhalten sich aber bei Temperaturen weit über ihren Siedetemperaturen und bei geringem Druck fast wie ideale Gase.

Zustandsänderung von Gasen bei konstantem Druck

Alle Gase, deren Temperatur weit über ihrer Kondensationstemperatur (↗ S. 65) liegt, haben annähernd den gleichen kubischen Ausdehnungskoeffizienten.

Es gilt das

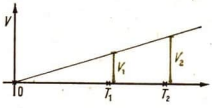
Gesetz von Gay-Lussac für konstanten Druck (isobare Zustandsänderung):

▷ $V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t)$ wenn $p = \text{const}$
$t_0 = 0$ °C

$$\gamma = \frac{1}{273} \frac{1}{\text{grd}} \approx 0{,}00367 \frac{1}{\text{grd}}$$

Für Rechnungen ist es häufig günstiger, die absolute Temperatur einzuführen:

57/2



▷ **Verschiedene Volumina der gleichen Gasmenge verhalten sich bei konstantem Druck wie die zugehörigen absoluten Temperaturen.**

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad \text{wenn } p = \text{const}$$

Zustandsänderung von Gasen bei konstantem Volumen

Eine Gasmenge in einem abgeschlossenen System ändert das Volumen bei Temperaturerhöhung nicht; es steigt nur der Druck.

Es gilt das

Gesetz von GAY-LUSSAC für konstantes Volumen (isochore Zustandsänderung):

▷ $p_1 = p_0(1 + \gamma \cdot \Delta t)$ wenn $V = \text{const}$, $t_0 = 0\,°\text{C}$

Bei Einführung der absoluten Temperatur gilt:

▷ **Die Drücke einer abgeschlossenen Gasmenge verhalten sich bei konstantem Volumen wie ihre absoluten Temperaturen.**

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{wenn} \quad V = \text{const}$$

Zustandsänderung von Gasen bei konstanter Temperatur

Gesetz von BOYLE

▷ **Bei gleichbleibender Temperatur ist für eine bestimmte Gasmenge das Produkt aus Druck und Volumen stets konstant.**

(↗ S. 35)

$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$ oder $p \cdot V = \text{const}$ wenn $T = \text{const}$

Allgemeine Zustandsgleichung der Gase

Im allgemeinen sind alle drei Zustandsgrößen, Druck, Volumen und Temperatur, veränderlich.

Beispiel

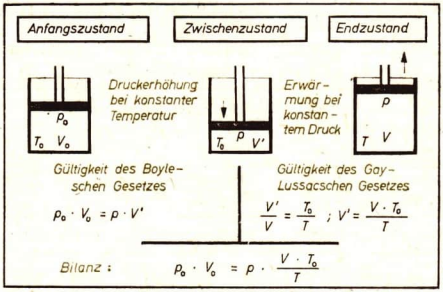
Die Luft in einem Luftballon wird erwärmt.
Dadurch steigen Druck und Volumen!

Für solche Fälle gilt die **allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase.**

Für eine abgeschlossene Gasmenge ist der Quotient aus dem Produkt aus Druck und Volumen und der zugehörigen absoluten Temperatur stets konstant.

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad \text{(Bild 59/1)}$$

Wenn der Druck p oder das Volumen V oder die Temperatur T konstant gehalten wird, dann ergibt sich jeweils das Gesetz von GAY-LUSSAC für konstanten Druck (↗ S. 57), für konstantes Volumen (↗ S. 58) und das Gesetz von BOYLE für konstante Temperatur (↗ S. 58).



59/1

Die Gaskonstante

Für Rechnungen ist die obenstehende Form der allgemeinen Zustandsgleichung oft ungünstig, da der rechtsstehende Ausdruck für jede Gasmenge einen anderen Wert annimmt. Bezieht man aber den Ausdruck auf ein bestimmtes Gas mit der Masse m, so erhält man eine Konstante, die **Gaskonstante R.**

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{m \cdot T_0} = R$$

Wird für die Masse m die molare Masse m_{mo} und für das Volumen V_0 das molare Volumen V_{mo} verwendet, so erhält man für alle Gase einen konstanten Zahlenwert

$$R = 8{,}31 \ \frac{\text{N m}}{\text{mol} \cdot \text{grd}}$$

Wärmemenge und spezifische Wärme

▶ **Die Wärme ist eine Form der Energie.**

Innere Energie

Wird die Temperatur eines Körpers erhöht, so steigt die mittlere kinetische Energie seiner kleinen Teilchen. Diese dem Körper innewohnende Energie nennt man seine **innere Energie U.**

Wärmemenge

Die zur Erhöhung der inneren Energie notwendige Energie kann dem Körper von außen zugeführt werden. Man nennt sie **Wärmemenge W.**

Soll die Wärmemenge von anderen Energiearten unterschieden werden, gebraucht man das Formelzeichen Q.

Wärme (Energieform)	
Körper nimmt Wärmemenge auf Die Gesamtenergie der Moleküle nimmt zu	**Körper gibt Wärmemenge ab** Die Gesamtenergie der Moleküle nimmt ab
Die mittlere Bewegungsenergie der Moleküle nimmt zu	Die mittlere Bewegungsenergie der Moleküle nimmt ab
Die Temperatur des Körpers steigt	**Die Temperatur des Körpers sinkt**

Außer der Temperaturerhöhung kann eine zugeführte Wärmemenge auch bewirken, daß der Körper sein Volumen (↗ S. 55) und auch den Aggregatzustand ändert (↗ S. 63).
Dabei wird eine Ausdehnungsarbeit verrichtet. Zwischen zugeführter Wärmemenge Q, Änderung der inneren Energie ΔU und verrichteter Ausdehnungsarbeit A gilt die Beziehung

$Q = \Delta U + A$ (1. Hauptsatz der Wärmelehre).

▶ **Als Maßeinheiten der Wärmemenge**
können alle Maßeinheiten der Energie verwendet werden (z. B. N · m; J; W · s; kp · m; cal).
Die gebräuchlichste Maßeinheit ist die Kalorie (cal).
1 cal = 4,1868 N · m (↗ S. 23).

1 kcal = 1000 cal

Man kann sich eine Wärmemenge von 1 cal wie folgt veranschaulichen: Wird Wasser der Masse ein Gramm um ein Grad (von 14,5 °C auf 15,5 °C) erwärmt, so nimmt das Wasser eine Wärmemenge von einer Kalorie auf.

Zusammenhang von Wärmemenge und Temperatur

Die aufgenommene Wärmemenge eines Körpers ist bei konstanter Masse der Temperaturzunahme proportional:

$W \sim \Delta t \quad m = \text{const}$

Die aufgenommene Wärmemenge eines Körpers ist bei konstanter Temperaturzunahme der Masse des Körpers proportional

$W \sim m \quad \Delta t = \text{const}$

▷ $W = c \cdot m \cdot \Delta t$

Der Proportionalitätsfaktor c ist durch die stoffliche Beschaffenheit des Körpers bestimmt. Man nennt ihn **spezifische Wärme.** (Tabelle ↗ S. 197)

Spezifische Wärme

Aus der Gleichung $W = c \cdot m \cdot \Delta t$ ergibt sich die spezifische Wärme c.

▷ $$c = \frac{W}{m \cdot \Delta t}$$

▶ **Maßeinheiten der spezifischen Wärme sind z. B.** $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grd}}$ **und** $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{grd}}$

W

Durch eine Wärmemenge von 100 cal werden um 1 grd erwärmt:

Die spezifische Wärme des Wassers ist besonders groß. Aus diesem Grunde unterscheiden sich z. B. See- und Kontinentalklima wesentlich voneinander. Das Wasser muß aus der Umgebung eine wesentlich größere Wärmemenge aufnehmen, um sich auf die gleiche Temperatur zu erwärmen wie das Festland, und gibt beim Abkühlen auch eine größere Wärmemenge an die Umgebung ab (kühlere Sommer, mildere Winter an der See!).

Spezifische Wärme der Gase

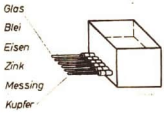
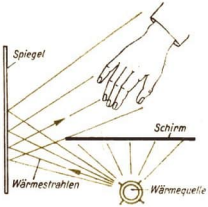
Gase haben einen großen Ausdehnungskoeffizienten. Aus diesem Grunde müssen die Bedingungen festgelegt werden, unter denen die Wärmezufuhr stattfindet. Wird das Volumen bei der Erwärmung konstant gelassen (abgeschlossener Behälter), so wird eine Ausdehnung des Gases verhindert. Die auftretende spezifische Wärme nennt man
spezifische Wärme c_v bei konstantem Volumen.

Im anderen Falle läßt man den Druck konstant (beweglicher Kolben in einem gasgefüllten Zylinder). Die zugeführte Wärmemenge dient außer zur Temperaturerhöhung auch noch zur Verrichtung einer Ausdehnungsarbeit. Die auftretende spezifische Wärme heißt
spezifische Wärme c_p bei konstantem Druck.

Für jedes Gas gilt:

$c_p > c_v$

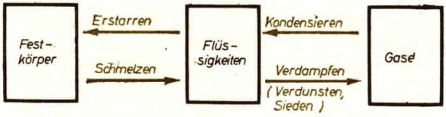
Wegen der kleinen Ausdehnungskoeffizienten von Festkörpern und Flüssigkeiten ist bei diesen die Unterscheidung von c_p und c_v nicht nötig.

Strömung (Konvektion)	Leitung	Strahlung
Wärmetragender Körper bewegt sich selbst	Körper bleibt in Ruhe. Seine schneller bewegten Moleküle übertragen durch Stoß Energie an benachbarte Moleküle	Kein direkter Kontakt zwischen wärmerem und kälterem Körper. Warmer Körper sendet elektromagnetische Strahlung aus, die sich wie Licht ausbreitet (↗ S. 124)
		
Ausbreitungsgeschwindigkeit gering; durch Eigenbewegung des warmen Körpers bedingt. Die Eigenbewegung kommt bei freier Strömung durch Dichteänderungen des Körpers infolge der Erwärmung zustande	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Struktur, gegenseitigem Kontakt und Temperaturunterschied der Körper abhängig	Ausbreitung erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit
Kann durch zusätzliche Bewegung (Druckdifferenzen) beeinflußt werden	Kann durch Art des Wärmeleiters beeinflußt werden. Gute Leiter: z. B. Metalle. Schlechte Leiter: z. B. Gase	Kann durch Stoffe zwischen Strahler und Empfänger absorbiert werden (z. B. Sonnendach, Ofenschirm)
Erwärmung von Wohnräumen. Zentralheizung. Winde und Meeresströmungen	Kühlrippen bei Motoren. Betonschwellen bei Eisenbahnschienen. Thermosflaschen. Isolierstoffe im Bauwesen. Menschliche Kleidung	Sonnenstrahlung. Abkühlung der Erde in wolkenlosen Nächten. Strahlungswirkung von glühenden Körpern (Abstich beim Hochofen)

Änderungen des Aggregatzustandes

Schmelzen — Schmelztemperatur

Stoffe mit einheitlicher chemischer Zusammensetzung haben bei bestimmtem Druck eine bestimmte Schmelztemperatur (Schmelzpunkt), bei der sie vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergehen.

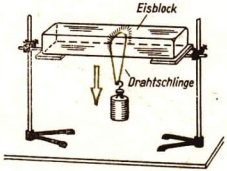


63/1

Die Schmelztemperatur t_s ist vom Druck abhängig.

Im allgemeinen erhöht sich durch steigenden Druck die Schmelztemperatur. Eine Ausnahme bildet Wasser (Eis). Die Schmelztemperatur von Eis sinkt, wenn der Druck erhöht wird.

Beispiel Gletscherbewegung; Gleiten von Schlittenkufen usw.
(Erzeugtes Schmelzwasser dient als Gleitmittel.)



63/2 Hindurchgleiten einer Drahtschlinge durch einen Eisblock

Erstarren — Erstarrungstemperatur

Beim Abkühlen geht eine Flüssigkeit bei einer bestimmten Temperatur in den festen Aggregatzustand über. Für kristalline feste Stoffe gilt:

Die Schmelztemperatur ist gleich der Erstarrungstemperatur

$t_s = t_e$

Schmelzwärme

Beim Schmelzen wird die feste räumliche Anordnung der Moleküle bzw. Ionen (Gitterstruktur) zerstört. Dazu muß Arbeit aufgewandt werden; diese muß dem Körper als Schmelzwärme zugeführt werden.

Spezifische Schmelzwärme

$$q_s = \frac{W_s}{m}$$

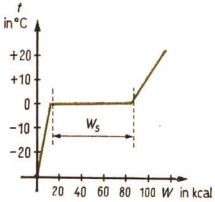
▶ **Maßeinheit ist** $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

Die beim Schmelzen einem Körper zugeführte Wärmemenge wird beim Erstarren wieder frei.

W_s: Zum Schmelzen verbrauchte Wärmemenge

$W_s = q_s \cdot m = 79{,}7\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot 1\,\text{kg}$

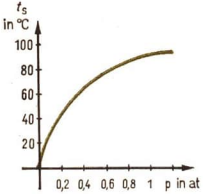
$W_s = 79{,}7\,\text{kcal}$



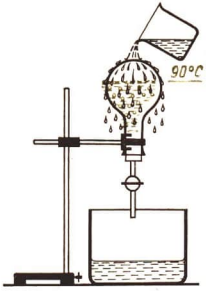
64/1 Temperaturverlauf beim Erwärmen von einem Kilogramm Eis von — 20 °C zu Wasser von 20° C.

Verdampfen — Siedetemperatur

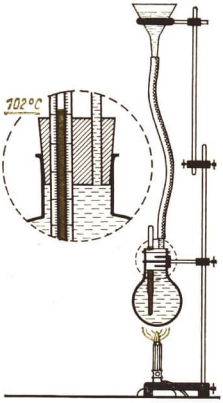
Sieden. Stoffe mit einheitlicher chemischer Zusammensetzung haben bei bestimmtem Druck eine bestimmte Siedetemperatur (Siedepunkt), bei der sie vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergehen. Beim Sieden entstehen innerhalb der Flüssigkeit Dampfblasen.



64/2 Beim Sieden treten Moleküle mit hoher kinetischer Energie durch die Oberfläche aus der Flüssigkeit heraus. Bei geringem äußerem Druck werden die Moleküle weniger am Austritt gehindert. Die Flüssigkeit siedet bereits bei niedrigeren Temperaturen



64/3 Sieden unter vermindertem Druck



64/4 Sieden unter erhöhtem Druck

Die Siedetemperatur ist vom Druck abhängig.

Verdunsten. Bereits unterhalb der Siedetemperatur verlassen einzelne Moleküle die Flüssigkeit. Dadurch geht ein Teil des flüssigen Körpers allmählich in den dampfförmigen Zustand über.

Beispiele Verdunsten von Äther oder Benzin bei Zimmertemperatur. Trocknen der Wäsche.

Beim Verdunsten einer Flüssigkeit wird die nötige Wärmemenge zunächst der Flüssigkeit selbst und dann der Umgebung entzogen, die sich dabei abkühlt (Verdunstungskälte).

Beispiele Vereisen von Körperteilen bei Operationen durch Verdunsten von Monochloräthan; Kältegefühl bei nassem Körper nach dem Bad.

W

Kondensieren — Kondensationstemperatur

Beim Abkühlen geht ein Gas (oder Dampf) bei einer bestimmten Temperatur in den flüssigen Aggregatzustand über. Bei einem bestimmten Druck und für einheitlich zusammengesetzte Stoffe gilt:

Die Verdampfungstemperatur ist gleich der Kondensationstemperatur

$$t_v = t_k$$

Verdampfungswärme

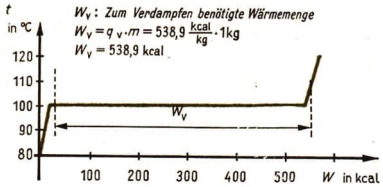
Damit einzelne Teilchen den Verband der Flüssigkeitsmoleküle verlassen können, müssen sie die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen überwinden; es muß eine Arbeit aufgewandt werden. Diese muß als Wärmemenge beim Verdampfen zugeführt werden.

Spezifische Verdampfungswärme

$$q_v = \frac{W_v}{m}$$

▶ **Maßeinheit ist**

z. B. $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$



65/1 Temperaturverlauf beim Verdampfen von 1 kg Wasser von 80 °C in Dampf von 120 °C

Die beim Verdampfen einem Körper zugeführte Wärmemenge wird beim Kondensieren wieder frei.

Energieumwandlungen

▷ **Die Wärme ist eine Energieart. Sie kann durch Umwandlung aus anderen Energiearten entstehen und kann in andere Energiearten umgewandelt werden.**

Umzuwandelnde Energieart	Umwandlung durch	Umgewandelte Energieart
Mechanische Energie Arbeit	Reibung Kompression von Gasen	WÄRME
Elektrische Energie	Strom durch einen Widerstand (z. B. Tauchsieder, Kocher, Infrarotstrahler)	
Chemische Energie	Exotherme Reaktionen (Verbrennung)	
Lichtenergie	Strahlungsabsorption (dunkle Körperfarben)	
Atomkernenergie	Kernspaltung und -fusion (Reaktor)	
WÄRME	Expansion von Gasen und Dämpfen (Wärmekraftmaschinen)	Mechanische Energie (↗ S. 24)
	Erwärmung von unterschiedlichen Metallen (Thermoelemente)	Elektrische Energie (↗ S. 94)
	Endotherme Reaktionen (Karbidgewinnung)	Chemische Energie
	Strahlung glühender Körper (Glühlampe)	Elektromagnetische Energie (↗ S. 108)

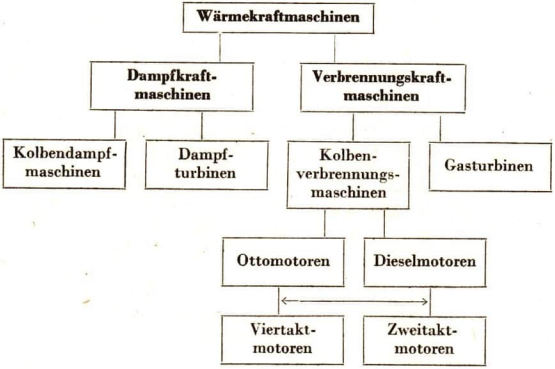
Satz von der Erhaltung der Energie

▶ **Bei allen Energieumwandlungen bleibt der Betrag der Gesamtenergie erhalten.**
Energie kann nicht entstehen und kann nicht verlorengehen.

Wegen der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes ist es nicht möglich, eine Maschine zu konstruieren, aus der man mehr Energie gewinnt, als man hineinsteckt (Perpetuum mobile erster Art).

Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschinen wandeln Wärmeenergie in mechanische Arbeit um.



Wirkungsgrad

Es ist nicht möglich, durch eine Wärmekraftmaschine die gesamte zugeführte Wärmemenge in Arbeit umzuwandeln.
Ein Teil der zugeführten Wärmemenge wird stets an die Umgebung abgegeben (z. B. an den Kondensator der Dampfmaschine, durch den Auspuff der Verbrennungskraftmaschinen). Ferner wird ein Teil der erzeugten Arbeit durch Reibung in Wärme zurückverwandelt.

$$\eta = \frac{P_e}{P_i}$$ (↗ S. 25)

▷ **Bei jeder Wärmekraftmaschine ist der Wirkungsgrad kleiner als 1.**

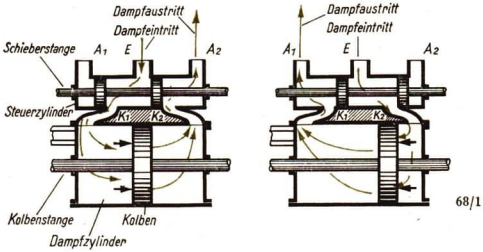
$\eta < 1$

Dampfkraftmaschinen

Der Druck erhitzten Wasserdampfes wird zur Verrichtung von Arbeit ausgenutzt.
Heizung: Brennstoffe werden verbrannt; Erzeugung von Wärmeenergie.
Dampferzeugungsanlage: Verbrennung von Kohle oder Heizöl. Erzeugung von Heißdampf mit hohem Druck (bis 100 at).

Kolbendampfmaschinen

Dampfkessel: Aus Speisewasser wird Wasserdampf mit hohem Druck erzeugt.
Arbeitszylinder: Dampf strömt ein und bewegt Kolben.



68/1

Hin- und hergehende Bewegung wird in Rotationsbewegung umgeformt (Pleuelstange, Schwungrad).
Wirkungsgrad bis maximal 25 %.

Dampfturbinen

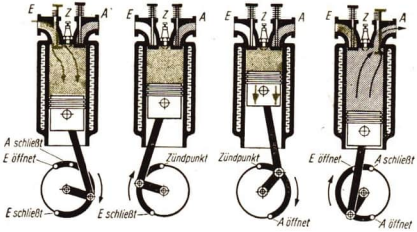
Düsensätze: Bringen den Dampf auf hohe Austrittsgeschwindigkeiten. Wirbelbildung wird durch Düsenform verhindert.
Laufräder: Werden durch auftreffenden Dampf in Bewegung gesetzt. Kinetische Energie des Dampfes wandelt sich in Rotationsenergie des Rades um.
Wirkungsgrad bis maximal 40 %.

Verbrennungskraftmaschinen

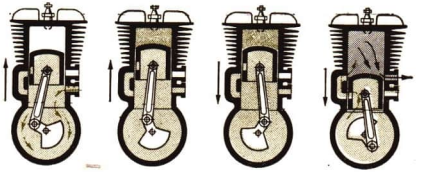
Bei der Verbrennung von Kraftstoffen (Benzin, Öle, Treibgase) entstehen Verbrennungsgase hohen Drucks. Diese werden zur Arbeitsverrichtung ausgenutzt.

Ottomotoren

Vergaser: Erzeugt aus flüssigen Kraftstoffen Kraftstoffnebel bzw. Kraftstoffdampf-Luft-Gemisch.
Arbeitszylinder: Verdichtetes Gemisch wird gezündet und verrichtet Arbeit.



69/1
Viertaktmotor



69/2
Zweitaktmotor

Hin- und hergehende Bewegung wird in Rotationsbewegung umgeformt (Pleuelstange, Kurbelwelle, Schwungrad).
Wirkungsgrad bis 24%.

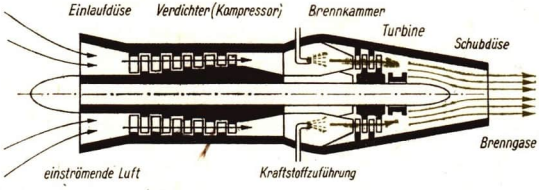
Dieselmotoren

Arbeitsweise ähnlich Ottomotoren. Kein Vergaser; flüssiger Kraftstoff (Mittelöl) wird in stark komprimierte und erhitzte Luft im Zylinder eingespritzt.
Wirkungsgrad bis 32%.

Gasturbinen

Kompressor: Ansaugen und Verdichten von Luft.
Brennkammer: Kraftstoff wird in komprimierte und erhitzte Luft eingespritzt. Nach Zündung findet dauernde Verbrennung statt.
Turbine: Wirkungsweise wie bei Dampfturbine.

Kinetische Energie der Verbrennungsgase wird in Rotationsenergie der Laufräder umgewandelt.
Wirkungsgrad bis 36 %.



70/1

Elektrizitätslehre

72 *Elektrostatik*

72 Elektrische Ladung
74 Elektrische Felder

77 *Der elektrische Strom*

77 Zusammenhänge zwischen Elektrostatik und elektrischem Strom
78 Wärme- und Lichtwirkung des elektrischen Stromes
79 Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes
82 Wechselwirkungen zwischen elektrischen und chemischen Vorgängen in leitenden Flüssigkeiten

87 *Stromstärke, Spannung und Widerstand*

87 Die Stromstärke
88 Die Spannung
89 Das Ohmsche Gesetz – Der Widerstand
90 Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

93 *Leistung, Arbeit und Energie des elektrischen Stromes*

93 Leistung
93 Elektrische Arbeit und Energie

95 *Die elektromagnetische Induktion*

95 Der Induktionsvorgang
96 Induktion – Induktivität
98 Anwendungen der elektromagnetischen Induktion

107 *Elektromagnetische Schwingungen und Wellen*

107 Elektromagnetische Schwingungen im geschlossenen Schwingkreis
109 Elektromagnetische Wellen

112 *Elektrizitätsleitung in Gasen, im Hochvakuum und in Festkörpern*

112 Die Stromleitung in Gasen
115 Die Stromleitung im Hochvakuum
119 Die Stromleitung in Festkörpern

E

Elektrizitätslehre

Elektrostatik

Dieses Teilgebiet der Elektrizitätslehre betrachtet vornehmlich das Verhalten ruhender elektrischer Ladungen und ihrer Felder.

Elektrische Ladung

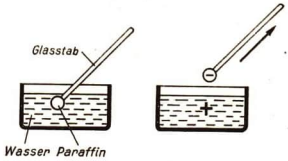
Atome besitzen positive Ladungen in ihrem Kern und negativ geladene Elektronen in ihrer Hülle (↗ S. 148). Diese Ladungen haben gleiche Beträge, so daß ein Atom nach außen hin elektrisch ungeladen (neutral) wirkt.

Positiv und negativ elektrisch geladene Körper

Unter bestimmten Bedingungen werden Elektronen von einem Körper abgegeben oder zusätzlich aufgenommen. Durch diese Vorgänge werden vorher neutrale Körper elektrisch geladen.

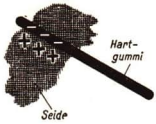
Vorgang	Ergebnis
Elektronenabgabe	Der Körper ist positiv geladen + (Elektronenmangel)
Elektronenaufnahme	Der Körper ist negativ geladen — (Elektronenüberschuß)

Ladungstrennung, d. h. Abgabe oder Aufnahme von Elektronen, kann bereits durch einfache Berührung erfolgen.



72/1 Aufladen einer Paraffinkugel beim Eintauchen ins Wasser

Zur Ladungstrennung bei festen Körpern muß durch Reiben für eine innige Berührung gesorgt werden.

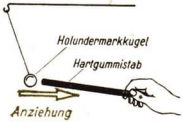


73/1 Aufladen eines Hartgummistabes durch Reiben

Körper und ihre Ladungen

Geriebener Körper	Bernstein	Hart-gummi	Schwefel	Siegellack	Glas
Ladung	–	–	–	–	+
Reibzeug	Seide	Seide	Wolltuch	Katzenfell	Leder
Ladung	+	+	+	+	–

▷ **Um entgegengesetzte Ladungen zu trennen, muß Energie aufgewendet werden.**



73/2

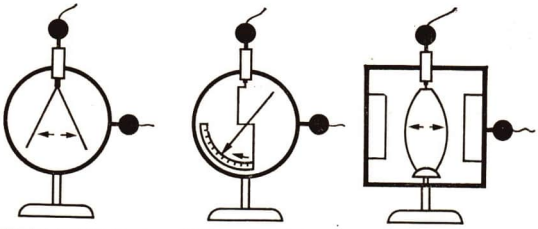
Kräfte zwischen geladenen Körpern

▷ **Gleichnamig elektrisch geladene Körper stoßen einander ab.**

Ungleichnamig elektrisch geladene Körper ziehen einander an.

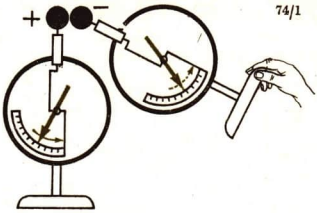
Ladungsnachweis

Zum Nachweis elektrischer Ladungen werden Geräte benutzt, mit denen die zwischen geladenen Körpern auftretenden Kräfte angezeigt werden.



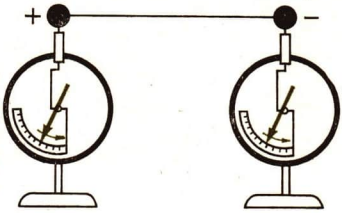
73/3 a) Goldblattelektroskop b) Braunsches Elektrometer c) Zweifadenelektrometer

Ladungsausgleich



74/1

Wird eine leitende Verbindung zwischen Körpern mit Elektronenüberschuß (negative Ladung) und Elektronenmangel (positive Ladung) hergestellt, dann fließen die Elektronen von den Körpern mit Elektronenüberschuß nach solchen mit Elektronenmangel; die Ladungen gleichen sich aus.



74/2

Beispiele

Ladungsausgleich durch Berührung (Bild 74/1)
Ladungsausgleich mittels Ladungsträger
Ladungsausgleich durch Leitung zwischen zwei Elektrometer (Bild 74/2)
Ladungsausgleich durch Leitung zwischen den Polen einer Taschenlampenbatterie

Entgegengesetzte gleich große Ladungen können sich ausgleichen.

Positive Ladungsträger sind in festen Körpern nicht frei beweglich.

Als Leiter für Elektronen eignen sich besonders Metalle, weil sie frei bewegliche Elektronen besitzen.

▶ **Die Maßeinheit der elektrischen Ladung ist das Coulomb (C).**
Die Ladungsmenge 1 C fließt bei einer Stromstärke von 1 A in 1 s durch den Leiterquerschnitt. (↗ S. 87)

$$1\,\mathrm{C} = 1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{s}$$

Der Entladevorgang kann benutzt werden, um Ladungen zu messen

▷ $Q = I \cdot t$
(bei konstanter Stromstärke).

Elektrische Felder

Das elektrische Feld

74/3

Auf einen genügend kleinen geladenen Körper wird im Raum zwischen zwei geladenen Körpern eine bestimmte Kraft ausgeübt, deren Größe und Richtung man messen kann.

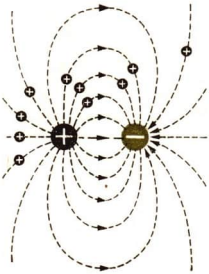
Das elektrische Feld erfüllt einen Raum, der elektrisch geladene Körper umgibt. Für jeden Ort des elektrischen Feldes kann die Kraft angegeben werden, die auf eine dorthin gebrachte sehr kleine Ladung wirkt. Das elektrische Feld ist eine Form der Materie.

Elektrische Feldlinien sind gedachte Linien: Für viele Punkte eines Feldes wird die Richtung der Kraft, die auf eine genügend kleine positive Ladung wirkt, durch Linien gleicher Richtung angegeben.

Feldlinienbilder (Bild 75/1) lassen die Formen elektrischer Felder erkennen; man erhält sie durch Versuche, bei denen nichtleitende kleine Körper in die Nähe großer geladener Körper gebracht werden.

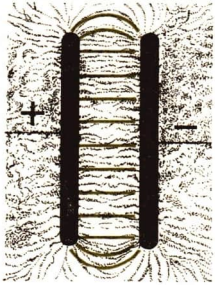
Häufig genügt es, elektrische Felder nur in einer Ebene zu betrachten. Um die Feldlinien sichtbar zu machen, benutzt man beispielsweise Grießkörner in Paraffinöl.

75/1

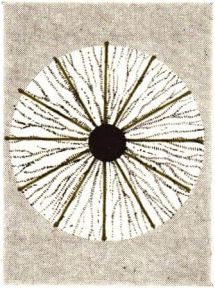


E

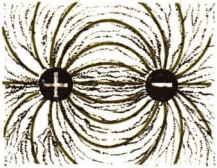
75/2



75/3



75/4



75/2 Elektrisches Feld zwischen geladenen Platten

75/3 Elektrisches Feld in der Nähe einer geladenen Kugel

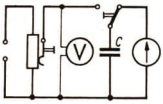
75/4 Elektrisches Feld zwischen zwei geladenen Kugeln

Festlegung:

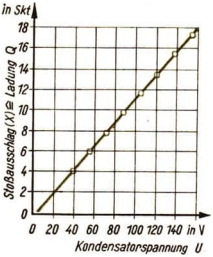
Elektrische Feldlinien im statischen (ruhenden) Feld beginnen und enden auf geladenen Körpern.
Die Feldlinien treten senkrecht aus der Oberfläche leitender Körper aus und verlaufen von der positiven zur negativen Ladung.

Kondensatoren

Sie dienen zum Speichern getrennter elektrischer Ladungen und als Widerstände in Wechselstromkreisen (↗ S. 99).



76/1
Versuch zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Q und U



Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung eines Kondensators

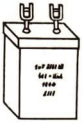
$Q \sim U$ darin bedeuten Q: elektrische Ladung
U: Spannung
▷ $Q = C \cdot U$ C: Kapazität des Kondensators

Die Ladung ist der Spannung proportional, der Proportionalitätsfaktor C heißt Kapazität des Kondensators.

▶ **Die Maßeinheit der Kapazität eines Kondensators ist das Farad (F). Die Einheit 1 F liegt vor, wenn bei einer Spannung 1 V eine Ladung 1 As vom Kondensator aufgenommen wird.**

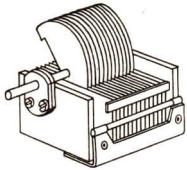
$$1\,\mathrm{F} = 1\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}}$$

Ausführungsformen von Kondensatoren



76/2 Blockkondensator: Als Träger der Ladungen dienen zwei Metallfolien, die durch einen Isolierstoff („Dielektrikum") voneinander getrennt sind

76/3 Keramikkondensator: Keramische Stoffe bilden das Dielektrikum



77/1 Elektrolytkondensator: Aluminiumplatte und Elektrolyt sind die Träger der beiden entgegengesetzten Ladungen. Eine Schicht von Aluminiumhydroxid $Al(OH)_3$ bildet das Dielektrikum. Die oxydierte Platte muß stets mit dem positiven Pol verbunden sein. Polungsfehler führen zur Auflösung des Dielektrikums und zur Zerstörung des Kondensators

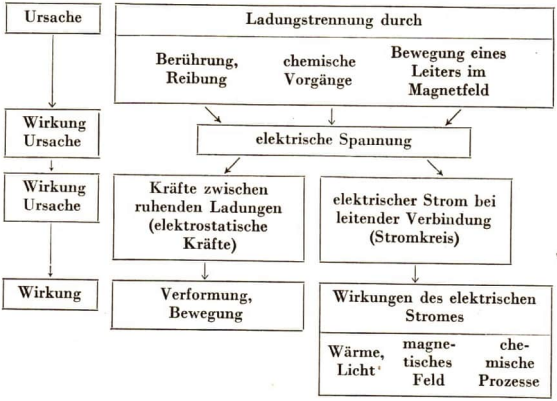
77/2 Drehkondensator: Durch Drehen eines Plattensatzes läßt sich die wirksame Kondensatorfläche und damit die Kapazität verändern

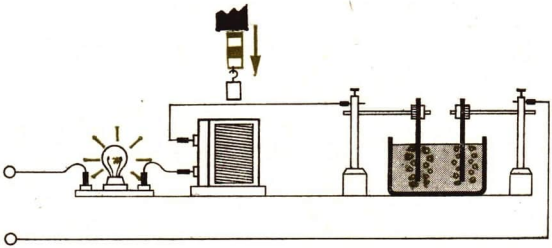
E

Der elektrische Strom

Zusammenhänge zwischen Elektrostatik und elektrischem Strom

▷ **Werden elektrische Ladungen bewegt, so fließt ein „elektrischer Strom". Als elektrische Stromrichtung wurde die Richtung vom positiven zum negativen Pol (entgegengesetzt zur Bewegung der Elektronen) festgelegt.**





78/1 Geschlossener Stromkreis mit verschiedenen Stromwirkungen

Wärme- und Lichtwirkung des elektrischen Stromes

Erwärmung fester Leiter bei Stromdurchgang

Die Elektronen stoßen bei ihrer Bewegung durch den Leiter ständig mit Gitterbausteinen zusammen. Dabei geben die Elektronen Energie ab (↗ S. 24).
Dem Strom wird ein Widerstand entgegengesetzt. Die Atome des Leiters werden angestoßen; die Temperatur (↗ S. 53) des Leiters steigt.

Vorgänge im Lichtbogen

1. Der Lichtbogen wird gezündet. Starke Erwärmung an der Übergangsstelle.
2. Die Elektroden werden auseinandergezogen. An der erhitzten Stelle der Katode (negative Kohle) treten Elektronen aus (Glühemission ↗ S. 115).
3. Die Elektronen bewegen sich mit großer Geschwindigkeit zur Anode (positiver Pol). Unterwegs und beim Auftreffen auf der Anode werden neutrale Atome durch Zusammenstöße ionisiert. Im Lichtbogen bewegen sich ständig Elektronen von der Katode zur Anode und positive Ionen von der Anode zur Katode. Gas und Elektroden erwärmen sich durch Zusammenstöße.

Wärme- und Lichtwirkung

bei Leitung in Festkörpern

	gestreckte Leiter		gewendelte Leiter	
	Leiterstäbe (Silit, Kohlenstoff und Quarz)	**Drähte**	**Einfachwendeln**	**Doppelwendeln**
Anwendungen	Glühöfen Härteöfen	Schmelzsicherungen	Tauchsieder Kochplatten Heizkissen Bügeleisen Lötkolben Futterdämpfer	Glühlampen Infrarotstrahler Hell- und Dunkelstrahler

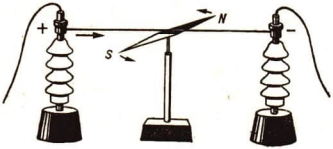
bei Leitung in Gasen

	unselbständige Gasentladung (z. B. Bogenentladung)	selbständige Gasentladung (geringe Wärmeentwicklung)	
			mit zusätzlichem Leuchtstoff
Anwendungen	Bogenlampe Schweißgerät Lichtbogenofen	Leuchtröhren Glimmlampen	Leuchtstofflampen

Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes

Oerstedversuch

HANS CHRISTIAN OERSTED (dänischer Physiker, 1777 bis 1851) entdeckte den Zusammenhang zwischen elektrischem Strom und Magnetismus.



Ein elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld, das eine Magnetnadel ablenkt.

Das magnetische Feld

▶ **Das magnetische Feld erfüllt einen Raum, der stromdurchflossene Körper oder Dauermagnete umgibt. Für jeden Ort des magnetischen Feldes kann die Kraft angegeben werden, die auf einen sehr kleinen dorthin gebrachten magnetischen Körper wirkt.**
Das magnetische Feld ist eine Form der Materie.

Magnetische Feldlinien

(↗ S. 75) geben für viele Punkte des magetischen Feldes die Richtung an, in die sich eine sehr kleine Magnetnadel einstellt.

Feldlinienbilder lassen die Formen magnetischer Felder erkennen; man erhält Feldlinienbilder, wenn man z. B. Eisenfeilspäne in ein magnetisches Feld bringt.

Rechte-Faust-Regel für einen stromdurchflossenen geraden Leiter

▷ **Umschließt man mit der rechten Faust einen stromdurchflossenen geraden Leiter so, daß der abgespreizte Daumen in die elektrische Stromrichtung zeigt, so zeigen die gekrümmten Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien an (Bild 80/1).**

80/1

80/2

Rechte-Faust-Regel für eine stromdurchflossene Spule

▷ **Umschließen die gekrümmten Finger der rechten Faust die Spule so, daß sie in die elektrische Stromrichtung zeigen, so zeigt der abgespreizte Daumen nach dem Nordpol der Spule (Bild 80/2).**

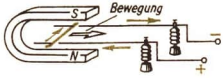
Die magnetische Kraft des Feldes einer langen Spule

ist

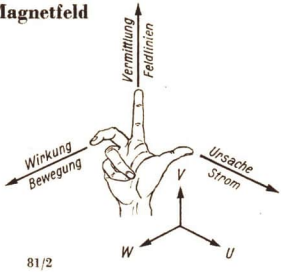
1. der Windungszahl proportional; bei l = const
2. der Stromstärke proportional
3. der Spulenlänge umgekehrt proportional; bei I = const

Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld

Die Bewegungsrichtung eines stromdurchflossenen Leiters im Feld eines Magneten läßt sich nach der U-V-W-Regel bestimmen.



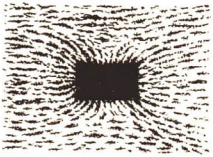
81/1



81/2

Eisen im Magnetfeld

Die Feldlinien verdichten sich innerhalb des Eisens. Das Eisen wird magnetisiert.



81/3

Das Innere eines hohlen Eisenkörpers bleibt fast vollständig von magnetischen Feldlinien frei (Magnetische Schirmwirkung).

81/4

Die magnetische Kraft des Feldes einer Spule wird durch einen Eisenkern verstärkt.

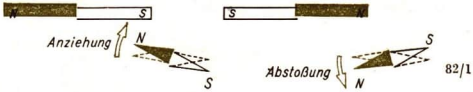
Diese Erscheinung wird technisch im Elektromagneten genutzt (z. B. Relais, Lasthebemagnet).

Dauermagnete

Die Felder von Dauermagneten sind den entsprechenden Feldern von Elektromagneten ähnlich.
Ein Dauermagnet behält seine magnetische Eigenschaft, ohne daß ein Stromfluß erkennbar ist.

Anziehung und Abstoßung zwischen Magnetpolen

Die magnetische Kraft ist an den Polen am stärksten.



▷ **Ungleichnamige Pole ziehen einander an; gleichnamige Pole stoßen einander ab.**

Magnetische Werkstoffe

Von den reinen Stoffen besitzen vornehmlich Eisen, Kobalt und Nickel magnetische Eigenschaften.
Als magnetische Werkstoffe werden meist Legierungen und keramische Stoffe verwendet.

Wechselwirkungen zwischen elektrischen und chemischen Vorgängen in leitenden Flüssigkeiten

Elektrolytische Flüssigkeiten

Elektrolyte sind Stoffe, die in gelöstem oder geschmolzenem Zustand den elektrischen Strom leiten.

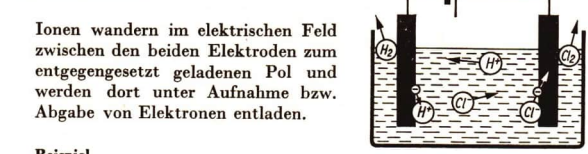
Ionen sind elektrisch geladene Teilchen, die aus Atomen, Molekülen oder Atomgruppen entstanden sind.

Beispiele

	Ladung	**Positive Ionen**	**Negative Ionen**
einwertige Ionen	$\frac{1,6}{10^{19}}$ As	1 Außenelektron fehlt H^+ Na^+ Ag^+ Cu^+	1 Außenelektron zuviel Cl^- NO_3^- OH^-
zweiwertige Ionen	$\frac{3,2}{10^{19}}$ As	2 Außenelektronen fehlen Cu^{2+} Zn^{2+}	2 Außenelektronen zuviel SO_4^{2-}
dreiwertige Ionen	$\frac{4,8}{10^{19}}$ As	3 Außenelektronen fehlen Al^{3+}	3 Außenelektronen zuviel PO_4^{3-}

▷ **Die Leitfähigkeit von elektrolytischen Flüssigkeiten (Elektrolytlösungen) beruht auf dem Vorhandensein von frei beweglichen getrennten Ionen.**

Frei bewegliche getrennte Ionen entstehen durch Dissoziation:

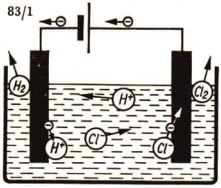


Die Stoffe dissoziieren verschieden stark. Chlorwasserstoff und Natriumchlorid sind in verdünnter wäßriger Lösung nahezu vollständig dissoziiert. In destilliertem Wasser ist von etwa einer Milliarde Wassermolekülen nur eins dissoziiert.

Der Ionenstrom

Ionen wandern im elektrischen Feld zwischen den beiden Elektroden zum entgegengesetzt geladenen Pol und werden dort unter Aufnahme bzw. Abgabe von Elektronen entladen.

83/1



Beispiel

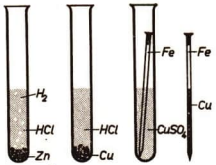
In Salzsäure bilden die entladenen Ionen H_2- und Cl_2-Moleküle.
Mit dem Stromfluß ist eine chemische Zersetzung, genannt Elektrolyse, des Elektrolyten verbunden.

Elektrischer Strom ist
außerhalb einer Elektrolytlösung ein Elektronenstrom,
innerhalb einer Elektrolytlösung ein Ionenstrom.

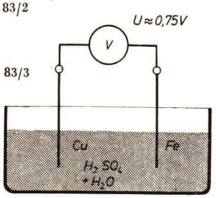
Auflösen von Metallen; Lösungsneigung

Beispiele

Reaktion von Zinkspänen mit Salzsäure
$Zn + 2\,H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2$
Zink besitzt eine größere Lösungsneigung als Wasserstoff
Keine Reaktion zwischen Kupferspänen und Salzsäure: Kupfer besitzt eine geringere Lösungsneigung als Wasserstoff
Kupferüberzug auf Eisenkörper:
$2\,Fe + 2\,Cu^{2+} \rightarrow 2\,Fe^{2+} + 2\,Cu$
Kupfer besitzt eine geringere Lösungsneigung als Eisen (Bild 83/2)
Kupfer-Eisen-Element: Zwischen zwei Elektroden mit unterschiedlicher Lösungsneigung in einer Elektrolytlösung entsteht eine Spannung (Bild 83/3)



83/2



83/3

Anwendungen der Elektrolyse

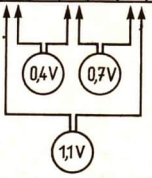
	Gewinnung von Reinmetallen		Galvanotechnik		Aloxydverfahren
	Schmelzfluß-elektrolyse	Elektrolyse wäßriger Metallsalzlösungen	Galvanostegie	Galvanoplastik	
	a	b	c	d	e
Vorgang	Metallsalze oder Metalloxide werden geschmolzen und die Schmelze elektrolysiert. Abscheidung des reinen Metalls an der Katode.	Metallsalze in wäßriger Lösung als Elektrolyt. Unreines Metall als Anode wird abgebaut. Abscheidung von Reinmetall an der Katode.	Vorgang wie unter b) Ziel: Haltbare Metallüberzüge auf Werkstücken. Werkstück als Katode im Elektrolysebad.	Vorgang wie b) Katode aus nichtleitendem Material mit Graphitüberzug. Abgeschiedenes Metall kann von Katode abgelöst werden.	H_2SO_4 als Elektrolyt, Aluminium-Werkstück als Anode. Oberflächenschichten des Werkstücks werden bis etwa 30 μm Tiefe oxydiert.
Anwendungsbeispiele	Gewinnung von Aluminium, Natrium, Kalium, Kalzium, Magnesium, Barium	Gewinnung von Reinstkupfer.	Verchromen, Vernickeln, Versilbern, Verkupfern, Verzinken zur Oberflächenveredlung	Herstellen von Druckstöcken für Buchdruck und von Prägestempeln für Schallplattenproduktion	Herstellen einer schützenden Oxidschicht auf Aluminiumwerkstücken

Gegenüber Wasserstoff

	Spannung in Volt													
+	Pt	Au	Hg	Ag	C	Cu	H	Pb	Fe	Zn	Al	Na	K	−
	1,6	1,4	0,9	0,8	0,7	0,3	0,0	0,1	0,4	0,8	1,7	2,7	2,9	

Elektrochemische Spannungsreihe

Die Stoffe lassen sich in einer Reihe anordnen, bei der diejenigen mit geringster Lösungsneigung am weitesten links, die mit größter Lösungsneigung am weitesten rechts angeordnet sind.



▷ **Zwischen zwei Elektroden herrscht eine um so größere Spannung, je weiter ihre Stoffe in der Reihe auseinander stehen („Spannungsreihe").**

E

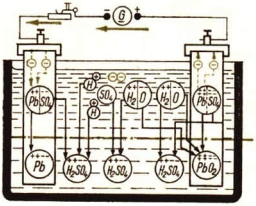
Vorgänge beim Laden und Entladen eines Bleiakkumulators

Ladevorgang (Bild 85/1)

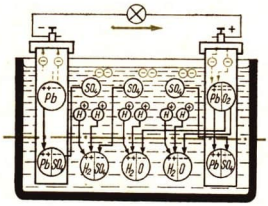
Positiver Pol: $PbSO_4 + SO_4^{2-} + 2\,H_2O - 2\,e^- \rightarrow PbO_2 + 2\,H_2SO_4$

Negativer Pol: $PbSO_4 + 2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow Pb + H_2SO_4$.

Beim Laden eines Bleiakkumulators werden die ursprünglich gleichartigen Elektroden ($PbSO_4$) unterschiedlich. Die Säuredichte steigt. Durch den Ladestrom werden dem positiven Pol Elektronen entzogen, dem negativen Pol Elektronen zugeführt.



85/1



85/2

Entladevorgang (Bild 85/2)

Positiver Pol: $PbO_2 + 2\,H^+ + H_2SO_4 + 2\,e^- \rightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O$

Negativer Pol: $Pb + H_2SO_4 + SO_4^{2-} - 2\,e^- \rightarrow PbSO_4 + H_2SO_4$.

Beim Entladen eines Bleiakkumulators werden die Elektroden wieder gleichartig. Die Säuredichte sinkt. Der negative Pol gibt Elektronen an den äußeren Stromkreis ab, der positive Pol nimmt sie auf.

Anwendungen der Spannungsreihe

	Galvanische Elemente (Gewinnung elektrischer Energie aus chemischer Energie)			**Akkumulatoren *) (Speicherung elektrischer Energie in Form chemischer Energie)**		
	mit flüssiger Elektrolytlösung		Trockenelemente (Elektrolytlösung ist eingedickt)	Blei-Akku	**Alkalische Akkumulatoren**	
					Nickel-Eisen-A.	Nickel-Cadmium-A.
Pluspol	Kupferplatte Cu	Kohleplatte C	Braunstein MnO_2	Blei (IV)-oxid PbO_2	Nickelhydroxid $Ni(OH)_3$	Nickelhydroxid $Ni(OH)_3$
Minuspol	Zinkplatte Zn	Zinkplatte Zn	Zinkbecher Zn	Bleischwamm Pb	Eisen Fe	Kadmium Cd
Elektrolytlösung	Salzsäure, verdünnt HCl	Salzsäure, verdünnt HCl	Salmiak NH_4Cl wäßrige Lösung, mit Sägemehl verdickt	Schwefelsäure H_2SO_4 (Dichte 1,24 g/cm$_3$)	Kalilauge KOH	Kalilauge KOH
Spannung je Zelle	1,1 V	1,5 V	1,5 V	2,0 bis 2,4 V	1,4 V	1,8 V

*) Alle Angaben beziehen sich auf geladene Akkumulatoren.

Die Stromstärke

Definition der Stromstärkeeinheit

Die elektrische Stromstärke wird durch die Anzahl der Elektronen gekennzeichnet, die in einer Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließen.

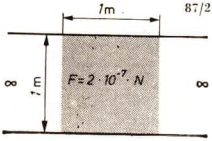
▶ **Die Maßeinheit der Stromstärke ist das Ampere (A).**

(ANDRE MARIE AMPÈRE, 1775 bis 1836).

87/1

Zur Definition der Stromstärkeeinheit benutzt man die magnetische Kraft, die zwei Leiter aufeinander ausüben.

Fließt derselbe Strom durch zwei lange, gerade, starre, unendlich dünne, parallele Leiter, deren Abstand 1 m ist, und üben diese je 1 m Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ N aufeinander aus, dann beträgt die Stromstärke 1 A.



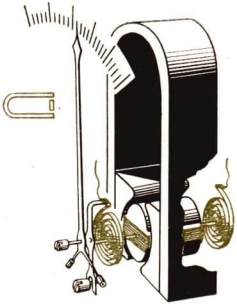
87/2

Stromstärkemeßgeräte

nutzen meist die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes aus.

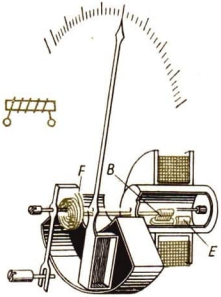
Meßwerk eines Drehspulgeräts

Eine vom Meßstrom durchflossene Spule dreht sich im magnetischen Feld eines Dauermagneten.
Nur für Gleichstrom verwendbar.


87/3

Meßwerk eines Dreheisengeräts

Zwei Teile aus Weicheisen (B und E) werden im magnetischen Feld einer Spule magnetisiert. Die nebeneinanderliegenden gleichnamigen Pole stoßen einander ab.
Für Gleich- und Wechselstrom verwendbar!



87/4

Die Spannung

Die Spannung ist Ursache für den Stromfluß in einem Stromkreis.

▶ **Die Maßeinheit der Spannung ist das Volt (V).**

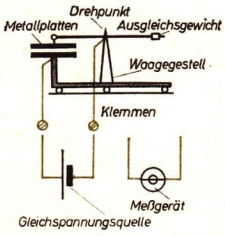
(ALESSANDRO VOLTA, 1745 bis 1827).

$$1\,\mathrm{V} = 1\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{A}}$$

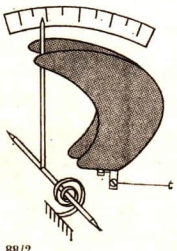
Wird die Leistung 1 W durch die Stromstärke 1 A erzeugt, so ist die Spannung 1 V wirksam. (↗ S. 23

Spannungsmeßgeräte

	Statische Spannungsmessung	Auf Stromstärkemessung beruhende Spannungsmessung
Prinzip	Kräfte zwischen ruhenden Ladungen werden zur Spannungsmessung benutzt	Magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes werden zur Spannungsmessung benutzt (Proportionalität zwischen Spannung und Stromstärke)
Beispiele	Spannungswaage (Bild 88/1) Statischer Spannungsmesser (Bild 88/2)	Drehspulgerät Dreheisengerät
Kennzeichen	Kein Stromfluß	Möglichst geringer Stromfluß durch hohen Innenwiderstand des Meßgeräts



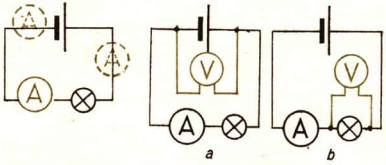
88/1



88/2

Vergleich von Stromstärke- und Spannungsmessungen

	Stromstärke I	Spannung U
Schaltung des Meßgeräts	im Hauptstromkreis	im Nebenstromkreis
Innenwiderstand des Meßgeräts gegenüber R des Stromkreises	klein	groß



E

Das Ohmsche Gesetz — Der Widerstand

Ohmsches Gesetz (für Gleichstrom)

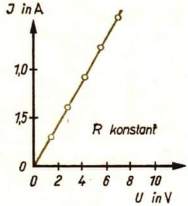
(Georg Simon Ohm, 1789 bis 1854).

$U \sim I$

▷ $U = R \cdot I$

Die Stromstärke ist der Spannung proportional.
Der Proportionalitätsfaktor R heißt Widerstand.

▷ $R = \frac{U}{I}$



Das Ohmsche Gesetz gilt nur bei konstanter Temperatur eines Leiters.

▶ **Die Maßeinheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω).**
Ein Leiter besitzt den Widerstand 1 Ω, wenn an seinen Enden die Spannung 1 V liegt und dabei ein Strom mit einer Stärke von 1 A fließt.

$1\ \Omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}}$

Doppelte Bedeutung des Wortes „Widerstand"

1. Physikalische Größe (kennzeichnet die Eigenschaft eines Leiters, den elektrischen Strom zu schwächen).
2. Schaltelement (technischer Widerstand).

Zusammenhang zwischen Widerstand, Länge und Querschnitt eines Leiters

Der Widerstand eines Leiters ist seiner Länge direkt, der Querschnittsfläche umgekehrt proportional. Der Proportionalitätsfaktor heißt **spezifischer Widerstand.**

$$R \sim l, \quad R \sim \frac{1}{A}, \quad R = \varrho \frac{l}{A}$$

▷ **Der spezifische Widerstand ist eine Werkstoffeigenschaft. Er ist vom Stoff und von der Temperatur des Leiters abhängig.**

$$\varrho = \frac{R \cdot A}{l}$$

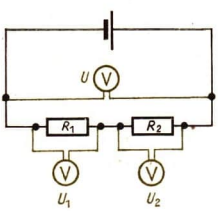
▶ **Die Maßeinheit des spezifischen Widerstandes ist das Ohmmeter (Ωm). Ein Stoff besitzt den spezifischen Widerstand 1 Ωm, wenn ein Leiter mit dem Querschnitt 1 m² und der Länge 1 m einen Widerstand von 1 Ω aufweist.**

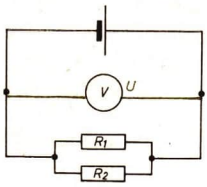
Spezifische Widerstände (bei Zimmertemperatur)

Stoff (Leiter)	ϱ / Ω · m	Stoff (Isolator)	ϱ / Ω · m
Silber	$0{,}15 \cdot 10^{-7}$	Marmor	10^{7} bis 10^{9}
Kupfer	$0{,}16 \cdot 10^{-7}$	Glas	10^{11}
Aluminium	$0{,}24 \cdot 10^{-7}$	Porzellan	10^{12}
Eisen	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$	Quarzglas	10^{16}
Konstantan	$0{,}5 \cdot 10^{-7}$	Bernstein	10^{16}

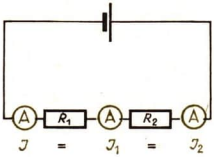
Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

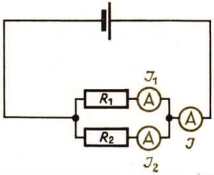
	Reihenschaltung	Parallelschaltung
▷ **Spannungen**	$U = U_1 + U_2$ Die Summe der Teilspannungen ist gleich der Gesamtspannung	$U = U_1 = U_2$ An den Zweigwiderständen liegt die gleiche Spannung





	Reihenschaltung	Parallelschaltung
▷ **Stromstärken**	$I = I_1 = I_2$ Die Stromstärke ist an allen Punkten eines unverzweigten Stromkreises gleich	$I = I_1 + I_2$ Die Summe der Stromstärken in den Zweigen ist gleich der Stromstärke im unverzweigten Teil des Stromkreises
▷ **Widerstände**	$R_{ges} = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
▷ **Wichtige Proportionen**	$U_1 : U_2 = R_1 : R_2$ Die Teilspannungen sind den Teilwiderständen proportional	$I_1 : I_2 = R_2 : R_1$ Die Stromstärken in den Zweigen sind den entsprechenden Widerständen im verzweigten Stromkreis umgekehrt proportional





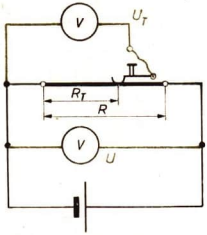
Spannungsteilerschaltung

Darin bedeuten

U_T: Teilspannung
U : Gesamtspannung
R_T: Teilwiderstand
R : Gesamtwiderstand

▷ **Die Teilspannung verhält sich zur Gesamtspannung wie der Teilwiderstand zum Gesamtwiderstand.**

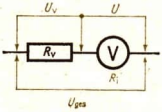
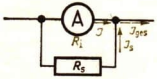
$$U_T : U = R_T : R$$



91/3 Längs eines Widerstandes fällt eine Spannung ab; über einen Schleifkontakt kann eine Teilspannung abgegriffen werden

E

Meßbereichserweiterung bei Meßgeräten

	Spannungsmesser	Stromstärkemesser
Prinzip	Vorschalten eines Widerstandes	Parallelschalten eines Widerstandes
		
Symbole	U_{ges}: Gesamtspannung	I_{ges}: Gesamtstromstärke
	U: am Meßwerk liegende Teilspannung	I: Stromstärke des durch das Meßwerk fließenden Zweigstroms
	U_v: am Vorschaltwiderstand liegende Teilspannung	I_s: Stromstärke des durch den Nebenwiderstand fließenden Zweigstroms
	R_v: Vorschaltwiderstand	R_s: Parallelwiderstand
	R_i: innerer Widerstand des Meßwerks	R_i: innerer Widerstand des Meßwerks
	$U_v + U = U_{ges}$ $U_v : U = R_v : R_i$	$I_s + I = I_{ges}$ $I_s : I = R_i : R_s$
Beispiele	Vollausschlag des Meßwerks bei $U = 1$ mV	Vollausschlag des Meßwerks bei $I = 2$ mA
	Gewünschter Meßbereich 1 V	Gewünschter Meßbereich 5 A
	$U_{ges} = 1$ V $R_i = 0{,}5\ \Omega$	$I_{ges} = 5$ A $R_i = 0{,}5\ \Omega$
	$U_v = U_{ges} - U$	$I_s = I_{ges} - I$
	$U_v = 1\text{ V} - 1\text{ mV}$	$I_s = 5\text{ A} - 2\text{ mA}$
	$U_v = 999$ mV	$I_s = 4998$ mA
	$U_v : U = R_v : R$	$I_s : I = R_i : R_s$
	$R_v = \frac{U_v}{U} \cdot R_i$	$R_s = \frac{I}{I_s} \cdot R_i$
	$R_v = 999 \cdot 0{,}5\ \Omega$	$R_v = \frac{2\text{ mA}}{4998\text{ mA}} \cdot 0{,}5\ \Omega$
	$R_v \approx 500\ \Omega$	$R_s \approx \frac{1}{5000}\ \Omega$

Leistung, Arbeit und Energie des elektrischen Stromes

Der elektrische Strom kann Arbeit verrichten; somit kann man von elektrischer Energie sprechen (↗ S. 24).

Leistung

Die Leistung, die ein elektrischer Strom aufzubringen vermag, wird durch die Stromstärke und durch die Spannung bestimmt.

▷ $P = I \cdot U$

▶ **Die Maßeinheit der Leistung ist das Watt (1 W) (↗ S. 23).**

E

Elektrische Arbeit und Energie

Elektrische Arbeit

Es gilt die aus der Mechanik (↗ S. 23) bekannte Beziehung:

$$P = \frac{W}{t}.$$

Demzufolge:

▷ $W = P \cdot t \qquad W = U \cdot I \cdot t$

Arbeit ist das Produkt aus Leistung und Zeit.

▶ **Die Maßeinheit der elektrischen Arbeit ist die Wattsekunde (Ws). Die Arbeit 1 Ws wird verrichtet, wenn eine Sekunde lang die Leistung 1 W abgegeben wird. 1 Ws = 1 W · 1 s**

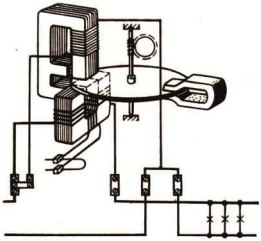
Abgeleitete Maßeinheiten:

Wattstunde	1 Wh = 3600 Ws
Kilowattstunde	1 kWh = 1000 Wh = 10^3 Wh = $3{,}6 \cdot 10^6$ Ws

Umrechnungstabelle ↗ S. 194.

Meßgeräte für die elektrische Arbeit

Die elektrische Arbeit kann mit dem Elektrizitätszähler gemessen werden.

Prinzip	 Leichtmetallscheibe dreht sich infolge von Wirbelströmen, deren Spannungen durch drei Spulen in ihr induziert werden. Gleichzeitig wird sie durch einen Dauermagneten gebremst, so daß bei konstantem Strom die Drehzahl konstant ist (↗ S. 9)	
Spulen	1 Stromspule	1 Spannungsspule
Ohmscher Widerstand	klein (dicker Draht)	groß (dünner Draht)
Induktiver Widerstand	klein (wenige Windungen)	groß (viele Windungen)
Strom	Vom Nutzstrom durchflossen (Hauptstromkreis)	Stromstärke der anliegenden Spannung proportional (Nebenstromkreis)
Einfluß auf die Drehzahl	$n \sim I$	$n \sim U$
Gesamteinfluß auf die Drehzahl	$n \sim I \cdot U$	
Anzahl der Umdrehungen in der Zeit *t*	$n \cdot t \sim I \cdot U \cdot t$ $n \cdot t \sim W$ Die Anzahl der Umdrehungen in der Zeit t ist der elektrischen Arbeit proportional	

Elektrische Energie

Elektrische Energie wird durch Umwandlung anderer Energiearten gewonnen und läßt sich wieder in andere Energiearten umwandeln (↗ S. 66). Maßeinheiten ↗ S. 93 und S. 23.

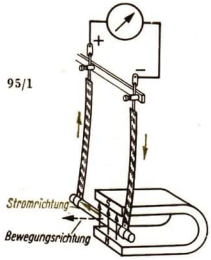
Beispiele für Energieumwandlungen

Elektrische Energie erzeugende Energieart	Geräte zur Energieumwandlung		Geräte zur Energieumwandlung	Aus elektrischer Energie erzeugte Energieart
Mechanische Energie	Lichtmaschine, Generator	1 Ws = 1 Nm	Elektromotor, Elektromagnet	Mechanische Energie
Chemische Energie	Akkumulator, galvanisches Element	**Elektroenergie**	Akkumulator, Elektrolysegeräte	Chemische Energie
Wärmeenergie	Thermoelement	1 Ws = 0,239 cal	Elektrische Wärmegeräte	Wärmeenergie
Lichtenergie	Fotoelement		Glühlampen	Lichtenergie

E

Die elektromagnetische Induktion

Der Induktionsvorgang



95/1

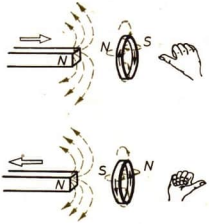
Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, so wird in ihm eine **Spannung induziert**; in dem geschlossenen Stromkreis fließt dann ein **induzierter Strom.**

Elektromagnetische Induktion in einer Spule

▷ **Ändert sich das eine Spule durchsetzende magnetische Feld, so wird in ihr eine Spannung induziert.**

(MICHAEL FARADAY, 1791 bis 1867)

Lenzsche Regel



▷ **Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er seiner Ursache entgegenwirkt.**

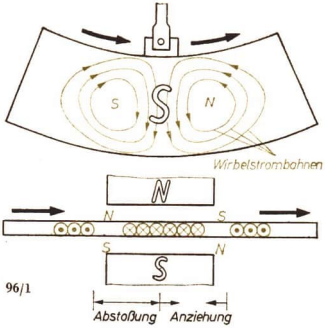
(H. F. LENZ, 1804 bis 1865)

Die Lenzsche Regel folgt aus dem Gesetz von der Erhaltung der Energie (↗ S. 66).

Wirbelströme

treten in massiven Metallteilen auf, wenn diese in einem Magnetfeld bewegt werden oder einem veränderlichen Magnetfeld ausgesetzt sind; sie sind oftmals unerwünschte Begleiterscheinungen beim Induktionsvorgang.

Folgen: Energieverluste durch Wärmeentwicklung.
Verhinderung: Verwendung geblätterter Eisenkerne.
Anwendung: Wirbelstrombremse.



96/1

Induktion — Induktivität

Das Induktionsgesetz

▷ **Die Induktionsspannung U_{ind} ist direkt proportional der Windungszahl N, der Änderungsgeschwindigkeit der magnetischen Feldstärke $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ der Fläche A der Induktionsspule und hängt von den magnetischen Eigenschaften der Spulenfüllung ab.**

$$U_{ind} = -\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot A \frac{\Delta H}{\Delta t}.$$

Darin bedeuten

H: magnetische Feldstärke,
μ_r: Permeabilität der Spulenfüllung ($\mu_{Luft} \approx \mu_{Vac} = 1$),

Induktionskonstante $\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$.

Unter Permeabilität versteht man die magnetische Leitfähigkeit eines Stoffes.

Selbstinduktion

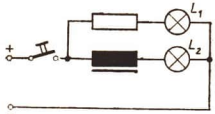
Ändert man die elektrische Stromstärke in einer Spule (Abschalten, Wechselstrom), so ändert sich ebenfalls ihr magnetisches Feld; dabei wird in dieser Spule eine Spannung induziert: Diesen Vorgang nennt man Selbstinduktion.

Die Selbstinduktion bewirkt beim Einschalten des Stromes ein langsames Aufleuchten der Lampe L_2, während L_1 sofort aufleuchtet.

I steigt an (Einschaltvorgang)

U_{ind} ist U entgegengerichtet

I steigt nur langsam an

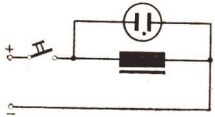


97/1

Beim Öffnen des Schalters entsteht eine hohe Spannung: Eine Glimmlampe wird gezündet.

I nimmt ab (Ausschaltvorgang)

U_{ind} ist U gleichgerichtet



97/2

Die Richtung der selbstinduzierten Spannung ist entsprechend der Lenzschen Regel beim Einschalten der ursprünglichen Spannung entgegengesetzt; beim Ausschalten der ursprünglichen Spannung gleich.

E

Induktivität

▶ **Maßeinheit für die Induktivität**

Ein Leiter besitzt die Induktivität 1 Henry (H), wenn in ihm bei Änderung der Stromstärke 1 A in der Zeit von 1 s eine Spannung von 1 V induziert wird.

$$1\,\mathrm{H} = \frac{1\,\mathrm{V}}{1\,\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{s}}},\quad 1\,\mathrm{H} = 1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}$$

(J. Henry, 1797 bis 1878)

Für die induzierte Spannung gilt:

▷ $$U_{ind} = -L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Darin bedeuten

U_{ind}: induzierte Spannung,
L: Induktivität der Spule,
ΔI: $I_2 - I_1$ = Stromstärkeänderung,
Δt: $t_2 - t_1$ = Zeit, in der ΔI erfolgt.

▷ **U_{ind} ist direkt proportional der Geschwindigkeit, mit der sich die Stromstärke ändert.**

Die Induktivität einer Spule hängt ab von

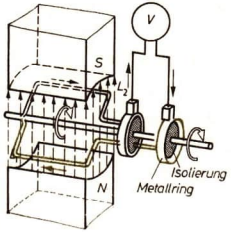
der Windungszahl N, der Länge l und
dem Querschnitt A, der Form der Spule.

Für eine zylinderförmige Spule, deren Durchmesser klein gegenüber der Länge ist, gilt

▷ $$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}.$$

Wird eine Spule mit einem Eisenkern versehen, so vergrößert sich ihre Induktivität beträchtlich.

Anwendungen der elektromagnetischen Induktion

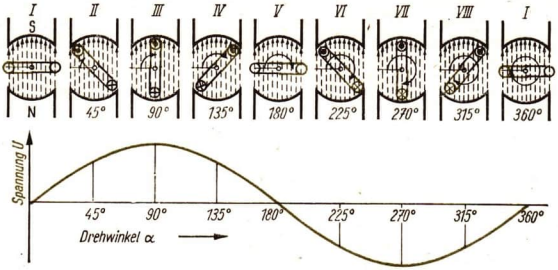


Wechselstrom

▷ **Bei Rotation einer Leiterschleife in einem Magnetfeld wird in ihr eine Wechselspannung induziert.**

Kenngrößen des Wechselstromes

Man mißt die in einer gleichmäßig rotierenden Leiterschleife induzierte Spannung U und trägt sie grafisch über den Drehwinkel α auf.



Scheitelspannung u_{max}: Höchstwert der Spannung bei $\alpha = 90°$ bzw. 270°.

Scheitelstromstärke i_{max}: Höchstwert der Stromstärke in einem geschlossenen Wechselstromkreis.

Bei gleichmäßiger Drehung der Leiterschleife gilt:

Der Drehwinkel α ist der Zeit t proportional.

$\alpha \sim t$

Die Werte von Spannung und Stromstärke ändern sich periodisch zwischen ihrem positiven und negativen Scheitelwert, sie führen **Schwingungen** aus (↗ S. 40).
Die Wechselspannung hat einen sinusförmigen Verlauf, es gilt

$u = u_{max} \cdot \sin \alpha$.

Phasenwinkel oder Phase α. Aus $\alpha \sim t$ folgt $\alpha = \omega t$.

Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f$.

Für Spannung und Stromstärke im Wechselstromkreis (mit Ohmschen Widerständen) gilt dann

$u = u_{max} \cdot \sin \omega t$,

$i = i_{max} \cdot \sin \omega t$.

Effektivwerte von Stromstärke und Spannung:

$$U_{eff} = \frac{u_{max}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7\ u_{max};\quad I_{eff} = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7\ i_{max}.$$

Mit den Effektivwerten von Stromstärke und Spannung berechnet man die mittlere Leistung ebenso wie beim Gleichstrom. Wechselstrommeßgeräte zeigen im allgemeinen die Effektivwerte an.

Beispiel Netzspannung:

$U_{eff} = 220$ V

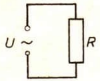
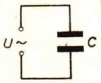
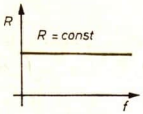
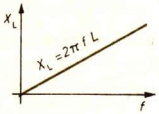
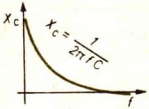
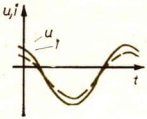
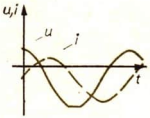
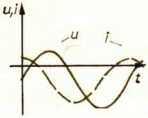
$u_{max} = \sqrt{2} \cdot U_{eff} = \sqrt{2} \cdot 220$ V,

$u_{max} = \underline{\underline{311\ \text{V}}}$

Mit Katodenstrahloszillografen können Scheitelwerte direkt gemessen werden.

Widerstände im Wechselstromkreis

In einem Wechselstromkreis können Ohmsche, kapazitive und induktive Widerstände einzeln, gemischt und gemeinsam auftreten. Das Ohmsche Gesetz (↗ S. 89) läßt sich auch auf den Wechselstromkreis anwenden.

Ohmscher Widerstand R	Induktiver Widerstand X_L	Kapazitiver Widerstand X_C
		
$R = \text{const}$	$X_L = \omega L = 2\pi f L$	$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$
$R = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	$X_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	$X_C = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$
		
	Der induktive Widerstand wächst mit der Induktivität der Spule und der Frequenz des Wechselstromes	Der kapazitive Widerstand ist der Kapazität des Kondensators und der Frequenz des Wechselstromes umgekehrt proportional
		
Stromstärke und Spannung sind in Phase	Bei einer Spule eilt die Spannung der Stromstärke um eine viertel Periode voraus.	Beim Kondensator eilt die Stromstärke der Spannung um eine viertel Periode voraus.
	$i = i_{max} \cdot \sin \omega t$	$u = u_{max} \cdot \sin \omega t$
	$u = u_{max} \cdot \sin \omega \left(t + \frac{T}{4}\right)$	$i = i_{max} \cdot \sin \omega \left(t + \frac{T}{4}\right)$
	$u = u_{max} \cdot \cos \omega t$	$i = i_{max} \cdot \cos \omega t$

Beispiele

1. Netzdrossel: $L = 10\ \text{H}$; $f = 50\ \text{s}^{-1}$.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi\, 50 \cdot 10\ \frac{\text{H}}{\text{s}} \approx 3{,}1 \cdot 10^3\ \Omega = \underline{\underline{3{,}1\ \text{k}\Omega}}.$$

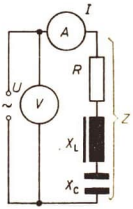
2. Kondensator: $C = 10\ \mu F$; $f = 50\ s^{-1}$; $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi\ 50 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{s}{F} = \frac{10^3}{\pi}\ \Omega \approx \underline{\underline{320\ \Omega}}.$$

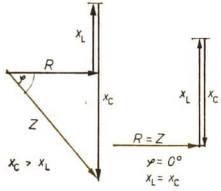
Der **Scheinwiderstand** $\boldsymbol{Z}$ tritt in einem Wechselstromkreis mit Ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerständen auf.

$$Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$$

Z: Scheinwiderstand,
R: Ohmscher Widerstand,
X_L: induktiver Widerstand,
X_C: kapazitiver Widerstand.



101/1



101/2

Serienschaltung im Wechselstromkreis

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}$$

Zwischen Stromstärke und Spannung besteht eine Phasenverschiebung, die kleiner als bei rein induktivem oder rein kapazitivem Widerstand ist.

Beispiel Jede Drosselspule besitzt einen induktiven und einen Ohmschen Widerstand. Man kann sich beide in Reihe geschaltet denken. Legt man Wechselstrom ($f = 50$ Hz) von 220 V an die Spule, so mißt man eine Stromstärke von 0,6 A. Bei 12 V Gleichspannung ergibt die Messung eine Stromstärke von 0,2 A. Wie groß ist die Induktivität der Spule?

$$Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{220\ V}{0{,}6\ A} \approx 367\ \Omega;$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12\ V}{0{,}2\ A} = 60\ \Omega.$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2};$$

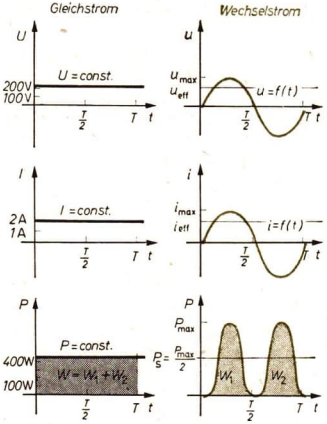
$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi \cdot 50\ s^{-1}} \cdot \sqrt{(367\ \Omega)^2 - (60\ \Omega)^2};\ L \approx \underline{\underline{1{,}2\ H}}$$

Leistung des Wechselstromes

Leistung des elektrischen Stromes ist durch $P = U \cdot I$ gegeben. Bei Wechselstrom mit rein Ohmscher Belastung schwankt die Leistung P zwischen Null und einem Maximalwert P_{max}.

Scheinleistung P_S ist das Produkt aus effektiver Stromstärke und Spannung, ohne Rücksicht auf die Phasenverschiebung zwischen beiden.

▷ $P_S = U_{eff} \cdot I_{eff}$.



Wirkleistung P_W ist die an den Wechselstromkreis mit beliebiger Belastung abgegebene Leistung:

▷ $P_W = P_S \cdot \cos\varphi = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi$

$\cos\varphi$: Leistungsfaktor ($0 \leqq \cos\varphi \leqq 1$).

Beispiel Ein Motor nimmt bei einer Spannung von 220 V einen Strom von 1,5 A auf. Der Leistungsfaktor des Motors beträgt $\cos\varphi = 0{,}7$. Wie groß sind Schein- und Wirkleistung?

$P_S = U_{eff} \cdot I_{eff} = 220\ \text{V} \cdot 1{,}5\ \text{A} = \underline{\underline{330\ \text{W}}}$.

$P_W = P_S \cdot \cos\varphi = 330\ \text{W} \cdot 0{,}7 = \underline{\underline{231\ \text{W}}}$.

Arbeit des Wechselstromes

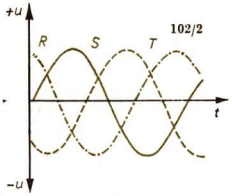
Bei zeitlich konstanter Leistung erhält man für die Arbeit $W = P \cdot t$.

▷ **Scheinarbeit** W_S: $W_S = P_S \cdot t = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot t$

▷ **Wirkarbeit** W_W: $W_W = P_W \cdot t = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot t \cdot \cos\varphi$

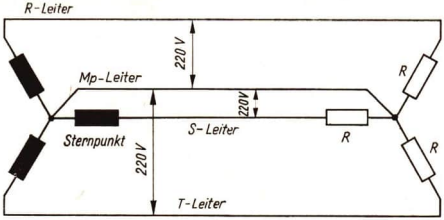
Dreiphasenstrom (Drehstrom)

Unter Dreiphasenstrom versteht man ein System dreier Wechselströme, zwischen denen eine Phasendifferenz von je einer drittel Periode besteht.



102/2

Stern-schaltung



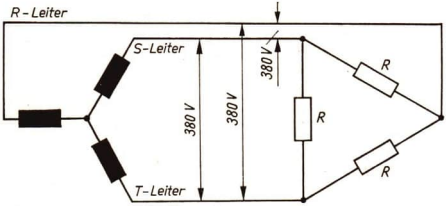
103/1

Sterngeschalteter Generator

Sterngeschaltete Verbraucher

Bei dieser Schaltung wird die Rückleitung der Ströme meist durch einen gemeinsamen Mittelpunktleiter vorgenommen. Man erhält das **Vierleitersystem**, das aus den **Hauptleitern R, S, T** und dem **Stern- oder Mittelpunktleiter M_p** besteht. Die Summe der drei Sternspannungen ist null, d. h., bei gleichmäßiger Belastung fließt durch den Mittelpunktleiter kein Strom.

Dreieck-schaltung



103/2

Sterngeschalteter Generator

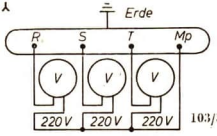
Dreieckgeschaltete Verbraucher

Zwischen den einzelnen Leitern herrscht jeweils die gleiche Spannung; man erhält ein Dreileitersystem.

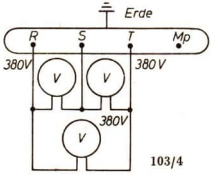
Sternspannung: $U_\lambda = 220$ V, Spannung zwischen einem Hauptleiter und dem Sternpunktleiter.

Dreieckspannung: $U_\Delta = 380$ V, Spannung zwischen zwei Hauptleitern

$U_\Delta = \sqrt{3} \cdot U_\lambda$



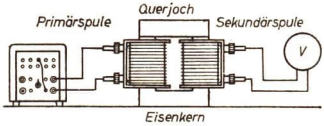
103/3



103/4

Transformator

Wird eine Spule vom Wechselstrom durchflossen, so entsteht ein Wechselfeld, das in einer genügend nahen zweiten Spule eine Wechselspannung induziert.



104/1

Primärspule nennt man die vom Wechselstrom durchflossene Spule;

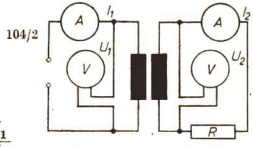
Sekundärspule nennt man die Spule, in der die Wechselspannung induziert wird.

Im verlustlosen, „idealen" Transformator gilt nach dem Energieerhaltungssatz (↗ S. 66):

▷ **Von der Primärspule aufgenommene elektrische Leistung P_1 = von der Sekundärspule abgegebene elektrische Leistung P_2**

$$U_{1\,\mathrm{eff}} \cdot I_{1\,\mathrm{eff}} = U_{2\,\mathrm{eff}} \cdot I_{2\,\mathrm{eff}}$$

$(\cos\varphi_1 \approx \cos\varphi_2)$



104/2

Weiterhin gilt:

▷ $$\frac{U_{1\,\mathrm{eff}}}{U_{2\,\mathrm{eff}}} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{und} \quad \frac{I_{2\,\mathrm{eff}}}{I_{1\,\mathrm{eff}}} = \frac{N_1}{N_2}$$

N_1: Windungszahl der Primärspule
N_2: Windungszahl der Sekundärspule

Beim idealen Transformator verhalten sich die Windungszahlen der Spulen wie die Spannungen. Die Stromstärken sind den Windungszahlen umgekehrt proportional.

Einphasentransformatoren werden im allgemeinen nur für kleinere Leistungen hergestellt.

Dreiphasentransformatoren sind meist Hochleistungstransformatoren; drei Einphasentransformatoren sind auf einem gemeinsamen Kern montiert. Große Transformatoren sind ölgekühlt.

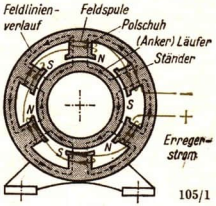
Wechselstrommaschinen

Generatoren sind Maschinen, mit denen mechanische Arbeit mit Vermittlung des magnetischen Feldes in elektrische Arbeit umgewandelt wird.

Außenpolmaschine: Eine Spannung wird dadurch induziert, daß eine Induktionsspule (Läufer) in einem Magnetfeld rotiert.

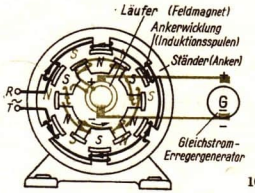
Innenpolmaschine: Eine Spannung wird in feststehenden Induktionsspulen (Ständer) durch ein magnetisches Drehfeld (rotierender Magnet als Läufer) induziert.

Modell einer Außenpolmaschine



105/1

Modell einer Innenpolmaschine



105/2

Typen:

Einphasen-Wechselstromgenerator	Außen- oder Innenpolmaschinen
Dreiphasen-Wechselstromgenerator	Außen- oder Innenpolmaschinen, Phasen um 120° verschoben

Motoren sind Maschinen, mit denen elektrische Arbeit mit Vermittlung des magnetischen Feldes in mechanische Arbeit umgewandelt wird.

Synchronmotor: Der Läufer (Dauermagnet oder Elektromagnet) dreht sich synchron mit dem magnetischen Drehfeld. Er läuft nicht von selbst an und gerät bei Überlastung außer Tritt.

Typen:

Einphasen-Synchronmotor
Dreiphasen-Synchronmotor

Asynchronmotor: Zwischen den Ständerspulen eines Dreiphasenstrommotors bildet der Dreiphasenstrom ein magnetisches Drehfeld aus – **Drehstrom.** Im Läufer, meist als **Kurzschluß-** oder **Käfigläufer** ausgebildet, werden durch das sich drehende Magnetfeld Ströme induziert, die den Läufer in Drehung versetzen. Bei Belastung des Motors bleibt die Drehzahl des Läufers hinter der des Drehfeldes zurück – **Schlupf.** Asynchronmotoren laufen von selbst an. Am häufigsten verwendeter Elektromotor zum Antrieb von Maschinen. Robust, keine Funkenbildung.

E

Gleichstromgenerator und Gleichstrommotor

Dynamoelektrisches Prinzip

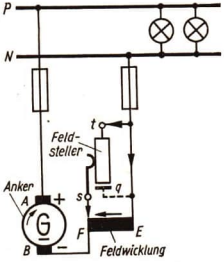
Technische Gleichstrommaschinen haben Elektromagnete als Feldspulen. Der Restmagnetismus ihrer Weicheisenkerne reicht aus, um eine geringe Spannung beim Drehen des Ankers zu induzieren. Es kommt zu einer gegenseitigen Verstärkung von Ankerstrom und magnetischem Feld, d. h., ein gegenseitiges „Aufschaukeln" findet statt, bis die benötigte magnetische Feldstärke erreicht ist.

(WERNER v. SIEMENS, 1816 bis 1892)

Wirkungsweise des Kommutators

Im einfachsten Falle ist der Kommutator ein geteilter Schleifring; an jeder Hälfte (Segment, Lamelle) ist ein Ende der rotierenden Leiterschleife befestigt.
Pulsierende Gleichspannung und pulsierender Gleichstrom können einer Leiterschleife mit Kommutator entnommen werden, wenn die Schleife in einem Magnetfeld rotiert.

106/1

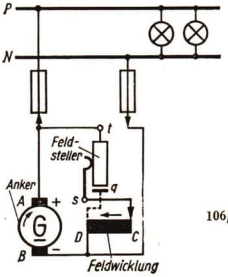


Reihenschlußgenerator. Feld und Anker in Reihe geschaltet; nur verwendbar für spezielle Aufgaben.

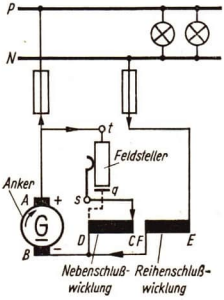
Nebenschlußgenerator. Feld und Anker parallelgeschaltet; Spannung sinkt nur gering bei Belastung ab; als Generator in Elektrizitätswerken geeignet.

Doppelschlußgenerator. Magnetpole werden durch Haupt- und Nebenschlußwicklung erregt; praktisch von der Belastung unabhängig; dient zur Energieversorgung bei stoßweiser Belastung (Walz- und Hüttenwerke).

106/2



106/3



Reihenschlußmotor. Starkes Anzugsmoment; muß mit der Arbeitsmaschine fest gekoppelt sein. Motor wird bei unbelastetem Lauf zerstört; als Großmotor für Hebezeuge, als Kleinmotor dort verwendet, wo verhältnismäßig große Reibungskräfte auftreten.

Nebenschlußmotor. Drehzahl des Motors ist praktisch konstant; Drehzahl läßt sich fast verlustlos über die Erregerwicklung einstellen; wird für Werkzeugmaschinen benutzt.

Doppelschlußmotor. Verbindet starkes Anzugsmoment mit konstanter Drehzahl: Drehzahl läßt sich verändern; wird für Werkzeugmaschinen mit Schwungmassen (Scheren, Stanzen) benutzt.

Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

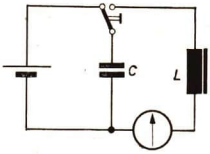
Sie beruhen auf dem Vorhandensein elektrischer (↗ S. 75) und magnetischer Felder (↗ S. 80).

E

Elektromagnetische Schwingungen im geschlossenen Schwingkreis

Der elektrische Schwingkreis

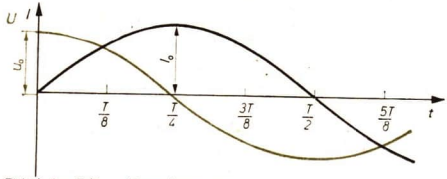
107/1



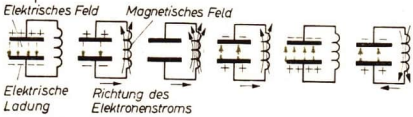
Elektromagnetische Schwingungen (↗ S. 40) entstehen, wenn ein Kondensator über eine Spule entladen wird.

I_0, U_0: Maximalwerte von Stromstärke und Spannung
T: Schwingungsdauer

Spannung und Stromstärke verändern ihren Wert periodisch nach einer Kosinus- bzw. Sinusfunktion. $U = U_0 \cdot \cos 2\pi f t$, $I = I_0 \cdot \sin 2\pi f t$.



107/2



Thomsonsche Gleichung:

▷ $T = 2\pi\sqrt{LC}$,

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f: Frequenz der elektrischen Schwingung.

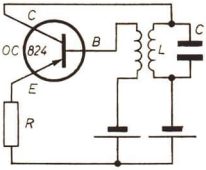
In einem geladenen Kondensator ist **elektrische Energie** (im elektrischen Feld), in einer stromdurchflossenen Spule **magnetische Energie** (im magnetischen Feld) gespeichert. In einem elektrischen Schwingkreis wandeln sich elektrische und magnetische Energie periodisch ineinander um.

Vergleich: Periodische Umwandlung von potentieller in kinetische Energie bei einigen mechanischen Schwingungen (↗ S. 25 und S. 43).

Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen

Durch Ohmsche Widerstände im Schwingungskreis (Spulenwiderstand) wird ein Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Die Schwingungen erfahren eine **Dämpfung**; die Amplituden von Spannung und Stromstärke klingen mit der Zeit ab (↗ S. 42).

Meißnersche Rückkopplungsschaltung — Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen



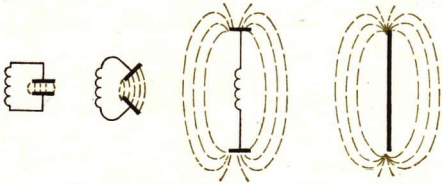
Um eine ungedämpfte Schwingung aufrechtzuerhalten, müssen die Energieverluste im Schwingkreis durch laufende Energiezufuhr von außen ausgeglichen werden.

Durch **induktive Kopplung** wird das Gitter einer Triode (die Basis eines Transistors) im Rhythmus der elektrischen Schwingungen eines Schwingkreises abwechselnd positiv und negativ geladen (Rückkopplung). Der Anodenstrom (Kollektorstrom) ändert sich im gleichen Takt und führt dem Schwingkreis Energie zu.

Anwendung: Ultraschallgenerator; induktive und kapazitive HF-Erwärmung; Funk und Tontechnik.

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Offene Schwingkreise erhält man, wenn die Kondensatorplatten eines Schwingkreises auseinandergezogen werden. Das System bleibt weiter schwingungsfähig, wenn die Kondensatorplatten entfernt und die Spule auseinandergezogen werden. Man erhält einen Dipol.



109/1

Elektrischer Dipol ist ein gerader schwingungsfähiger Leiter.

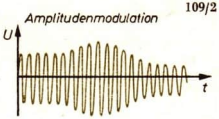
Elektromagnetische Wellen entstehen, wenn sich elektrische und magnetische Felder vom Dipol ablösen; sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit (↗ S. 124) aus.

Eigenschaften elektromagnetischer Wellen sind unter anderem Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisation (↗ S. 47 und 48).

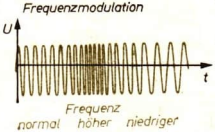
Die drahtlose Nachrichtenübermittlung

Modulation ist das Aufprägen eines Signals auf eine hochfrequente elektromagnetische Schwingung (Trägerfrequenz).

109/2

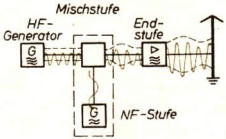


109/3



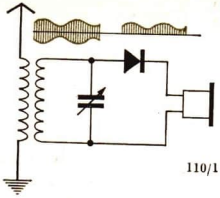
Sender sind Einrichtungen, in denen modulierte Schwingungen verstärkt einer Antenne zugeführt werden; von der Antenne werden modulierte Wellen in den Raum gestrahlt.

109/4

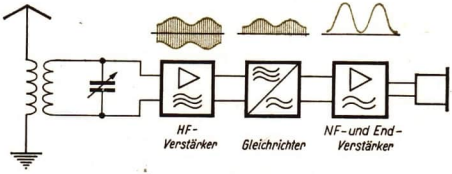


Empfänger sind Einrichtungen, welche die von einer Antenne aufgenommenen modulierten Wellen demodulieren, verstärken und hörbar machen (Bilder 110/1 und 110/2).

Fernsehsender unterscheiden sich von Sendern des Hörrundfunks durch die optisch-elektrische Aufnahmeeinrichtung.

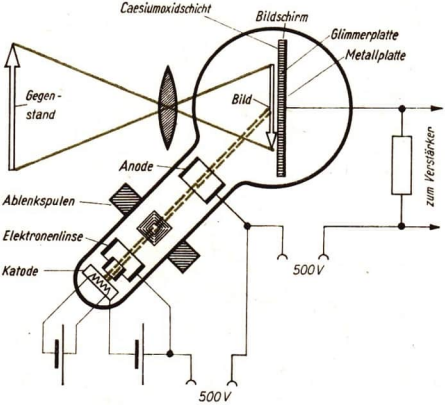


110/1



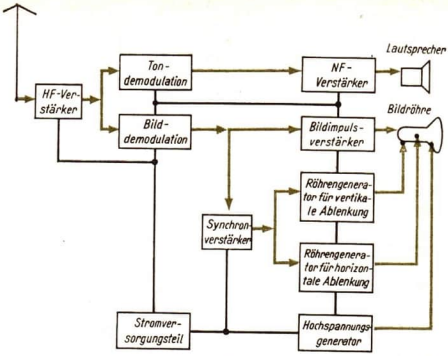
110/2

Ikonoskop und **Endicon** sind Bildaufnahmeröhren, bei denen eine Optik Bilder auf eine Fotokatode abbildet, die von einem Elektronenstrahl abgetastet wird. Das Bild wird in elektrische Impulse unterschiedlicher Stärke zerlegt; sie werden einer Trägerfrequenz aufgeprägt, verstärkt und über eine Antenne abgestrahlt.



110/3

Fernsehempfänger unterscheiden sich von Empfängern des Hörrundfunks vornehmlich durch eine Bildröhre, in der die über die Antenne

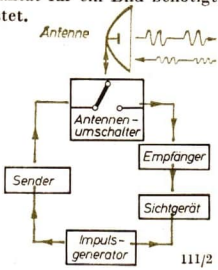


111/1

aufgenommenen, demodulierten und synchronisierten Bildimpulse einen Elektronenstrahl steuern; dieser Elektronenstrahl zeichnet das Bild in der Bildröhre.

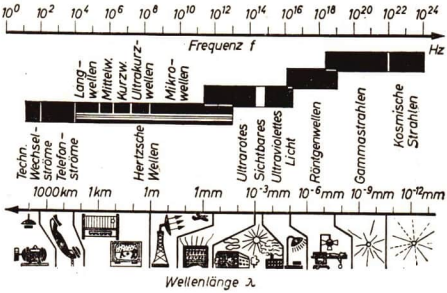
625 Zeilen werden für eine gute Bildqualität für ein Bild benötigt; ein Bild wird 25mal je Sekunde abgetastet.

Radaranlagen sind Einrichtungen, die auf dem Impuls-Echo-Prinzip beruhen: Man kann aus der Wiederkehrzeit stark gebündelter Zentimeter-Wellen-Impulse die Entfernung und damit den Ort weit entfernter Gegenstände (z. B. Flugzeuge, Wasserfahrzeuge, Raketen) ermitteln.



111/2

Das elektromagnetische Spektrum



111/3

Elektrizitätsleitung in Gasen, im Hochvakuum und in Festkörpern

Die Stromleitung in Gasen

Den Stromdurchgang durch Gase bezeichnet man als **Gasentladung** oder kurz als **Entladung**.
Man unterscheidet bei Gasen:

Die unselbständige Entladung

Gase bei atmosphärischem Druck und Zimmertemperatur sind bei niedrigen elektrischen Feldstärken Isolatoren. Es müssen **Ladungsträger künstlich erzeugt werden,** damit ein Strom fließen kann.

Die selbständige Entladung

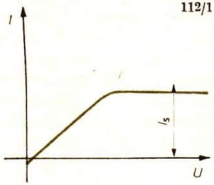
Im Gas werden **Ladungsträger** durch **Stoßionisation** und **Sekundäremission** (Glimm-, Spitzen- und Funkenentladung) oder durch **thermische Ionisation** (Bogenentladung) **fortlaufend selbst erzeugt.**

Die unselbständige Entladung in der Luft

Erzeugung von Ladungsträgern durch:

1. glimmende oder glühende Körper (Flammgase),
2. Licht und Röntgenstrahlen,
3. radioaktive Strahlung,
4. Reibung staubförmiger Körper,
5. Zerstäuben von Flüssigkeiten.

Die durch 1., 2. und 3. erzeugten Ladungsträger sind positive und negative Gasionen und Elektronen.



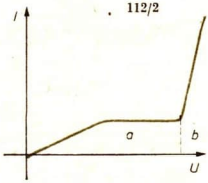
112/1

Bei kleinen Spannungen gilt das Ohmsche Gesetz: $I \sim U$ (linearer Teil der Kennlinie). Die Stromstärke erreicht einen Sättigungswert, wenn alle in einer bestimmten Zeit erzeugten Ionen in diesem Zeitraum die Elektroden erreichen.

Die selbständige Glimmentladung bei niedrigem Gasdruck

Bei niedrigem Gasdruck und hoher Spannung nimmt die Stromstärke zu und steigt steil zu hohen Werten an.

Es tritt **Stoßionisation** ein. Die Gasionen (Elektronen) erhalten in diesem Bereich



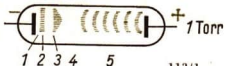
112/2

112/2 a) Gebiet der unselbständigen Entladung
b) Gebiet der selbständigen Entladung durch Stoßionisation

durch die hohe Spannung eine so große Geschwindigkeit, daß sie beim Zusammenstoß mit neutralen Gasmolekülen diese ionisieren.

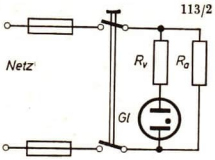
Sekundäremission geschieht, wenn positive Ionen auf die Katode treffen; sie lösen Elektronen aus dieser kalten Elektrode.

1: Glimmhaut (durch positive Ionen bedingt)
2: Hittorfscher Dunkelraum (Beschleunigungsstrecke der von der Katode kommenden Elektronen)
3: negatives Glimmlicht (Gebiet der Stoßionisation)
4: Faradayscher Dunkelraum
5: positive Säule oder Plasma



113/1

Anwendung der selbständigen Glimmentladung



113/2

Glimmlampe. Füllung: Neon-Helium-Gemisch; Druck: etwa 10 Torr. Beim Anlegen einer Gleichspannung von etwa 100 V (Zündspannung) bedeckt sich die Katode mit dem negativen Glimmlicht. Die Löschspannung ist niedriger als die Zündspannung.
Um die Zerstörung einer Glimmlampe durch Lichtbogenentladung (Entladung mit großer Stromstärke, bei der die Elektroden glühend heiß werden und thermisch Elektronen emittieren) zu verhindern, ist stets ein Schutzwiderstand in Reihe zu schalten. (Mitunter ist dieser Widerstand im Sockel der Lampe untergebracht.)

Beispiele Signallampe, Spannungsanzeiger, Polprüfer, Stabilisator, Erzeugung von Kippspannungen.

Leuchtstofflampe. Füllung: Quecksilberdampf (und Argon); Druck: 0,01 bis 1 Torr. Es entsteht bei der Glimmentladung hauptsächlich unsichtbares ultraviolettes Licht. Ein Leuchtstoff an der Innenwand der Röhre sendet sichtbares Licht aus, wenn er von ultravioletter Strahlung getroffen wird.

Beispiel Innenraumbeleuchtung. Vorteile: Wirtschaftlicher als Glühlicht; tageslichtähnlich.
Betriebsspannung: 220 V (besondere Zündanlage erforderlich).

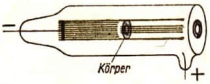
Leuchtröhre. Füllung: Edelgase, Stickstoff, Kohlendioxid; Druck: etwa 5 Torr. Innenfläche der Röhre ohne und mitunter mit Leuchtstoff. Farblose oder farbige Glasröhre. Ausnutzung des Lichts der positiven Säule. Spannung: 500 bis 1000 V bei Edelgasfüllung.

Gasfüllung	Farbe
Neon	zinnoberrot
Helium	schwach gelbrot
Argon	schwach bläulich
Kohlendioxid	weiß

Beispiele Lichtwerbung und Beleuchtung

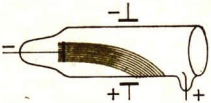
Katodenstrahlrohr. Druck: 0,01 Torr. Merkmal: Keine Leuchterscheinung im Gasraum. Hellgrüne Fluoreszenz der Glaswand, die der Katode gegenüberliegt. Erklärung: Positive Gasionen lösen aus der Katode Elektronen. Diese treffen auf die der Katode gegenüberliegende Glaswand.

Eigenschaften der Katodenstrahlen



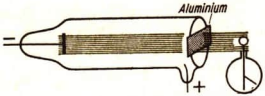
114/1 Geradlinige Ausbreitung der Katodenstrahlen

114/4 Erwärmung eines festen Körpers durch Katodenstrahlen

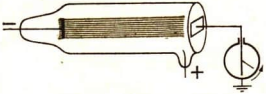


114/2 Ablenkung der Katodenstrahlen im elektrischen Feld

114/5 Katodenstrahlen üben mechanische Wirkungen aus



114/3 Katodenstrahlen durchdringen dünne Metallfolien



114/6 Katodenstrahlen sind negativ elektrisch geladen

Katodenstrahlen belichten fotografische Platten, schlagen aus Metallen Sekundärelektronen, ionisieren Gase, regen Leuchtstoffe zum Leuchten an, erzeugen beim Aufprall auf Metalle Röntgenstrahlen (↗ S. 144) und erwärmen feste Körper.

Katodenstrahlen bestehen aus Elektronen. Diese sind negativ elektrisch geladen. Die Ruhmasse eines Elektrons ist äußerst gering:

$m = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ **kg.**

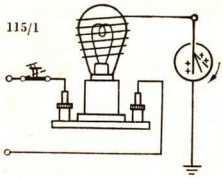
Anwendung der Katodenstrahlen: Katodenstrahloszillograf, Bildröhre des Fernsehempfängers, Bildwandler, Elektronenmikroskop, Hochvakuumschmelzofen, Röntgenröhre, Elektronenbohrer.

Die Stromleitung im Hochvakuum

Das Hochvakuum ist ein idealer Isolator. Damit in einem Vakuumgefäß ein elektrischer Strom fließen kann, müssen zunächst Ladungsträger (Elektronen) erzeugt werden. Das geschieht vornehmlich durch den **glühelektrischen** und durch den **äußeren lichtelektrischen Effekt.**

E

Der glühelektrische Effekt

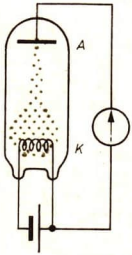


Aus der Oberfläche eines glühenden Metalls treten Elektronen. Man nennt diesen Vorgang **thermische Elektronenemission.** Aus Bariumoxidschichten werden schon bei Rotglut (700 °C) viele Elektronen emittiert. Auf diesem Effekt beruhen die meisten Elektronenröhren, z. B. Diode, Triode und Katodenstrahlröhre.

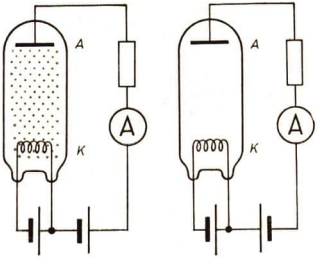
Die Diode

In einem hochevakuierten Glaskolben sind zwei Elektroden angebracht:

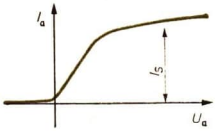
Katode und **Anode.** Aus der Katode werden durch elektrische Heizung Elektronen befreit, die zur Anode gelangen. Ein hochempfindliches Galvanometer weist einen sehr schwachen Strom im Anodenstromkreis nach (Bild 115/2).
Wird in den Anodenstromkreis eine Spannungsquelle geschaltet, so fließt nur dann ein Strom, wenn die Anode mit dem positiven Pol verbunden ist. Eine Wechselspannung wird daher gleichgerichtet (Bilder 116/1 a und b).



115/2

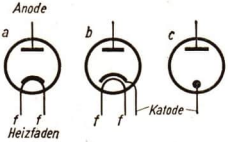


116/1 a u. b



116/2

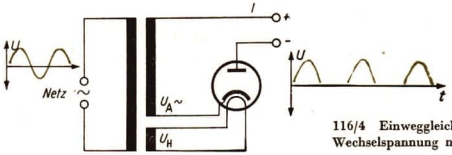
Erhöht man die Anodenspannung U_a, so wächst die Anodenstromstärke I_a, bis ein maximaler Wert, die Sättigungsstromstärke I_S, erreicht ist, da in einer bestimmten Zeit nur eine begrenzte Anzahl von Elektronen emittiert wird.



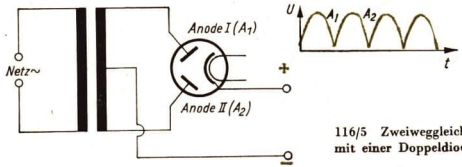
116/3 Schaltzeichen einer Diode:

a) direkt geheizt (der Heizdraht ist gleichzeitig Katode)
b) indirekt geheizt (der Heizdraht befindet sich innerhalb eines Röhrchens, das einen eigenen Anschluß hat und die getrennte Katode darstellt)
c) vereinfachtes Schaltzeichen

Beispiele Gleichrichtung von Netzwechselstrom, z. B. EZ 80; HF-Gleichrichter, z. B. EAA 91.



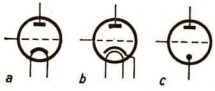
116/4 Einweggleichrichtung einer Wechselspannung mit einer Diode



116/5 Zweiweggleichrichtung mit einer Doppeldiode (Duodiode)

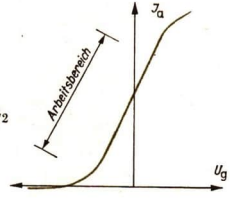
Die Triode

In einer Triode ist zwischen Katode und Anode eine weitere Elektrode, das **Steuergitter**, angeordnet. Positive Spannung am Gitter vergrößert den Anodenstrom, negative Gitterspannung schwächt ihn. Eine Triode wird im allgemeinen nur mit negativer Gitterspannung betrieben, sonst zerstört der zu starke Gitterstrom das Gitter und der Anodenstrom die Anode der Röhre.



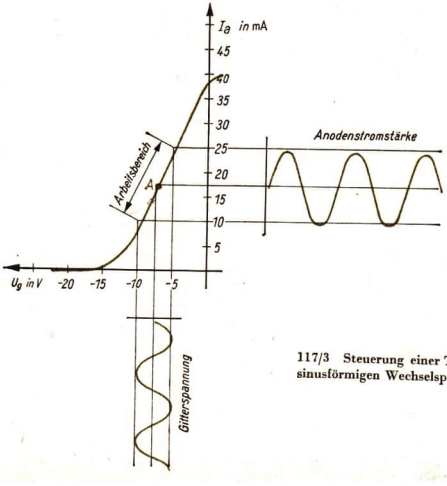
117/1 Schaltzeichen einer Triode:
a) direkte Heizung
b) indirekte Heizung
c) vereinfachte Darstellung

117/2



Die Kennlinie einer Triode erhält man, wenn bei konstanter Anodenspannung U_a die Gitterspannung U_g schrittweise verändert und die Anodenstromstärke I_a gemessen wird. Bei stark negativer Gitterspannung fließt kein Anodenstrom, die Röhre ist gesperrt. Der lineare Teil der Kennlinie ist der Arbeitsbereich.

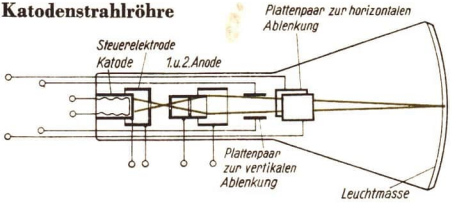
Beispiele Verstärker, Sender, Gleichrichter, Schalter, Begrenzer.
Die zu verstärkende Wechselspannung wird dem Steuergitter zugeführt. Der



117/3 Steuerung einer Triode mit einer sinusförmigen Wechselspannung

Anodenstrom schwankt im Rhythmus dieser Wechselspannung. An einem Widerstand im Anodenstromkreis kann eine verstärkte Wechselspannung entnommen werden. Überschreitet die Steuerspannung den linearen Arbeitsbereich, treten Verzerrungen bei der verstärkten Spannung auf. Man legt deshalb den Arbeitspunkt *A* in die Mitte des Arbeitsbereiches der Kennlinie, indem man eine dem Punkt A entsprechende negative Gitterspannung einstellt. Je steiler die Kennlinie verläuft, um so größer ist die Verstärkung. Da kein Gitterstrom fließt, wird eine Triode leistungslos gesteuert.

Die Katodenstrahlröhre



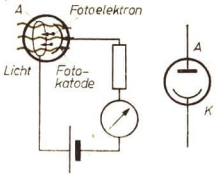
118/1

Elektronen werden von einer **Glühkatode** emittiert. Durch eine hohe Anodenspannung werden sie stark beschleunigt und treffen mit großer Geschwindigkeit auf den **Leuchtschirm**. Die besondere Ausführung der **Anode** gestattet, diesen Katodenstrahl zu bündeln, so daß auf dem Bildschirm ein scharfer Leuchtpunkt entsteht. Die Intensität des Katodenstrahls und damit die Helligkeit des Leuchtpunktes wird durch Veränderung der Spannung des **Wehnelt-Zylinders**, der die Rolle des Steuergitters spielt, erreicht. Zwei **Ablenkplattenpaare** ermöglichen, den Katodenstrahl durch elektrostatische Abstoßung bzw. Anziehung in horizontaler und vertikaler Richtung auszulenken.

Beispiele Oszillografenröhre im Katodenstrahloszillografen; Bildröhre im Fernsehempfänger.

Der äußere lichtelektrische Effekt

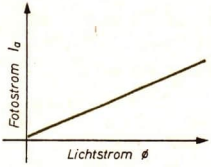
Trifft Licht auf ein Metall, so werden aus der Metalloberfläche Elektronen herausgeschlagen. Das Licht verhält sich hierbei so, als bestünde es aus winzigen Teilchen (Photonen). Ein Elektron wird in diesem Fall dann aus dem Metall befreit, wenn ein derartiges Teilchen auf ein Elektron stößt und ihm seine gesamte Energie überträgt. Auf diesem Effekt beruhen z. B. die Fotozelle und das Fotoelement.



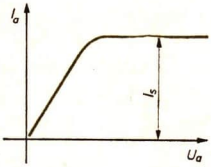
118/2

Fotokatode

Sie besteht aus einer Alkalimetallschicht (Na, K, Ca). Ihr gegenüber ist in einer evakuierten Glasröhre eine netz- oder schleifenförmige Anode angeordnet.



119/1 Proportionalität von Lichtstrom und Fotostrom



119/2 Kennlinie einer Fotozelle bei konstantem Lichtstrom

Beispiele Zählvorrichtung am Fließband; Sortiervorrichtung nach Größe; Sicherung von Werkanlagen, Bauten, Werkzeugmaschinen u. a.; Steuerung von Türen und Rolltreppen; Überwachung von Behälterinhalten mit Lichtschranken; Lichtmeßtechnik, Fernsehaufnahmeröhren.

E

Die Stromleitung in Festkörpern

Die Elektrizitätsleitung in Metallen

Die elektrische Leitfähigkeit der Metalle beruht auf der Beweglichkeit von Elektronen im Metallgitter.

Metallatome führen um ihre Ruhelage Schwingungen (thermische Energie) aus. Die äußeren Hüllenelektronen können sich im Gitter frei bewegen, so daß man von einem **Elektronengas** sprechen kann. Die Metallatome werden dabei zu positiven Ionen.

Wird eine Spannung an ein Metallstück angelegt, so bewegen sich die Elektronen zur positiven Elektrode, die Metallionen verändern ihre Plätze hingegen nicht. Stoßen Elektronen auf Gitterionen, so wird diesen Energie übertragen; das Metall erwärmt sich. Die Leitfähigkeit eines Metalls wird durch die Anzahl der Leitungselektronen und ihre Streuungen (an Gitterschwingungen, Fremdatomen, Baufehlern des Gitters) auf dem Weg durch das Gitter bestimmt.

Die Elektrizitätsleitung in Halbleitern

Halbleiter: Germanium, Silizium, Schwermetalloxide und -sulfide, Graphit u. a.

Eigenleitung

Bei $T = 0$ °K (↗ S. 54) sind reine Halbleiter Isolatoren.

Mit steigender Temperatur können **Elektronen** ihren Platz verlassen und bei einer anliegenden Spannung zur positiven Elektrode wandern.

Es bleiben positive Löcher, sogenannte **Defektelektronen,** zurück, die sich im elektrischen Feld zur negativen Elektrode bewegen.

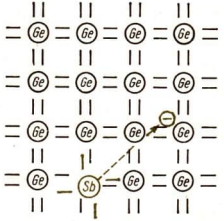
Erwärmt man einen Halbleiter, so nimmt dessen Widerstand ab.

Der Strom durch ein Halbleiterbauelement (Diode, Transistor u. a.) kann bei Erwärmung so groß werden, daß das Bauelement zerstört wird. Daher unbedingt die vorgeschriebene maximale Temperatur (etwa 60 °C) beachten.

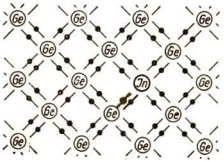
Beispiel Heißleiter.

Störstellenleitung

Überschußleitung. Geringe Beimengungen eines fünfwertigen Elements (Antimon Sb oder Arsen As) bewirken neben der Eigenleitung eine zusätzliche Elektronenleitung **(n-Leitung)** im Germanium.
Mangelleitung. Geringe Beimengungen eines dreiwertigen Elements (Indium In oder Gallium Ga) bewirken eine zusätzliche Defektelektronenleitung **(p-Leitung)** im Germanium.



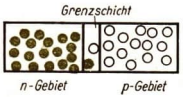
120/1 Das fünfte Valenzelektron eines Antimonatoms ist ein freies Leitungselektron



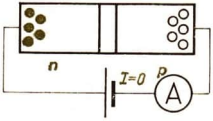
120/2 Durch das fehlende vierte Valenzelektron entsteht ein Defektelektron

Halbleitergleichrichter

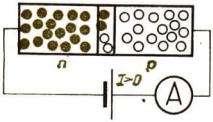
Wird p- und n-leitendes Germanium in einem Kristall hergestellt, so entsteht in einem schmalen Übergangsbereich, dem sogenannten **p-n-Übergang,** eine **Verarmungszone** (Grenzschicht) an Ladungsträgern; Elektronen und Defektelektronen haben sich teilweise kompensiert.



120/3 p-n-Übergang



121/1 Sperrichtung



121/2 Durchlaßrichtung

Sperrichtung. Eine angelegte Spannung bewirkt eine Vergrößerung der Verarmungszone, der Widerstand wächst.

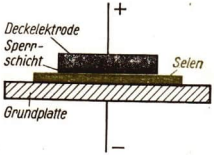
Durchlaßrichtung. Bei umgekehrter Polung wird die Verarmungszone von Ladungsträgern überschwemmt, der Widerstand sinkt.

E

Der Selenflächengleichrichter

Zwischen einer Selenschicht und einer Schicht aus Zinn mit Kadmiumzusatz bildet sich eine Sperrschicht mit Gleichrichterwirkung aus.

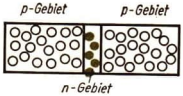
Beispiel Gleichrichtung von Netzwechselstrom.



121/3 Selenflächengleichrichter in Sperrichtung gepolt

Der Transistor

Ein Transistor ist ein Halbleiterbauelement, mit dem Wechselspannungen verstärkt werden können.



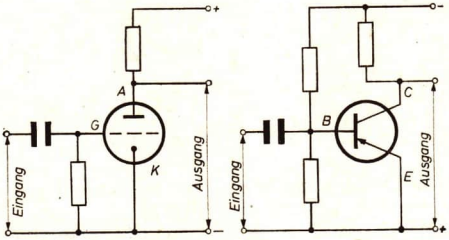
121/4 Aufbau eines p-n-p-Transistors

121/5 Schaltzeichen
E: Emitter
B: Basis
C: Kollektor

Gegenüberstellung von

Röhre	**Transistor** (in Emitterschaltung)
Katode	Emitter
Steuergitter	Basis
Anode	Kollektor

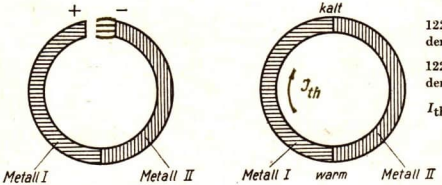
Beispiel Verstärker- und Schalterbauelement.



122/1 Einstufiger Röhren- und Transistorverstärker

Das Thermoelement

Berühren sich zwei verschiedene Metalle (Löt- oder Schweißverbindung), so findet ein Austausch von Elektronen auf Grund ihrer thermischen Bewegung statt. Im allgemeinen ist eine Richtung bevorzugt. Daher laden sich die Metalle unterschiedlich auf; es entsteht eine **Berührungsspannung,** die von der Temperatur abhängt.



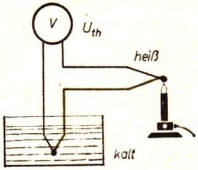
122/2 Zum Entstehen der Berührungsspannung

122/3 Zum Entstehen der Thermospannung

I_{th}: Thermostrom

Werden die beiden Metalle zu einem Ring verbunden, heben sich die Berührungsspannungen auf. Erwärmt man eine Kontaktstelle, so treten, durch die heftigere thermische Bewegung begünstigt, verstärkt Elektronen durch die Grenzfläche. Es entsteht eine **Thermospannung,** und es fließt ein **Thermostrom.**

Beispiele Thermoelement zur Temperaturmessung (Kupfer-Konstantan o. a.) und zur direkten Umwandlung von Wärme in elektrische Energie (Thermobatterie).



122/4 Thermoelement

Optik

125 *Strahlenoptik*

125 Geradlinige Ausbreitung und Reflexion des Lichtes
126 Reflexion an Spiegeln
131 Brechung des Lichtes
132 Brechung durch Linsen
135 Optische Geräte

138 *Wellenoptik*

138 Interferenz durch Beugung
140 Polarisation des Lichtes
141 Dispersion
144 Röntgenstrahlen

Optik

Lichtquellen

sind Körper, die Licht erzeugen und aussenden.
Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Frequenz. Das Entstehen des Lichtes wird in der Atomphysik erklärt.

Lichtgeschwindigkeit

Es besteht folgender Zusammenhang:

$c = \lambda \cdot f$ (↗ S. 46)

Wellenlängen und Frequenzen des Lichtes

	Wellenlänge λ in nm	Frequenz f in Hz
Ultrarotes Licht	300000 bis 790	10^{12} bis $3{,}8 \cdot 10^{14}$
Sichtbares Licht	790 bis 390	$3{,}8 \cdot 10^{14}$ bis $7{,}7 \cdot 10^{14}$
Ultraviolettes Licht	390 bis 10	$7{,}7 \cdot 10^{14}$ bis $3 \cdot 10^{16}$
Röntgenstrahlen	10 bis 0,01	$3 \cdot 10^{16}$ bis $3 \cdot 10^{19}$

Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien

Die Lichtgeschwindigkeit ist davon abhängig, in welchem Medium (Stoff) sich das Licht ausbreitet.
Von zwei lichtdurchlässigen Stoffen nennt man denjenigen **optisch dünner**, in dem das Licht die größere Geschwindigkeit besitzt; den zweiten Stoff nennt man **optisch dichter**.

Medium	Lichtgeschwindigkeit c in $km \cdot s^{-1}$	Medium	Lichtgeschwindigkeit c in $km \cdot s^{-1}$
Vakuum	299790 ± 6	Kronglas	197180
Luft	299711	Flintglas	185160
Wasser	225350	Diamant	121340
Alkohol	220380		

Strahlenoptik

Darunter versteht man das Gebiet der Optik, in dem geradlinige Ausbreitung des Lichtes angenommen wird, um beispielsweise Reflexion und Brechung des Lichtes einfach zu erklären, ohne den Wellencharakter des Lichtes berücksichtigen zu müssen.

Geradlinige Ausbreitung und Reflexion des Lichtes

Geradlinige Ausbreitung des Lichtes

Allgemein gilt:

▷ **Das Licht breitet sich im gleichen (isotropen) Medium geradlinig aus.**

Lichtstrahlen sind zeichnerische Hilfsmittel zur Darstellung von Lichtwegen; sie sind abstrahiert vom Lichtbündel.

Zeichnerische Darstellungen der Strahlenoptik sind Abstraktionen; sie spiegeln die Realität nur bedingt wider.

Lichtbündel werden ebenfalls durch Lichtstrahlen dargestellt; man unterscheidet

125/1

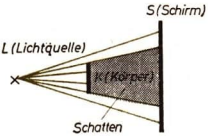
Die geradlinige Ausbreitung des Lichtes kann z. B. erkannt werden an

Bildentstehung mittels kleiner Öffnungen

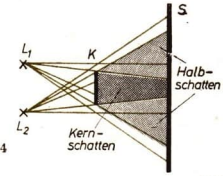
z. B. bei der Lochkamera

125/2

Schatten durch eine punktförmige Lichtquelle
Kern- und **Halbschatten** durch zwei punktförmige Lichtquellen



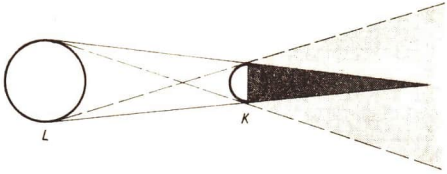
125/3



125/4

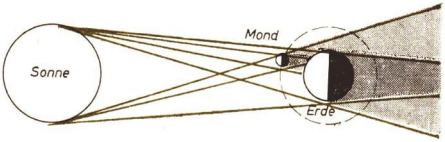
Schatten
durch eine flächenhafte Lichtquelle

126/1



Sonnenfinsternis

126/2



Reflexion des Lichtes

Treffen Lichtstrahlen auf die Grenzflächen zweier verschiedener Medien, dann wird allgemein vom zweiten Medium ein Teil des Lichtes in das erste Medium zurückgeworfen, d. h. **reflektiert.**

Regelmäßige Reflexion (auch Spiegelung genannt)
tritt auf, wenn Licht auf vollkommen glatte Grenzflächen eines Mediums fällt;

diffuse Reflexion
tritt auf, wenn Licht auf rauhe Grenzflächen eines Mediums fällt.

Optische Bilder

entstehen bei Abbildung von Gegenständen durch ein optisches System (z. B. Spiegel, Linse). Je nach der Lage des Gegenstandes zum optischen System unterscheidet man

virtuelle Bilder; sie entstehen aus den Schnittpunkten der rückwärtigen Verlängerungen der Strahlen, und

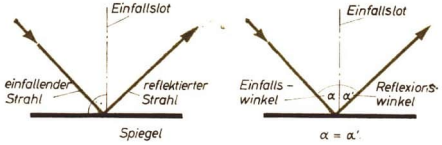
reelle Bilder; sie entstehen aus den Schnittpunkten der Strahlen, die vom Gegenstand selbst ausgehen.

Reflexion an Spiegeln

Ebener Spiegel

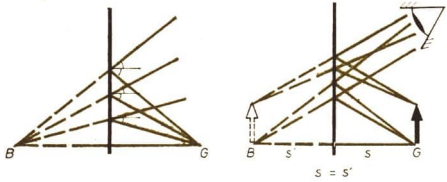
Er bildet eine ebene reflektierende Fläche, für ihn gilt folgendes **Reflexionsgesetz:**

Bei der Reflexion an einem ebenen Spiegel liegen einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot in einer Ebene. Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß.
(Am Hohlspiegel findet dieses Gesetz ebenfalls Anwendung.)



127/1 u. 2

Der ebene Spiegel reflektiert das Licht so, daß ein virtuelles Bild des Gegenstandes in gleicher Größe genausoweit hinter dem Spiegel entsteht, wie der Gegenstand vor dem Spiegel liegt.



127/3 u. 4

Einteilung gekrümmter Spiegel

Man unterscheidet nach der Form:

127/5

sphärische Spiegel
oder Kugelspiegel

127/6

asphärische Spiegel,
z. B. Parabolspiegel

und nach der dem Licht zugewandten Seite:

Wölb- oder Konvexspiegel

127/7

Hohl- oder Konkavspiegel

127/8

Begriffe beim Hohlspiegel

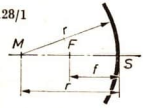
Scheitelpunkt S Mittelpunkt der spiegelnden Fläche.

Krümmungsmittelpunkt M Mittelpunkt der Kugel, aus deren Oberfläche man sich den Hohlspiegel herausgeschnitten denken kann.

Krümmungsradius r Strecke $\overline{MS}$.

Optische Achse Gerade durch S und M.

Brennpunkt F Schnittpunkt reflektierter Parallelstrahlen auf der optischen Achse zwischen S und M.



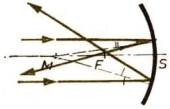
128/1

Öffnungswinkel φ Er wird am Krümmungsmittelpunkt M zwischen der optischen Achse und dem den äußeren Rand des Spiegels begrenzenden Radius gebildet.

Brennweite f Strecke $\overline{FS}$.

Bei sphärischen Spiegeln gilt:

$$f = \frac{r}{2}.$$



128/2

Strahlen, die parallel zur optischen Achse und nahe bei ihr verlaufen, werden nach dem Reflexionsgesetz durch den Brennpunkt reflektiert.

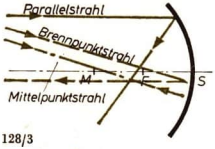
Bildentstehung am Hohlspiegel

Man wählt zur Darstellung einige Strahlen aus der Vielzahl aller möglichen aus; dabei gilt:

Brennpunktstrahlen werden als Parallelstrahlen reflektiert.

Parallelstrahlen werden als Brennpunktstrahlen reflektiert.

Mittelpunktstrahlen werden in sich selbst reflektiert.

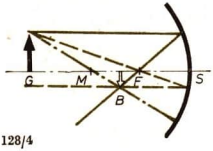


128/3

Zur Bildkonstruktion am Hohlspiegel benötigt man nur zwei Strahlen.

Beispiele

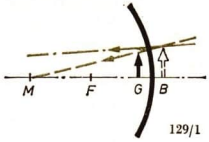
1. Es entsteht ein verkleinertes umgekehrtes **reelles** Bild.



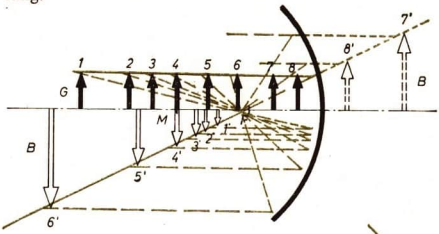
128/4

2. Es entsteht ein vergrößertes aufrechtes **virtuelles** Bild.

Für verschiedene Stellungen des Gegenstandes ergibt sich folgende Darstellung: Bewegt man den Gegenstand, so bewegt sich sein Bild in entgegengesetzter Richtung.



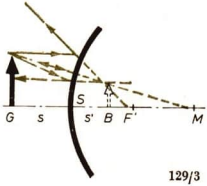
129/1



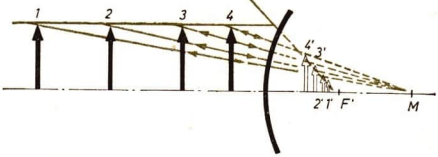
129/2

Bildentstehung am Wölbspiegel

Für den Strahlenverlauf und die Bildentstehung am **Wölbspiegel** gilt sinngemäß das gleiche wie beim **Hohlspiegel,** wenn man den **virtuellen Brennpunkt** F' zu Hilfe nimmt.



129/3



129/4

Am Wölbspiegel entstehen verkleinerte aufrechte virtuelle Bilder.

Abbildungsgleichung für gekrümmte Spiegel

▷ $$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Diese Gleichung gilt nur für achsennahe Strahlen.

Für virtuelle Bilder, die auf der Rückseite des Spiegels entstehen, ist die Bildweite negativ. Die Brennweite f des Wölbspiegels ist ebenfalls negativ.

Beispiel

An einem Hohlspiegel wird gemessen: $s = 6$ cm, $s' = 2$ cm.
Wie groß ist die Brennweite?

Lösung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}, \quad f = \frac{s \cdot s'}{s + s'},$$

$$f = \frac{6\,\text{cm} \cdot 2\,\text{cm}}{6\,\text{cm} + 2\,\text{cm}} = \frac{12\,\text{cm}^2}{8\,\text{cm}} = 1{,}5\,\text{cm}$$

$$\underline{\underline{f = 1{,}5\,\text{cm}}}$$

Ferner gilt

$$y' : y = s' : s$$

▷ **Bei der Abbildung am Hohlspiegel verhalten sich Bildgröße zu Gegenstandsgröße wie Bildweite zu Gegenstandsweite.**

Das Verhältnis $\frac{y'}{y}$ nennt man den **Abbildungsmaßstab.**

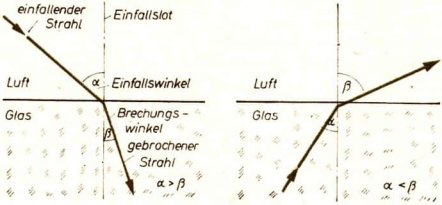
Bildentstehung an Spiegeln

	Gegenstandsweite	Bildweite	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
Ebener Spiegel	$s = s'$	$s' = s$	virtuell	aufrecht	$y' = y$
Konkavspiegel	$s > 2f$	$2f > s' > f$	reell	umgekehrt	$y' < y$
	$s = 2f$	$s' = 2f$	reell	umgekehrt	$y' = y$
	$2f > s > f$	$s' > 2f$	reell	umgekehrt	$y' > y$
	$s < f$	$0 < s' < \infty$ (Hinter dem Spiegel)	virtuell	aufrecht	$y' > y$
Konvexspiegel	$0 < s < \infty$	$0 < s' < \infty$ (Hinter dem Spiegel)	virtuell	aufrecht	$y' < y$

Brechung des Lichtes

Brechung an ebenen Flächen

Bei der Brechung ändert Licht beim Übergang von einem Medium in ein anderes seine Richtung, sofern es die Grenzfläche beider Medien nicht senkrecht durchdringt.



131/1 u. 2

Brechungsgesetz

▷ **Geht ein Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes über, so wird der Strahl zum Lot hin (bzw. vom Lot weg) gebrochen, wenn das zweite Medium optisch dichter (bzw. optisch dünner) ist. Der Brechungswinkel ist dann kleiner (bzw. größer) als der Einfallswinkel.**

▷ **Snelliussches Brechungsgesetz**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

Einfallender und gebrochener Strahl liegen in derselben Ebene.

Bei der Brechung eines Lichtstrahles ist der Quotient aus dem Sinus des Einfallswinkels α und dem Sinus des Brechungswinkels β konstant. Dieser konstante Wert heißt die Brechungszahl *n*.

(Snell van Royen; 1591 bis 1626)

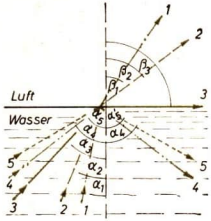
Der Wert von *n* hängt von den beiden vom Licht durchlaufenen Medien und von der Wellenlänge des Lichtes ab.

Brechungszahlen für den Übergang von Luft in das betreffende Medium (λ = 589 nm)

Medium	*n*	Medium	*n*
Wasser	1,33	Äthanol	1,4
Kronglas	1,5 bis 1,6	Diamant	2,4
Flintglas	1,6 bis 1,9		

Totalreflexion

Vergrößert man den Einfallswinkel α beim Übergang eines Lichtstrahles von einem optisch dichteren (Wasser) in ein optisch dünneres Medium (Luft), so erreicht der Brechungswinkel β schließlich den Wert 90°. Eine weitere Vergrößerung des Einfallswinkels führt zu keiner Brechung mehr, der Strahl wird an der Trennfläche beider Medien (Wasseroberfläche) **total reflektiert.**



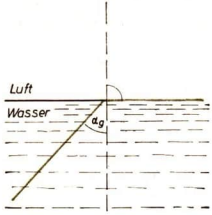
132/1

Grenzwinkel der Totalreflexion

heißt der Winkel α_g, dessen zugehöriger Brechungswinkel $\beta = 90°$ ist.
Das Brechungsgesetz nimmt dann folgende Form an:

$$\frac{\sin \alpha_g}{\sin 90°} = \frac{1}{n} \quad \text{oder, da } \sin 90° = 1,$$

$$\triangleright \quad \sin \alpha_g = \frac{1}{n}$$



132/2

Brechung durch Linsen

Linsen sind optische Körper, die von zwei gewölbten Flächen oder einer Ebene und einer gewölbten Fläche begrenzt werden.

Einteilung der Linsen

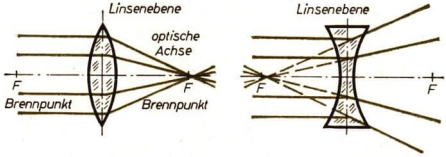
Sammellinsen (Konvexlinsen); **Zerstreuungslinsen** (Konkavlinsen)

132/3

132/4

Bildentstehung an Linsen

Sammellinsen sammeln parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen im **Brennpunkt.** Jede Linse hat zwei Brennpunkte.

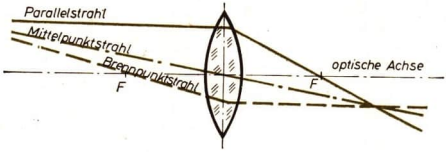


133/1 u. 2

Bei einer Zerstreuungslinse werden Parallelstrahlen so gebrochen, als ob sie vom Brennpunkt kämen.

Für dünne bikonvexe und bikonkave Linsen gilt mit guter Näherung, daß die Brennweite gleich dem Krümmungsradius der Linsenoberfläche ist. Senkrecht auf der optischen Achse steht die Linsenebene, die durch den Linsenmittelpunkt geht. Man zeichnet Lichtstrahlen vereinfacht so, als ob sie nur an der Linsenebene gebrochen würden.

Für die **Bildkonstruktion** bei Linsen verwendet man aus der Vielzahl der Lichtstrahlen nur einige wenige:



133/3

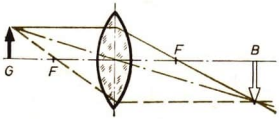
▷ **Parallelstrahlen werden durch den Brennpunkt der Linse gebrochen. Mittelpunktstrahlen werden nicht gebrochen. Brennpunktstrahlen verlaufen nach der Brechung parallel zur optischen Achse.**

Entsprechendes gilt auch für die Zerstreuungslinse.

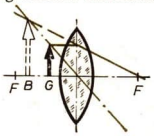
133/4

Beispiele

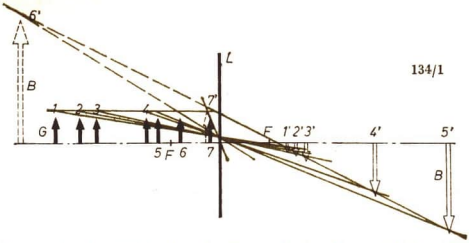
1. Es entsteht ein umgekehrtes vergrößertes reelles Bild.



2. Es entsteht ein aufrechtes vergrößertes virtuelles Bild.



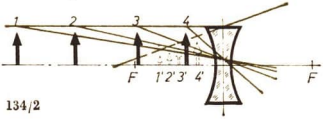
133/5 u. 6



134/1

Vorstehendes Bild zeigt die Gesamtheit aller möglichen Fälle der Bildentstehung an der Sammellinse. (Es wurde der Übersichtlichkeit halber nur die Linsenebene gezeichnet.)

Untersucht man verschiedene Stellungen des Gegenstandes an der Zerstreuungslinse, so ergibt sich, daß hier nur aufrechte verkleinerte virtuelle Bilder entstehen.



134/2

Bilder an Linsen

	Gegenstandsweite	Bildweite	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
Sammellinsen	$s > 2f$	$f < s' < 2f$ auf d. and. Seite d. L.	reell	umgekehrt	$y' < y$
	$s = 2f$	$s' = 2f$ auf d. and. Seite d. L.	reell	umgekehrt	$y' = y$
	$2f > s > f$	$s' > 2f$ auf. d. and. Seite d. L.	reell	umgekehrt	$y' > y$
	$s < f$	$\infty > s' > s$ $s > 0$ auf ders. Seite d. L.	virtuell	aufrecht	$y' > y$
Zerstreuungslinsen	$\infty > s > 0$	$s' < s$ auf ders. Seite d. L.	virtuell —	aufrecht	$y' < y$

Abbildungsgleichung für Linsen

Zur mathematischen Darstellung der Gesetzmäßigkeiten werden bei Linsen die Begriffe wie bei gekrümmten Spiegeln benutzt (↗ S. 128).

$$\triangleright \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Die Brennweite von Sammellinsen ist hierin positiv, die Brennweite von Zerstreuungslinsen negativ. Die Bildweite ergibt sich negativ, wenn sich Bild und Gegenstand auf der gleichen Seite der Linse befinden. Das Bild ist dann immer virtuell.

Beispiel Ein Gegenstand steht $s = 12$ cm von einer Zerstreuungslinse der Brennweite $f = -18$ cm. Wo entsteht das Bild?

Lösung:

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f}$$

$$s' = \frac{12\ \text{cm} \cdot (-18\ \text{cm})}{12\ \text{cm} - (-18\ \text{cm})} = \frac{-216\ \text{cm}^2}{30\ \text{cm}} = -7{,}2\ \text{cm}$$

$$\underline{\underline{s' = -7{,}2\ \text{cm}}}$$

Die Bildweite ist $-7{,}2$ cm. Das Bild ist virtuell und befindet sich auf der gleichen Seite der Linse wie der Gegenstand.

Abbildungsmaßstab ist wie beim gekrümmten Spiegel gegeben durch

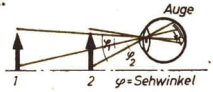
$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}.$$

O

Optische Geräte

Sehwinkel

Für das menschliche Auge erscheint ein Gegenstand um so größer, je größer der **Sehwinkel** ist, unter dem der Gegenstand betrachtet wird. Jedes vergrößernde optische Gerät (Lupe, Mikroskop, Fernrohr) hat die Aufgabe, den Sehwinkel zu vergrößern.



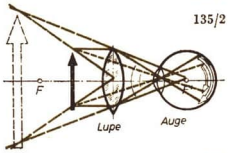
(Strahlenverlauf vereinfacht)

135/1

Die Lupe

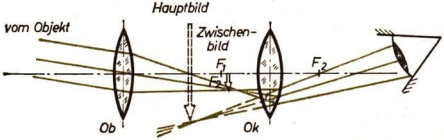
Die Lupe ist eine Sammellinse. Der Gegenstand liegt innerhalb der einfachen Brennweite. Es entsteht ein vergrößertes virtuelles Bild. Je kleiner die Brennweite, desto größer die Vergrößerung.

135/2



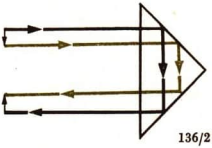
Fernrohre

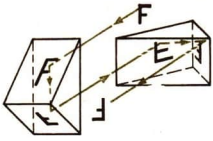
Man unterscheidet **Linsen-** und **Spiegelfernrohre.**
Objektiv heißt die dem zu betrachtenden Gegenstand (Objekt) zugewandte Linse bzw. Linsenkombination.
Okular heißt die dem Auge zugewandte Linse bzw. Linsenkombination.
Beim **Keplerschen** oder **astronomischen Fernrohr** erzeugt das Objektiv ein reelles **Zwischenbild**, das innerhalb der Brennweite des Okulars entsteht. Letzteres wirkt wie eine Lupe und erzeugt das vergrößerte virtuelle Hauptbild.



136/1

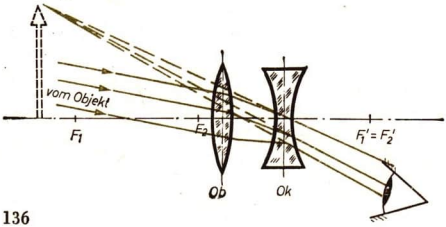
Will man das umgekehrte Hauptbild zu einem aufrechten Bild machen, so bringt man zwischen Objektiv und Okular noch eine Sammellinse als **Umkehrlinse.** Die erreichten Vergrößerungen liegen zwischen dreifach und fünftausendfach. Größere Objektivdurchmesser führen zu einem helleren Bild.
Bei **Prismenferngläsern** (Feldstechern) erfolgt die Umkehrung des Hauptbildes durch **totalreflektierende Prismen.**
(Ernst Abbe; 1840 bis 1905)


136/2



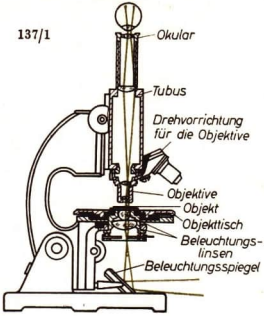
136/3

Das **Galileische** oder **holländische Fernrohr** ist sehr kurz und gibt nur eine drei- bis fünffache Vergrößerung. Das Okular ist eine Zerstreuungslinse.



136/4

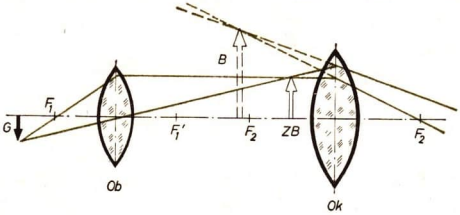
Das Mikroskop



137/1

Das Mikroskop ist nach dem gleichen optischen Prinzip wie das Keplersche Fernrohr aufgebaut. Da die Gegenstandsweiten klein sind, hat das Objektiv hier eine sehr kleine Brennweite.
Die **Gesamtvergrößerung** V_G ergibt sich als Produkt der Vergrößerung V_{Ob} des Objektivs und der Vergrößerung V_{Ok} des Okulars:

▷ $V_G = V_{Ob} \cdot V_{Ok}$

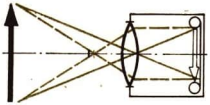


137/2

Die maximale Vergrößerung ist etwa 1500fach. Die besten Mikroskope lassen zwei Punkte, die einen Abstand von 160 nm haben, noch getrennt wahrnehmen.

Die fotografische Kamera

Die einfachste Kamera besitzt nur eine Sammellinse.
Die **Entfernungseinstellung** erfolgt durch Verändern der Bildweite.
Die **Blendeneinstellung** mit Hilfe einer Irisblende hat die Aufgabe, durch Ändern des Öffnungsdurchmessers mehr oder weniger Licht auf den Film fallen zu lassen.


137/3

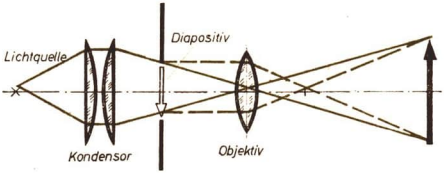
Bei vielen Fotoapparaten können mehrere Objektive (Weitwinkelobjektive, Teleobjektive) verwendet werden. Sie unterscheiden sich durch ihre Brennweite und damit durch ihren Abbildungsmaßstab. Modernste Objektive haben eine veränderliche Brennweite. Man spricht dann von „Gummilinsen".

Projektionsapparate

Mit **Bildwerfern** (Projektoren) kann man kleine Bilder stark vergrößert auf einen Wandschirm abbilden. Projektoren besitzen eine starke Lichtquelle. Man unterscheidet:

Diaskope (z. B. Kleinbildwerfer) zur Projektion von durchsichtigen Bildern (Diapositiven).

Der **Kondensor** hat die Aufgabe, möglichst viel Licht gleichmäßig durch das Diapositiv zu schicken.

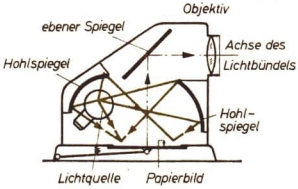


138/1

138/2

Episkope zur Projektion von undurchsichtigen Bildern.

Beim Episkop wird das zu projizierende Bild durch starke Lampen beleuchtet und ähnlich wie beim Diaskop durch ein Objektiv auf einem Schirm abgebildet.



Wellenoptik

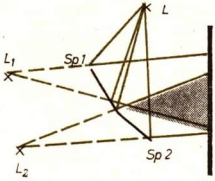
Dieses Gebiet der Optik behandelt optische Erscheinungen, die mit Hilfe der Wellennatur des Lichtes erklärt werden können. Hierzu gehören beispielsweise wellenoptische Erscheinungen, bei denen zusammengesetztes Licht in Farben zerlegt wird.

Interferenz durch Beugung

Interferenzen, wie sie aus der Betrachtung gekoppelter schwingungsfähiger Systeme (↗ S. 48) bekannt sind, lassen sich auch beim Licht beobachten.

Kohärentes Licht

erhält man, wenn man zwei Lichtbündel der gleichen Lichtquelle überlagert. Nur mit kohärentem Licht sind Lichtinterferenzen zu beobachten; man erhält es, wenn ein Lichtwellenzug durch Spiegel, Platten, Prismen oder Blenden geteilt wird. (Doppelspiegelversuch von FRESNEL; 1788 bis 1827)



139/1

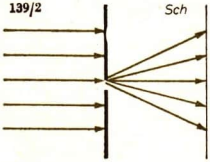
Interferenzerscheinungen

Im gerasterten Gebiet (Bild 139/1) überlagern sich die von den Spiegeln reflektierten Lichtbündel; es entstehen Interferenzerscheinungen.

▷ **Lichtinterferenzen haben ihre Ursachen in unterschiedlichen Wegen, die kohärente Lichtbündel zurücklegen müssen.**
Der Gangunterschied λ, 2λ, 3λ, ... führt zur Helligkeit (Verstärkung, Interferenzmaximum).
Der Gangunterschied $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}$, $\frac{5\lambda}{2}$, ... führt zur Dunkelheit (Auslöschung, Interferenzminimum).

Treffen Lichtstrahlen auf kleine Öffnungen oder enge Spalte, so breitet sich das Licht um die Ränder der Öffnungen nach allen Seiten aus, es wird **gebeugt**. Die Erklärung gibt das **Huygenssche Prinzip** (↗ S. 46).

139/2



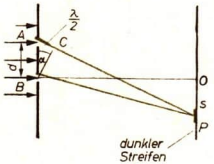
139/3

Beugung tritt auch an Kanten und dünnen Drähten auf. Dabei können Interferenzerscheinungen beobachtet werden.

139/4

Beugung am Doppelspalt

An der Stelle P entsteht ein dunkler Streifen, weil die beiden Lichtwellenzüge von A und B einen Gangunterschied $\overline{AC} = \frac{\lambda}{2}$ haben. Das ist ein Beispiel für ein **Mini-**



mum erster Ordnung. Beim Minimum zweiter Ordnung ist der Winkel α größer, und $\overline{AC}$ hat dann den Betrag $\frac{3\lambda}{2}$.

Diese Anordnung kann auch zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes benutzt werden. Aus der Ähnlichkeit zweier Dreiecke folgt

$\triangle ABC \sim \triangle PBO,$

$$\frac{\lambda}{2} : d = s : e,$$

$$\lambda = \frac{2ds}{e}.$$

s, d und e können sehr leicht gemessen werden.

Anstelle eines Doppelspaltes werden meist optische Gitter verwandt.

Solche Beugungsgitter werden hergestellt, indem man mit Spezialmaschinen parallele Spalte in eine Glasplatte ritzt. Man erreicht bis zu 2000 Spalte je Millimeter.
Gitter werden vor allem in der Spektroskopie verwandt.

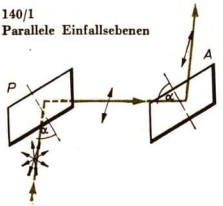
Polarisation des Lichtes

Licht läßt sich **polarisieren**, d. h., die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufenden Schwingungen verlaufen nur noch in **einer** Ebene. Dies ist nur bei Transversalwellen möglich. Die Polarisierbarkeit ist damit ein Beweis dafür, daß das Licht den Charakter einer Transversalwelle (↗ S. 44) trägt.
Die Polarisation des Lichtes ist z. B. durch Reflexion und Brechung möglich.

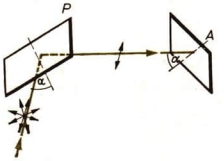
Polarisation durch Reflexion

Durch Reflexion wird Licht polarisiert, wenn man es unter einem Winkel von etwa 57° (der genaue Wert hängt von der Glassorte ab) auf eine Glasplatte (Polarisator P) fallen läßt. Das reflektierte Licht

140/1
Parallele Einfallsebenen



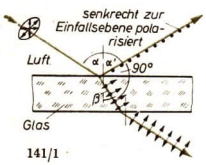
140/2
Senkrecht aufeinanderstehende Einfallsebenen



schwingt dann nur noch senkrecht zur Einfallsebene. Eine zweite Glasplatte (Analysator *A*) dient dem Nachweis der Polarisation.
Im zweiten Fall kann am Analysator keine Reflexion mehr stattfinden, da das einfallende polarisierte Licht keine Komponente besitzt, die senkrecht zur Einfallsebene schwingt.

Polarisation durch Brechung

Durch Brechung wird Licht polarisiert, wenn reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht aufeinander stehen. Dies ist bei Glas beim Polarisationswinkel $\alpha \approx 57°$ der Fall. Der gebrochene Strahl besteht dann aus polarisiertem Licht, das in der Einfallsebene schwingt (Bild 141/1).
In der Praxis benutzt man **Polarisationsfilter.** Das sind z. B. dünne Folien, die das Licht polarisieren.
Manche Stoffe, wie z. B. Quarz und Zukkerlösung, können die Schwingungsebene des Lichtes drehen.



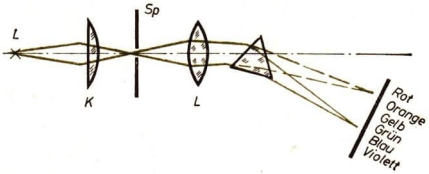
141/1

Die Polarisation wird technisch genutzt bei der Materialprüfung von Gläsern (Spannungspolarisation), in der Fotografie (Filtern von Licht, das an Glasscheiben unerwünschte Reflexe hervorruft) und bei der Bestimmung von Blutzucker (Drehung der Schwingungsebene).

Dispersion

Dispersion ist die Zerlegung zusammengesetzten Lichtes in einzelne Farben. Läßt man weißes Licht durch ein Prisma fallen, so entsteht ein Farbband, ein Spektrum.

141/2



Man kann dabei folgende Hauptfarben beobachten:

Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett.

Lichtfarbe und Wellenlänge

Farbe	Wellenlänge λ in nm	Farbe	Wellenlänge λ in nm
rot	790 bis 640	grün	580 bis 495
orange	640 bis 620	blau	495 bis 440
gelb	620 bis 580	violett	440 bis 390

An das Violett schließt sich das nicht sichtbare **ultraviolette Spektrum** und an das Rot das nicht sichtbare **ultrarote Spektrum** (Wärmestrahlen) an.

Farbe und Brechungszahl

Medium	Brechungszahl für λ = 656,3 nm (rot)	Brechungszahl für λ = 486,1 nm (blau)
Wasser	1,331	1,337
Kronglas	1,516	1,525
Flintglas	1,614	1,631

Die Brechungszahl hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab.

Obenstehende Tabelle gilt für den Übergang des Lichtes aus dem Vakuum.

Da die Lichtgeschwindigkeit in den einzelnen Medien verschieden ist, ist in ihnen auch die Wellenlänge einer bestimmten Welle (Farbe) verschieden. Die Frequenz bleibt konstant für eine bestimmte Farbe.

Ergänzungs- oder Komplementärfarben

Die Vereinigung aller Farben des Spektrums ergibt wieder Weiß. Blendet man vor der Vereinigung eine einzelne Spektralfarbe aus, so entsteht aus den restlichen Spektralfarben eine Mischfarbe. Mischfarbe und ausgeblendete Spektralfarbe ergeben wieder Weiß.

Komplementärfarben

rot – blaugrün
orange – eisblau
gelb – ultramarinblau
grün – purpur
violett – grüngelb

Spektralfarben entstehen durch Zerlegung von Licht.

Körperfarben entstehen, wenn ein Körper von weißem Licht beleuchtet wird, Teile dieses Lichtes absorbiert und den restlichen Teil des Spektrums reflektiert.

Farbmischung

Zum Hervorrufen verschiedener Farbeindrücke benutzt man die **additive** und die **subtraktive Farbmischung:**

Additive Farbmischuug

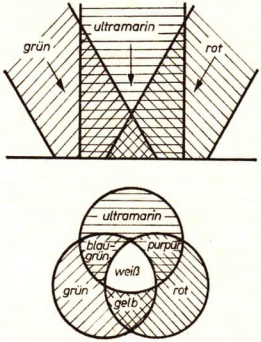
Ausgangspunkt ist verschiedenfarbiges Licht, das auf eine Stelle des Bildschirmes geworfen („addiert") wird.

Grundfarben: Rot, Grün, Ultramarinblau

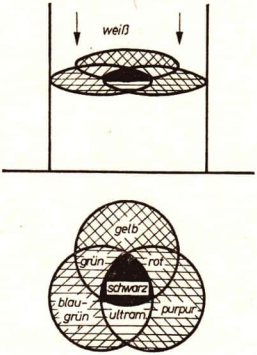
Subtraktive Farbmischung

Ausgangspunkt ist weißes Licht. Durch verschiedene Filter werden Anteile des weißen Lichtes absorbiert („subtrahiert").

Grundfarben: Gelb, Purpur, Blaugrün



143/1



143/2

Einteilung der Spektren

Nach der Art der Zerlegung

Beugungsspektrum

entsteht durch Beugung;

tritt paarweise in mehreren Ordnungen auf; rotes Licht ist am weitesten vom geraden Lichtweg weggebeugt; die Wellenlängen sind fast linear über das Spektrum verteilt.

Dispersionsspektrum

entsteht durch Dispersion an einem Prisma;

tritt nur einfach auf; rotes Licht wird am wenigsten gebrochen; die Verteilung der Wellenlängen ist nicht linear.

Nach dem Aggregatzustand des lichtaussendenden Stoffes

Kontinuierliches Spektrum

wird durch glühende feste oder flüssige Körper und von Gasen unter hohem Druck hervorgerufen.

Linienspektrum

wird durch glühende ionisierte Gase hervorgerufen.

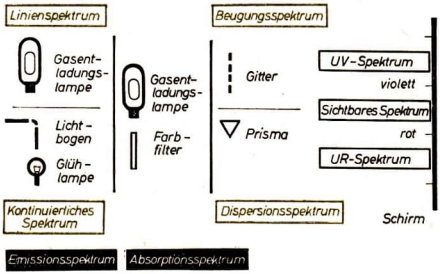
Nach der Art des Mediums zwischen Lichtquelle und Schirm

Emissionsspektrum

Das von Atomen und Molekülen ausgesandte Spektrum.

Absorptionsspektrum

Liegt ein Stoff zwischen Lichtquelle und Schirm, der einen Teil des Lichtes absorbiert, dann erhält man ein Absorptionsspektrum.



144/1

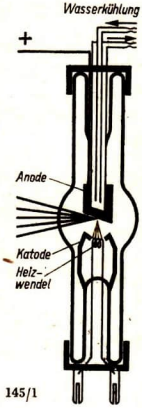
Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen, eine elektromagnetische Wellenstrahlung (↗S. 111), entstehen in einer auf mindestens 0,001 Torr evakuierten Röhre.

(WILHELM CONRAD RÖNTGEN; 1845 bis 1923)

Bei der Glühkatoden-Röntgenröhre befindet sich ein gewendelter Wolframglühdraht inmitten einer hohlspiegelartig ausgebildeten Katode. Durch die Form der Katode werden die vom Heizfaden ausgehenden Elektronen auf der gegenüberliegenden, aus Wolfram bestehenden Anode in einem Brennfleck vereinigt, von dem die Röntgenstrahlung ausgeht. Damit die Anode im Brennfleck nicht

schmilzt, wird sie von innen mit Wasser gekühlt. Die Spannung liegt je nach Röhrenart zwischen 10 kV und 400 kV (Bild 145/1).



145/1

Röntgenstrahlen

regen verschiedene Stoffe zum Fluoreszieren an,
ionisieren Gase,
rufen chemische Prozesse hervor,
zerstören lebendes Gewebe,
durchdringen Körper verschieden stark,
breiten sich geradlinig aus,
werden durch magnetische und elektrische Felder nicht beeinflußt.

Die **Durchdringungsfähigkeit** der Strahlen wächst mit der Röhrenspannung und wird als **Härte** der Strahlung bezeichnet.

Beugung von Röntgenstrahlen

Als Gitter verwendet man Kristalle, bei denen die Atome weitgehend regelmäßig angeordnet sind. Die beobachteten Interferenzen sind ein Beweis für den Wellencharakter der Röntgenstrahlen. Die Wellenlängen betragen etwa 10^{-6} cm bis 10^{-10} cm.

(Max v. Laue; 1879 bis 1960)

Atomphysik

148 *Aufbau der Atomhülle*

148 Der Bau der Atome

149 Das Bohrsche Atommodell

151 *Aufbau der Atomkerne*

151 Die Radioaktivität

154 Isotope

158 Kernstrahlungsmeßmethoden

159 *Die Kernenergie*

159 Überblick über Kernreaktionen

162 Teilchenbeschleuniger

163 Die Kernspaltung

166 Die Kernverschmelzung (Kernfusion)

167 Energiebilanz bei Kernreaktionen

170 Erzeugung und Anwendung der Kernenergie

Atomphysik

Aufbau der Atomhülle

Der Bau der Atome

Atom

Atome sind die kleinsten, mit chemischen Mitteln nicht teilbaren Bausteine der Elemente (Grundstoffe).
Atome besitzen einen sehr kleinen, positiv geladenen Kern, der nahezu die gesamte Masse des Atoms trägt.

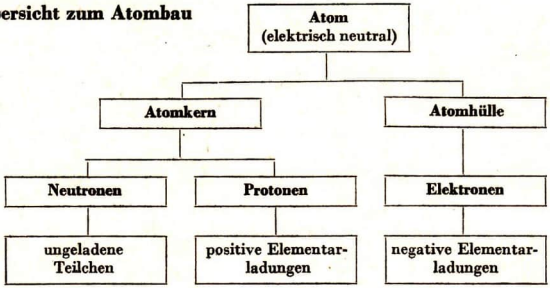
Atomkernradius:

$R = R_0 \sqrt[3]{A}$ $\qquad R_0 \approx 1{,}4 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{m}$

R: Atomkernradius

A: Massenzahl

Übersicht zum Atombau



Ladung:

$Q_n = 0$ $\qquad Q_p = +e$ $\qquad Q_e = -e$

Ruhmasse:

$m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$ $\qquad m_p = 1{,}672 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$ $\qquad m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}$

Elementarladung: $|e| = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As}$

Wasserstoffatom:

Atomradius (kleinster Bahnradius des H-Atoms):

$r_H = 0{,}529 \cdot 10^{-10}$ m

Kernradius des H-Atoms:

$R_H \approx 1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m

Um die Zusammensetzung eines Atoms zu kennzeichnen, führte man folgende Schreibweise ein:

$^{A}_{Z}$ Symbol des Elements	**Beispiele** $^{4}_{2}He$; $^{14}_{7}N$; $^{27}_{13}Al$;

darin bedeuten

A: Massenzahl (Zahl der Kernbausteine: Neutronen + Protonen)

Z: Protonenzahl = Kernladungszahl = Elektronenzahl = Ordnungszahl

Das Bohrsche Atommodell

Durch **Atommodelle** sollen experimentell bestätigte Erkenntnisse verständlich und erkannte Gesetzmäßigkeiten veranschaulicht werden.

Die Atommodelle gelten meist nur für einen begrenzten Erfahrungsbereich und geben in diesem ein annähernd getreues Bild der Wirklichkeit. Mit fortschreitender Erkenntnis werden die Modelle durch andere, mit der Wirklichkeit besser übereinstimmende Modelle ersetzt. Diese geben dann die Wirklichkeit umfassender, aber nicht vollkommen wieder.

Frühere Modellvorstellungen werden nicht immer falsch, sondern behalten oft in einem begrenzten Bereich weiterhin Gültigkeit.

NIELS BOHR (1885 bis 1962) wandte Überlegungen MAX PLANCKS (Strahlungsenergie kann immer nur in ganzzahligen Vielfachen eines bestimmten kleinen Energiebetrages aufgenommen oder abgegeben werden) auf das Wasserstoffatom an.

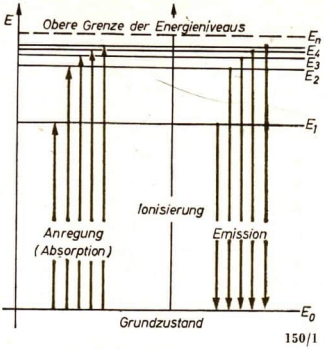
BOHR führte zur Erklärung der Existenz stabiler Atome mathematisch formulierte Bedingungen (Postulate) ein.

1. Die **Elektronen** umlaufen den Atomkern **nur auf bestimmten Bahnen strahlungslos.**
2. Es gibt **nur eine bestimmte Anzahl strahlungsfreier Bahnen.** Jeder dieser Bahnen entspricht ein bestimmter Energiezustand E des Atoms.

A

Emission und Absorption von Strahlung

Einer jeden Elektronenbahn des Wasserstoffatoms entspricht eine ganz bestimmte Energie. Die Energieaufnahme oder Energieabgabe erfolgt immer nur in ganz bestimmten Energiebeträgen. Ein Atom im **Grundzustand** besitzt den geringsten Energieinhalt (kernnächste Elektronenbahn).



150/1

Aufnahme einer bestimmten Energie ΔE (Anregung)

Vergrößerung der Gesamtenergie des Atoms –

Übergang in einen energiereicheren Zustand –

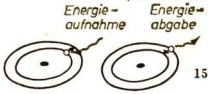
(kernfernere Bahn)

Abgabe einer bestimmten Energie ΔE (Emission)

Verringerung der Gesamtenergie des Atoms –

Übergang von einem energiereicheren Zustand in einen energieärmeren Zustand –

(kernnähere Bahn)



150/2

Vorzüge und Grenzen des Bohrschen Atommodells

Vorteile

Erklärung der experimentellen Forschungsergebnisse über den Atombau (Kern-Elektronenbahnen) –

Verständliche Deutung der Entstehung der Linienspektren –

Erklärung des Aufbaus des Periodensystems der Elemente.

Nachteile

Die Existenz bestimmter Elektronenbahnen wird nicht erklärt –

Das strahlungslose Umlaufen der Elektronen auf bestimmten Bahnen wird nicht erklärt –

Keine Aussagen über das Verhalten der Elektronen beim Übergang von einem Energiezustand zum anderen.

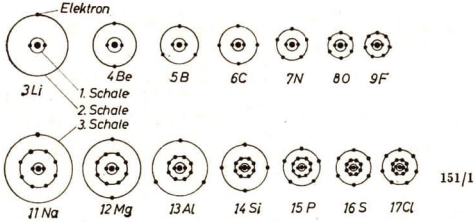
Das Bohrsche Atommodell genügt zur Erklärung der Gesetzmäßigkeiten und Vorgänge im Atom nicht. Es spiegelt die Wirklichkeit nur

unvollkommen wieder. Aus obengenannten und anderen Gründen mußte es aufgegeben werden.

Neben SCHRÖDINGER und DIRAC ist HEISENBERG einer der Begründer der modernen Quantentheorie. Nach ihr kann der Atombau nur noch mit Hilfe komplizierter mathematischer Gleichungen erläutert werden.

Der Schalenaufbau der Atome

Die chemischen Eigenschaften werden wesentlich von den Außenelektronen bestimmt. In der Außenschale weisen die chemisch ähnlichen Elemente einer senkrechten Gruppe im Periodensystem die gleiche Anzahl von Elektronen auf.



151/1

Aufbau der Atomkerne

Die Radioaktivität

Radioaktivität

Sie ist eine Eigenschaft von Atomkernen mancher Elemente, die sich ohne äußeren Einfluß unter Aussendung von Teilchen in einen anderen Kern verwandeln (häufig von Gammastrahlung begleitet). Diese Kernumwandlung geschieht von selbst, ist gesetzmäßig und durch keinerlei physikalische Mittel von außen beeinflußbar.

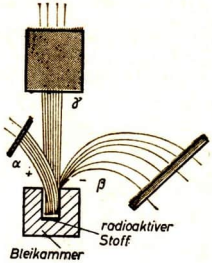
Natürliche und künstliche Radioaktivität. Natürlich radioaktiv nennt man solche Elemente, deren Atomkerne ohne vorherige Beeinflussung zerfallen; künstlich radioaktiv nennt man solche Elemente, die vom Menschen künstlich erzeugt wurden und deren Atomkerne danach wieder zerfallen.

A

Eigenschaften der radioaktiven Strahlung

Radioaktive Strahlen
durchdringen Stoffe mehr oder weniger stark,
belichten fotografische Platten (auch durch die Verpackung),
ionisieren Gase,
regen bestimmte Stoffe zur Fluoreszenz an und
zerstören Gewebezellen, üben auf Organismen eine Reizwirkung aus

Arten der radioaktiven Strahlung



152/1 Aufspaltung radioaktiver Strahlen durch ein Magnetfeld und ihre Schwächung durch verschieden dicke Metallplatten

Alphastrahlen	Betastrahlen	Positronenstrahlen	Gammastrahlen
$^{4}_{2}He$ oder α	$^{0}_{-1}e$ oder β^-	$^{0}_{+1}e$ oder β^+	γ
doppelt positiv geladene Heliumatome	Elektronen	Positronen	elektromagnetische Wellen
Beim natürlichen radioaktiven Zerfall und vorwiegend bei den schwersten künstlich radioaktiven Stoffen beobachtet.	Bei natürlichen und künstlich radioaktiven Stoffen beobachtet.	Nur bei künstlich radioaktiven Stoffen beobachtet.	Bei natürlichen und künstlich radioaktiven Stoffen beobachtet.
Ablenkung durch starke magnetische Felder.			Keine Ablenkung im Magnetfeld.

Arten der Kernumwandlungen

(Auswahl)

α-Umwandlung: $^{A}_{Z}E \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}E + {}^{4}_{2}He$

Beispiel $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$

β⁻-Umwandlung: $^{A}_{Z}E \rightarrow {}_{Z+1}{}^{A}E + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$

Beispiel $^{214}_{82}Pb \rightarrow {}^{214}_{83}Bi + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$ (↗ S. 157)

β+-Umwandlung: $^{A}_{Z}E \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}E + {}^{0}_{+1}e + \nu$

Beispiel $^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{+1}e + \nu$ (↗ S. 157)

γ-Umwandlung: $^{A}_{Z}E^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}E + \gamma$

Beispiel $^{208}_{82}Pb^{*} \rightarrow {}^{208}_{82}Pb + \gamma$

E* bedeutet angeregter Kern

Gesetzmäßigkeiten des radioaktiven Zerfalls

Die Atomkerne eines Stoffes zerfallen nicht alle auf einmal. Nur ein bestimmter Teil zerfällt jeweils. Von einer bestimmten Menge eines radioaktiven Stoffes zerfällt in gleichen Zeitabständen immer der gleiche Anteil.

Das Zerfallgesetz

$N = N_0 \, e^{-\lambda t}$

N_0: Anzahl der zu Beginn des Zeitabschnittes t vorhandenen Atome
N: Anzahl der nach Ablauf der Zeit t noch nicht zerfallenen Atomkerne
λ: Zerfallskonstante
e: Basis des natürlichen Logarithmensystems ($e = 2{,}71828$)

Halbwertszeit nennt man die Zeit, in der jeweils die Hälfte der vorhandenen Atome eines radioaktiven Elementes zerfallen.

Element	Halbwertszeit
U	$4{,}5 \cdot 10^{9}$ Jahre
Ra	1590 Jahre
Rn	3,82 Tage
RaC	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$ s

A

Aus radioaktiven Kernen entstehen oft wieder radioaktive Kerne.

Zerfallsreihen nennt man Elementenfolgen solcher radioaktiver Zerfälle von Atomkernen bis zum Endelement mit stabilem Kern.

Name der Reihe	Ausgangselement	Endelement
Uran – Radium	$^{238}_{92}U$	$^{206}_{82}Pb$
Uran – Aktinium	$^{235}_{92}U$	$^{207}_{82}Pb$
Thorium	$^{232}_{90}Th$	$^{208}_{82}Pb$
Neptunium	$^{237}_{93}Np$	$^{209}_{83}Bi$

Isotope

Die Atomkerne vieler Elemente haben gleiche Protonenzahl, aber verschiedene Neutronenzahl. Diese Elemente stehen im Periodensystem wegen der gleichen Protonenzahl an der gleichen Stelle. Sie haben unterschiedliche physikalische Eigenschaften.

Die Isotope des Wasserstoffs

	Name des Isotops	Symbol des Isotops	Name des Kerns	Symbol des Kerns	Zusammensetzung des Kerns
	leichter Wasserstoff	$^{1}_{1}H$	Proton	p	p
	schwerer Wasserstoff (Deuterium)	$^{2}_{1}H$, $^{2}_{1}D$	Deuteron	d	p + n
	Tritium	$^{3}_{1}H$, $^{3}_{1}T$	Triton	t	p + 2n

Mischelemente

sind ein Gemisch aus verschiedenen Isotopen. Mischelemente haben meist ein festes Mischungsverhältnis, das durch Prozentzahlen angegeben wird und unabhängig vom Fundort das gleiche ist:

Beispiel

Symbol	Massenzahl	Häufigkeit
$^{238}_{92}U$	238	99,274 %
$^{235}_{92}U$	235	0,720 %
$^{234}_{92}U$	234	0,006 %

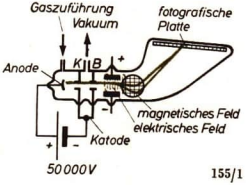
Trennung der Isotope

Trennung durch elektrische und magnetische Felder

Zur exakten Massenbestimmung der Isotope bedient man sich der Massenspektrografen.

Mit einem **Massenspektrografen** lassen sich Isotope nach vorheriger Ionisation in einer Ionenquelle hinsichtlich ihrer spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ trennen und solche mit gleichem $\frac{e}{m}$ in demselben Punkt einer fotografischen Platte vereinigen.

In dem von F. W. ASTON 1919 konstruierten Massenspektrografen läßt man einen durch den Kanal K und die Blende B ausgesonderten Ionenstrahl zunächst durch ein elektrisches Feld, dann durch ein magnetisches Feld beeinflussen. Die Feldlinien beider räumlich getrennten Felder stehen senkrecht zueinander.



155/1

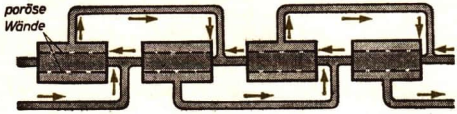
Elektrisches Feld	Magnetisches Feld
Trennung aller Ionen nach der Energie $\frac{m v^2}{2}$	Trennung aller Ionen mit gleichem $\frac{e}{m}$-Wert nach ihrer Geschwindigkeit
parabelförmige Ablenkung	unterschiedlich gekrümmte Kreisbahnen

Besteht ein Ionenstrahl aus Teilchen mit unterschiedlicher spezifischer Ladung $\frac{e}{m}$, also verschiedener Masse, so werden alle Ionen unterschiedlicher Geschwindigkeit, aber gleicher Masse im gleichen Punkt auf der fotografischen Platte, solche mit größerer Masse in einem anderen Punkt der Platte auftreffen. Man erhält eine Aufnahme, die mit optischen Linienspektren (↗ S. 144) vergleichbar ist und **Massenspektrum** genannt wird.

A

Trennung durch Diffusion

Leichtere Isotope diffundieren (bei gleichen Bedingungen, $T = \text{const}$) durch geeignete Filter schneller hindurch als schwere Isotope. Durch Hintereinandersetzen sehr vieler Diffusionsstufen kann man z. B. eine erhebliche Anreicherung der leichteren U-235-Isotope aus dem Isotopengemisch des Urans erreichen.



156/1

Trennung gasförmiger und flüssiger Isotopengemische durch Konvektion

In einem senkrechten Rohr von etwa 30 m Länge und nur einigen Zentimetern Durchmesser wird ein in der Rohrachse angebrachter Draht elektrisch auf mehrere hundert Grad Celsius erhitzt. Es entsteht ein Temperaturgefälle. Die leichteren Isotope steigen am Heizdraht nach oben, die schwereren Isotope sinken an der kälteren Rohrwand nach unten.

Künstliche Radioaktivität

Die künstliche Radioaktivität entdeckte 1934 das französische Forscherehepaar IRENE und FREDERIC JOLIOT-CURIE.

Durch Alphabeschuß beispielsweise auf Aluminium wurde neben starker Neutronenstrahlung ein in der Natur nicht vorkommendes Isotop des Phosphors nach folgender Reaktion gebildet:

$$^{4}_{2}\text{He} + ^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow ^{30}_{15}\text{P} + ^{1}_{0}\text{n}\,.$$

Dabei zerfällt $^{30}_{15}\text{P}$ mit einer Halbwertszeit von $\approx$ 3 Minuten unter Aussendung eines **Positrons** in einen stabilen Siliziumkern:

$$^{30}_{15}\text{P} \rightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + {}_{+1}^{0}\text{e}\,.$$

Die von ANDERSON 1932 in der **Höhenstrahlung** entdeckten Positronen waren durch die künstliche Radioaktivität erstmalig auf der Erde festgestellt worden.

Das **Positron** hat die gleiche Ruhmasse, aber entgegengesetzte Ladung wie das Elektron (Symbol: ${}_{+1}^{0}\text{e}$, e^{+} oder β^{+}).

$$m_{\text{e}+} = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}\,.$$

Nur Atomkerne mit einem bestimmten Verhältnis der Protonen- zur Neutronenzahl sind stabil. Wird durch eine künstliche Kernumwandlung das Verhältnis geändert, so kann ein instabiler Atomkern entstehen. Dieser

sendet Teilchen aus, bis das Verhältnis wieder einen bestimmten Wert erreicht hat.

Atomkerne	
mit einem relativen **Neutronenüberschuß** sind β^--aktiv.	mit einem relativen **Protonenüberschuß** sind β^+-aktiv.
${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{+1}p + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$	${}^{1}_{+1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$
Ein Neutron wandelt sich in ein Proton um. Dabei werden ein Elektron und ein Antineutrino ausgesandt.	Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um. Dabei werden ein Positron und ein Neutrino ausgesandt.

Die Aussendung eines Antineutrinos (bzw. Neutrinos) mußte aus Gründen des Energieerhaltungssatzes (↗ S. 66) und des Drehimpulserhaltungssatzes gefordert werden. (1956 von COWAN und REINES nachgewiesen.)

Überblick über die Anwendung künstlich radioaktiver Nuklide

Ein einzelnes Isotop eines Elementes heißt Nuklid.
Von etwa 1000 bekannten Nukliden werden etwa 150 für die weitere Verwendung in der Technik und der Wissenschaft hergestellt. Je nach der Anwendung der radioaktiven Nuklide kennt man folgende Verfahren:

Durchstrahlungsverfahren

α-Strahler: Zerstörungsfreie Messung geringer Dicken

β-Strahler: Zerstörungsfreie Messung der Dicke; Dichtemessungen

γ-Strahler: Einsatz erfolgt wegen der Härte der Strahlung ähnlich wie bei der Röntgenstrahlung (zerstörungsfreie Werkstoffprüfung)

Bestrahlungsverfahren

Ionisierung von Atomen und Molekülen
Beschleunigung und Kontrolle chemischer Reaktionen
Veränderung physikalischer Eigenschaften
Tiefentherapie bei Geschwulstkrankheiten

Markierungsverfahren

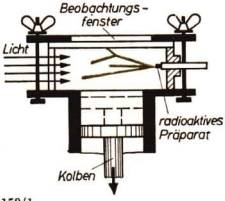
Markierung von Atomen zur Stoffwechseluntersuchung
Verschleißmessungen an schwer zugänglichen Stellen (Schneidwerkzeuge, Kolbenringe, Hochofenmauerwerk)

A

Kernstrahlungsmeßmethoden

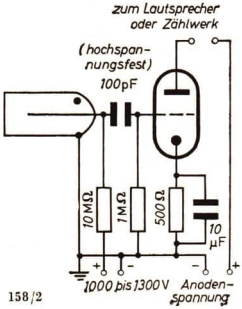
visuelle Methoden	**elektrische Methoden**
Wilsonsche Nebelkammer	Ionisationskammer
Diffusionskammer	Szintillationszähler mit Fotovervielfacher
Szintillationszähler	Geiger-Müller-Zählrohr
Fotoplatten	Halbleiter-Detektor
Dosimeter	

Die **Wilsonsche Nebelkammer** ist ein Gerät zum Sichtbarmachen der Bahnen elektrisch geladener Teilchen. In einem abgeschlossenen, zylinderförmigen Gefäß wird die staubfreie Luft durch Wasserdampf oder Alkohol nahezu gesättigt. Durch rasche Bewegung des im Gefäß befindlichen Kolbens wird die Luft adiabatisch ausgedehnt und so weit abgekühlt, daß der Raum mit Wasserdampf übersättigt ist. Eindringende radioaktive Strahlen ionisieren das Gas längs ihrer Bahn. An den ionisierten Gasatomen bilden sich feine Wassertröpfchen, die den Weg, den das Teilchen genommen hat, bei geeigneter Beleuchtung als feine Nebelspur sichtbar machen. Man kann die Bahn des radioaktiven Teilchens auch fotografieren.
In einem starken Magnetfeld lassen sich mit der Nebelkammer auch gekrümmte Bahnen von Teilchen fotografieren. Die Bahnkrümmung ermöglicht eine Bestimmung der Teilchenenergie.



158/1

Das **Geiger-Müller-Zählrohr** besteht aus einem leitfähigen Zylinder. In der Achse des Rohres befindet sich der gegen den Rohrmantel isolierte Zählrohrdraht. Der Innenraum ist mit einem Gas gefüllt. Zwischen Rohrwandung und Zähldraht liegt eine Spannung von der Größenordnung 1000 V.
Eindringende geladene Teilchen ionisieren eine bestimmte Anzahl der Gasatome. Die durch Ionisation entstandenen Elektronen und Ionen werden im elektrischen Feld beschleunigt. Positive Ionen gelangen zur negativ geladenen Zylinderwand, Elektronen zum positiv geladenen Draht. Der kurzzeitige Entladungsstrom erzeugt am Widerstand einen Spannungsstoß, der in einem Verstärker geeignet verstärkt und von einem Zählwerk registriert wird.



158/2

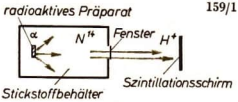
Überblick über Kernreaktionen

Prinzip einer künstlichen Kernumwandlung

Wird ein Atomkern X mit einem Teilchen x mit ausreichender Energie beschossen, so entsteht ein Kern Y eines anderen chemischen Elementes, und irgendein Teilchen y fliegt davon. Im Endergebnis geht der Anfangszustand X plus x in den Endzustand Y plus y über. Man schreibt dafür $X + x \rightarrow Y + y$ oder in abgekürzter Form X (x, y) Y.

Beispiel

Trifft ein Heliumkern zentral auf einen Stickstoffkern, so tritt eine Kernumwandlung ein, bei deren Verlauf ein Proton ausgestoßen wird und der Kern als ${}^{17}_{8}O$ zurückbleibt.



159/1

${}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}p$ oder in

Kurzform: ${}^{14}_{7}N\ (\alpha, p)\ {}^{17}_{8}O$.

Bei einer Kernumwandlung muß sowohl die Summe der Massenzahlen (obere Indizes) als auch die Summe der Kernladungen (untere Indizes) auf beiden Seiten gleich sein.

Allgemeine Eigenschaften der Atomkerne

Neutronen und **Protonen** sind Bausteine des Atomkerns. Beide Kernbausteine werden auch **Nukleonen** genannt. Mit dieser Bezeichnung soll angedeutet werden, daß man die Protonen und die Neutronen als verschiedene Zustände eines Kernteilchens betrachten kann.

Zu den **wichtigsten Eigenschaften eines Atomkerns** gehören seine **Masse** und seine **Kernladung.**

Die **Masse des Kerns** wird durch die Anzahl der Nukleonen bestimmt.

Die **Kernladung** wird durch die Anzahl der Protonen bestimmt.

Die Protonenzahl im Kern heißt **Kernladungszahl (Z).**

Unter einem **Nuklid** versteht man einen Kern mit gegebener Kernladungszahl und Massenzahl in einem genau bestimmten Energiezustand.

A

Die atomare Masseneinheit (Formelzeichen: u) ist gleich $\frac{1}{12}$ der Masse des Nuklids ^{12}C, dessen Kern aus 6 Protonen und 6 Neutronen besteht.

$$1\,u = \frac{1}{12} m_{(^{12}C)} = 1{,}660\,277 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

Seit 1962 werden bei Massenvergleichen alle Atom- oder Nuklidenmassen auf das Nuklid ^{12}C bezogen. **Umrechnungsfaktor** zwischen der bisherigen physikalischen Atommassenskale mit ^{16}O als Bezugsnuklid und der neuen vereinheitlichten relativen Nuklidenmassenskale mit ^{12}C als Bezugsnuklid ist

$$\frac{m_{(^{16}O)}}{m_{(^{12}C)}} = 1{,}000\,317\,.$$

Die **Massenzahl** A des Atomkerns ist gleich der Nukleonenzahl

$$A = N + Z.$$

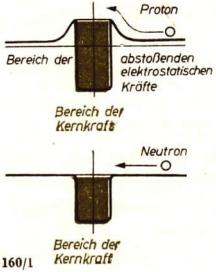
Die Zahl der Neutronen N ergibt sich aus der Differenz der Massenzahl A und der Kernladungszahl Z.

$$N = A - Z.$$

Kernreaktionen

Als Kernreaktion bezeichnet man die Vorgänge, die sich ereignen, wenn ein Teilchen in den Wirkungsbereich eines Kerns gerät.

Ein sich gegen den Atomkern bewegendes elektrisch positiv geladenes Teilchen (Alphateilchen, Proton, Deuteron) muß erst die elektrostatische Abstoßung zwischen Atomkern (durch Protonen) und Geschoßteilchen überwinden, denn gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Zur Verrichtung dieser Arbeit muß das Teilchen eine entsprechende kinetische Energie besitzen, um den Abstoßungsbereich zu überwinden. Dann gelangt das Teilchen in den Bereich der **Kernkräfte,** und es kann anstelle oder neben einer Streuung im Kernkraftbereich eine **Kernreaktion** eintreten.



160/1

Bei den elektrisch ungeladenen Neutronen fällt die elektrostatische Abstoßung weg. Neutronen können sich mit beliebig kleiner Geschwindigkeit dem Bereich der Kernkraft nähern. Die **Kernkräfte,** die den Zusammenhalt der Kernbausteine bewirken, haben eine **sehr geringe Reichweite** (Größenordnung: $R \approx 10^{-15}$m). Sie wirken nur von Nachbarteilchen zu Nachbarteilchen, haben vermutlich mit der Ladung der Elementarteilchen nichts zu tun und sind nicht

Beispiele Charakteristische Größen einiger Atomkerne

Kern (Teilchen)	Symbol	Massenzahl A	Protonenzahl Z (Kernladungszahl)	Neutronenzahl N	Kernmasse bzw. Teilchenmasse	Schreibweise
Neutron	n	1	0	1	1,00898 *u*	$^{1}_{0}n$
Proton	p	1	1	0	1,00759 *u*	$^{1}_{1}p$
Helium	He	4	2	2	4,00278 *u*	$^{4}_{2}He$
Stickstoff	N	14	7	7	14,00368 *u*	$^{14}_{7}N$
Sauerstoff	O	16	8	8	15,99561 *u*	$^{16}_{8}O$
Natrium	Na	23	11	12	22,9910 *u*	$^{23}_{11}Na$
Jod	J	127	53	74	126,9157 *u*	$^{127}_{53}J$
Uran	U	238	92	146	238,125 *u*	$^{238}_{92}U$

elektromagnetischer Natur. Experimente zeigten, daß diese Kräfte **sehr groß** sind. Ungeachtet der kräftigen elektrischen Abstoßung der Protonen ist ein einzelnes Teilchen im Kern mit einer Energie von rund 7 MeV gebunden. Diese Kernenergie kann bei einer **Umwandlung** des Kerns, bei der **Kernspaltung** oder der **Kernverschmelzung** frei werden und ist in der praktischen Anwendung als „Atomenergie" bekannt.

Kernumwandlung

1919 von RUTHERFORD (1871 bis 1937) erstmalig durchgeführt.

Durch Beschuß stabiler Atomkerne mit energiereichen Teilchen (α, p, d, n) wandelt sich das Ausgangselement in ein neues Element um, dessen Kernladungszahl sich nur wenig von der des Ausgangselementes unterscheidet. Diese Kernumwandlungen führten zu einer großen Zahl von stabilen und auch radioaktiven Nukliden und zu neuen Elementen mit höheren Ordnungszahlen als Uran (Transurane ↗ S. 165).

Beispiel

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{233}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\nearrow +{}^{0}_{1}\mathrm{e}} {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow{\nearrow +{}^{0}_{1}\mathrm{e}} {}^{233}_{92}\mathrm{U}$$

Teilchenbeschleuniger

Zur Durchführung von Kernumwandlungen werden energiereiche Teilchen als Geschosse benötigt. **Teilchenbeschleuniger** sind Geräte oder Anlagen, in denen geladene Teilchen (z. B. α, p, d) auf hohe Energie beschleunigt werden. Diese Energien mißt man meist in der

Maßeinheit Elektronenvolt.

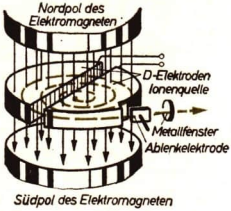
1 Elektronenvolt (eV) ist die Energie, die ein mit einer Elementarladung $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As geladenes Teilchen erhält, wenn es im elektrischen Feld bei einer Spannung 1 V beschleunigt wird.

Umrechnungen ↗ S. 194.

Das Zyklotron

In einem homogenen und zeitlich konstanten Feld eines großen massiven Magneten befindet sich eine Vakuumkammer mit den Beschleunigungselektroden. Zwei gegeneinander isolierte Elektroden haben die Form einer durch einen Schlitz in zwei D-förmige Hälften geteilten Metalldose. An den beiden Dosenhälften (Duanten) liegt

eine hochfrequente Wechselspannung mit zeitlich konstanter Frequenz an (Größenordnung der Frequenz 10^7 Hz, der Spannung 100 kV).



163/1

Arbeitsweise:

1. **Periodischer Einschuß von Ionen** in den Spalt zwischen den Duanten.
2. **Beschleunigung der Ionen** durch das im Spalt herrschende **elektrische Feld.**
3. Das starke **magnetische Führungsfeld** zwingt die Ionen auf eine halbkreisförmige Bahn.
4. Vor Erreichen des Spaltes wechselt das elektrische Feld seine Richtung.
5. Durch **wiederholte Beschleunigung im elektrischen Feld** wird die Energie weiter vergrößert.
6. Die Ionen durchlaufen das magnetische Führungsfeld mit größerer Geschwindigkeit auf einem größeren Halbkreis.
7. Mit zunehmender Zahl der Umläufe setzt sich die Bahn der Ionen aus Halbkreisen von wachsendem Radius zusammen und ähnelt einer ebenen Spirale.
8. Die energiereichen Ionen werden durch das **Feld eines Ablenkkondensators** aus dem Magnetfeld herausgezogen und lösen beim Auftreffen auf ein Target (Zielscheibe) **Kernreaktionen** aus.

Man kann die Teilchenenergie mit einem Zyklotron nicht beliebig steigern, weil die Masse m mit der Teilchengeschwindigkeit zunimmt. Dadurch fallen die Ionen mit der sich ständig ändernden, beschleunigenden Hochspannung außer Takt. Die Grenze der mit einem Zyklotron erreichbaren Energien liegt

für Protonen bei etwa 12 MeV,
für Alphateilchen bei etwa 45 MeV.

A

Das Synchrozyklotron

Mit ihm erreicht man größere Energien der Teilchen, indem man die Frequenz der Beschleunigungsspannung zeitlich ändert und der Massenzunahme anpaßt. Dadurch lassen sich grundsätzlich beliebig hohe Beschleunigungsenergien erreichen. Eine ökonomische Grenze wird durch die Größe des Magneten gegeben.

Die Kernspaltung

Kernspaltungen werden durch schnell bewegte oder thermische Teilchen hervorgerufen. Besonders wirksam sind die Neutronen, da sie von den geladenen Kernen nicht abgestoßen werden.

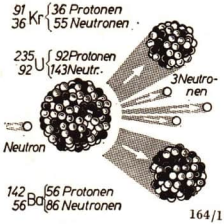
Kernspaltung

(1938 von OTTO HAHN und FRITZ STRASSMANN entdeckt.) Durch Beschuß schwerer Atomkerne mit Elementarteilchen werden diese in zwei nahezu gleich große Teile gespalten, deren Kernladungszahlen den in der Mitte des Periodensystems stehenden Elementen entsprechen. Die Spaltstücke besitzen unmittelbar nach der Spaltung mehr Neutronen, als ihrem stabilen Zustand entspricht. In diesem Falle sind die Spaltstücke **radioaktiv**. Die Spaltstücke senden entweder β-Strahlen aus und gehen in einen stabilen Zustand über, oder sie stoßen die überschüssigen Neutronen direkt aus, die ihrerseits eine Spaltung weiterer Kerne hervorrufen können (Kettenreaktion).

Beispiel

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{91}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{142}_{56}\mathrm{Ba} + 3\left({}^{1}_{0}\mathrm{n}\right)$$

Die Summe der **Kernladungszahlen** der entstandenen Kerne ist **gleich** der Kernladungszahl des gespaltenen Kerns. Die Summe der **Massenzahlen** ist auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung **gleich.**



164/1

Schnelle Neutronen	Langsame Neutronen
Neutronen großer Energie	Neutronen geringer Energie
0,5 MeV $< E <$ 10 MeV	Energie bis zu 1000 MeV **thermische Neutronen** $E \approx 0{,}025$ eV $v \approx 2000\ \mathrm{ms}^{-1}$
Erzeugung durch Beschuß von Li, Be, B und C mit schnellen, im Zyklotron beschleunigten Teilchen. ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$ (d, n) ${}^{10}_{5}\mathrm{B}$ ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$ (d, n) ${}^{8}_{4}\mathrm{Be}$ ${}^{2}_{1}\mathrm{D}$ (d, n) ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$	Erzeugung: Beim Durchgang durch **geeignete Substanzen (Moderatoren)** (schweres Wasser, Beryllium, Graphit oder Paraffin) geben die schnellen Neutronen einen Teil ihrer Energie in elastischen Stößen mit den bremsenden Kernen ab.
${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ und ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$ **sind durch schnelle Neutronen spaltbar.**	${}^{233}_{92}\mathrm{U}$ und ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ **sind durch thermische Neutronen spaltbar.**

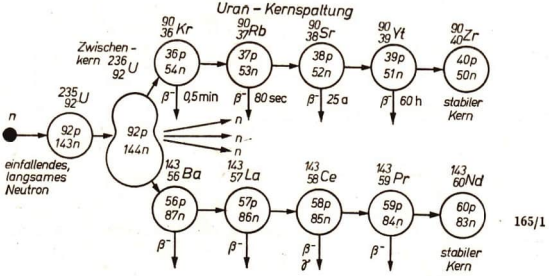
Je geringer die Energie der Neutronen, desto größer ist die Zeit, in der sich die Neutronen in Kernnähe aufhalten, und desto größer die Wahrscheinlichkeit einer Kernreaktion. Bei Neutronenbeschuß von Atomkernen können folgende drei Fälle auftreten:

Das stoßende Neutron

wird elastisch gestreut und gibt einen Teil seiner kinetischen Energie an den gestoßenen Atomkern ab.	**wird eingefangen** vom Atomkern und regt diesen zur Aussendung von Elementarteilchen an.	**spaltet** den Kern, der in zwei nahezu gleich schwere Kerne zerfällt und wobei zwei bis drei Neutronen frei werden.
Anwendung: **Moderator** im Kernreaktor.	**Anwendung:** Erzeugung von $^{233}_{92}U$ und $^{239}_{94}Pu$.	**Anwendung:** Kernreaktor, Kernbombe.

Uran-Kernspaltung

Beim Beschuß von $^{235}_{92}U$ mit langsamen Neutronen wird der Urankern in nahezu zwei gleich schwere Kerne gespalten, die sich nach stufenweiser Aussendung von Betateilchen in stabile Isotope umwandeln.



165/1

Die Transurane

Bei Neutroneneinfang durch Urankerne können in der Natur nicht vorkommende Elemente mit höherer Ordnungszahl als 92 entstehen. Solche Elemente werden **Transurane** genannt, sind alle radioaktiv und haben meist kleine Halbwertszeiten.

A

Beispiel

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \rightarrow ^{239}_{93}Np \rightarrow ^{239}_{94}Pu$$

$$^{239}_{92}U \rightarrow ^{239}_{93}Np: \; +^{0}_{1}e \qquad ^{239}_{93}Np \rightarrow ^{239}_{94}Pu: \; +^{0}_{1}e$$

Plutonium 239 kann durch thermische Neutronen gespalten werden. Bisher sind die Elemente 93 Neptunium (Np), 94 Plutonium (Pu), 95 Amerizium (Am), 96 Kurium (Cm), 97 Berkelium (Bk), 98 Kalifornium (Cf), 99 Einsteinium (Es), 100 Fermium (Fm), 101 Mendelevium (Md), 102 Nobelium (No), 103 Lawrenzium (Lw) dargestellt worden.

Die Kernverschmelzung (Kernfusion)

Durch Verschmelzung von zwei Deuteronen entsteht bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad unter Freisetzung von Kernenergie ein Heliumkern.

Die Fusion von Wasserstoffkernen spielt sich im großen Maßstabe seit Jahrmillionen im Inneren der Sonne ab.

Grundreaktionen

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \rightarrow ^{1}_{1}H + ^{3}_{1}T + 4\,MeV$$

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{3}_{2}He + 3{,}25\,MeV$$

$$^{2}_{1}D + ^{3}_{1}T \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{4}_{2}He + 17{,}6\,MeV$$

frei werdende Energie, bezogen auf den Einzelprozeß

Bedingungen für eine Kernverschmelzung

1. Erzeugung von Temperaturen von einigen Millionen Grad.
2. Aufrechterhaltung dieser hohen Temperaturen.

Bei diesen Temperaturen sind alle Atome in positiv geladene Atomkerne und Elektronen getrennt. Dieses Gemisch der zwei entgegengesetzt geladenen Gase ist nach außen hin praktisch elektrisch neutral und besitzt bemerkenswerte elektromagnetische Eigenschaften (vorzügliche Leitfähigkeit). Ein solches ionisiertes Gas nennt man **Plasma.**

Arbeitsweise

1. Einschließen des Plasmas durch geeignete Magnetfelder zur Verhinderung einer Berührung mit den Wänden.
2. Verstärkung des das Plasma einschließenden Magnetfeldes zur Komprimierung und Erhitzung des Plasmas.

3. Zusammendrängung der Atomkerne mit großer kinetischer Energie zur Überwindung der wechselseitigen Abstoßung.
4. Hinreichend langes Zusammenhalten des Plasmas, damit Kernverschmelzungsreaktionen in Gang kommen und sich aufrechterhalten können.

Energiebilanz bei Kernreaktionen

Kernumwandlungen sind mit Energieumwandlungen verbunden.

Massendefekt

Die Masse eines Atomkernes ist stets kleiner als die Summe der Massen der Protonen und Neutronen im Kern. Die Differenz zwischen der Masse eines Atomkernes und der Summe der Massen der einzelnen Kernbausteine wird als **Massendefekt** Δm bezeichnet.

Man unterscheidet:

endotherme Reaktionen		**exotherme Reaktionen**	
Energie wird zugeführt.		Energie wird frei.	
$M_x + m_x < M_y + m_y$		$M_x + m_x > M_y + m_y$	
Gesamtmasse vor der Reaktion	< Gesamtmasse nach der Reaktion	Gesamtmasse vor der Reaktion	> Gesamtmasse nach der Reaktion

Darin bedeuten

M_x: Masse des beschossenen Kernes

m_x: Masse des aufgeschossenen Teilchens

M_y: Masse des Folgekernes

m_y: Masse des davonfliegenden Teilchens

A

Masse und Energie

Jeder Masse entspricht ein ganz bestimmter Energiebetrag.

▷ $W = m \cdot c^2$

Darin bedeuten

W: Energie

m: Masse

$c = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{ms^{-1}}$ (Lichtgeschwindigkeit)

(ALBERT EINSTEIN; 1879 bis 1955)

Jeder Energieänderung ΔW entspricht eine Massenänderung Δm.
Jeder Massenänderung Δm entspricht eine Energieänderung ΔW.
Masse und Energie sind untrennbar miteinander verknüpft.

Bindungsenergie eines Atomkernes

ist gleich der Arbeit, die man verrichten muß, um den Atomkern in seine Bausteine zu zerlegen.

Zusammenhang zwischen Bindungsenergie und Massendefekt

Zusammenbau eines Atomkernes aus Protonen und Neutronen.	**Zerlegung** eines Atomkernes in Protonen und Neutronen.
Gesamtmasse des Kernes ist **kleiner** als die Summe der Protonen- und Neutronenmassen.	**Vergrößerung der Gesamtmasse des Kernes** über die Summe aus Protonen- und Neutronenmasse hinaus.
Ein **Massendefekt** Δm tritt beim Zusammenbau auf. Eine dem Massendefekt entsprechende **Energie wird abgegeben.**	Eine dem Massendefekt entsprechende **Energie wird zugeführt.**
Bindungsenergie wird frei.	Atomkern zerfällt in seine Bausteine.

Beispiel

Reaktion: ${}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) + \Delta W$

Massenwerte von

${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$:	7,0165 u	${}^{4}_{2}\mathrm{He}$:	4,0028 u
${}^{1}_{1}\mathrm{H}$:	1,0076 u	${}^{4}_{2}\mathrm{He}$:	4,0028 u
	8,0241 u	größer als	**8,0056** u

Massendefekt $\Delta m = 0{,}0185\ u$

Der Massendefekt von 0,0185 u entspricht einer frei werdenden Energie von 17,22 MeV.
Die Kernreaktion verläuft **exotherm.**

Beispiel

Reaktion: $^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He + \Delta W \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$

Massenwerte von				
$^{14}_{7}N$:	14,0037 u		$^{17}_{8}O$:	17,0001 u
$^{4}_{2}He$:	4,0028 u		$^{1}_{1}H$:	1,0076 u
	18,0065 u	kleiner als		**18,0077** u

Massendefekt $\Delta m = -0{,}0012\ u$

Die zugeführte Energie von 1,018 MeV entspricht 0,0012 u. Diese Energie muß zugeführt werden, damit die Umwandlung in Gang kommt.

Die Kernreaktion verläuft **endotherm.**

Energieumsatz bei einer Kernspaltung

Reaktion: $^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{95}_{42}Mo + ^{139}_{57}La + 2\left(^{1}_{0}n\right) + \Delta W$

Massenwerte von				
$^{235}_{92}U$:	235,125 u		$^{95}_{42}Mo$:	94,946 u
$^{1}_{0}n$:	1,009 u		$^{139}_{57}La$:	138,953 u
			$2\left(^{1}_{0}n\right)$:	2,018 u
	236,134 u	größer als		235,917 u

Massendefekt $\Delta m = 0{,}217\ u$

Der Massendefekt von 0,217 u entspricht einer frei werdenden Energie von 192 MeV.

Die Kernreaktion verläuft **exotherm.**

Bei der Spaltung eines Urankernes $^{235}_{92}U$ wird eine Energie von rund 200 MeV frei. Bei Kernreaktionen wird etwa das Millionenfache der Energiebeträge frei wie bei chemischen Reaktionen.

Bei vollständiger Spaltung von etwa 1 kg $^{235}_{92}U$ tritt ein Massendefekt von $\Delta m = 1$ g auf.

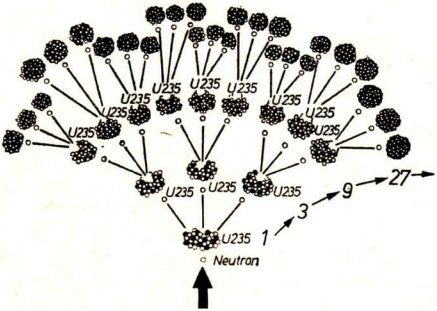
A

Ein Massendefekt von $\Delta m = 1$ g entspricht nebenstehenden Energiewerten	$9 \cdot 10^{13}$ Nm $9 \cdot 10^{13}$ Ws $2 \cdot 10^{10}$ kcal $25 \cdot 10^{6}$ kWh Energiebedarf einer Großstadt von 100000 Haushaltungen in zwei bis drei Monaten
Mengen chemischer Energieträger von gleichem Energieinhalt	2500 t bester Steinkohle mit einem Heizwert von $H = 8000$ kcal/kg (125 Güterwagen mit je 20 t)
	20000 t TNT (TNT: Trinitrotoluol, vielverwendeter Sprengstoff)

Erzeugung und Anwendung der Kernenergie

Die Kettenreaktion

Die bei einer Kernspaltung von $^{235}_{92}U$ entstehenden Neutronen stehen für weitere Spaltungen zur Verfügung. Nimmt man an, daß nach jeder Kernspaltung jeweils drei Neutronen drei weitere Atomkerne spalten, so wächst die Zahl der Kernspaltungen wie die Potenzen von 3: 3, 9, 27, 81, 243, ..., usw.



170/1

Einen solchen sich zur gleichen Reaktion selbständig fortsetzenden Prozeß nennt man **Kettenreaktion.**

Bedingungen für das Zustandekommen einer gesteuerten Kettenreaktion

1. Entfernung aller Beimischungen aus dem Uran, die Neutronen absorbieren.
2. Spaltbares Material muß in genügenden Mengen vorhanden sein, damit die Neutronen nicht wirkungslos entweichen. Die Masse eines spaltbaren Materials, bei der eine Kettenreaktion einsetzt, bezeichnet man als **kritische Masse.** Bei einer Kugel aus reinem $^{235}_{92}U$ beträgt sie etwa 10 kg.
3. Die frei werdenden Neutronen müssen die für die Kettenreaktion notwendigen Geschwindigkeiten haben.
4. Es müssen stets mehr Neutronen bei einer Spaltung frei werden als zu dieser Spaltung geführt haben.

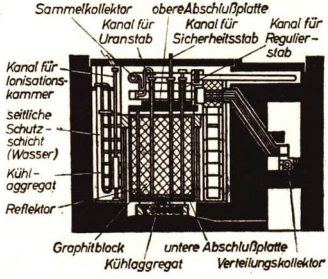
Vergleich zwischen gesteuerter und ungesteuerter Kettenreaktion

Gesteuerte Kettenreaktion	Ungesteuerte Kettenreaktion
Die Zahl der Kernspaltungen je Sekunde kann man steuern und so eine gleichbleibende Energiegewinnung erreichen. Anwendung: Kernreaktor	Die Kernspaltung verläuft ungesteuert, lawinenartig in kürzester Zeit. Sie ruft eine Explosion von ungeheurer Wirkung hervor. Anwendung: Kernbombe

A

Der Kernreaktor

Kernreaktor heißt eine abgeschlossene Anlage, in der eine gesteuerte Kernspaltungs-Kettenreaktion abläuft.



171/1

Aufbau eines Kernreaktors

1. **Spaltbares Material** (Brennstoff) z. B. in Form von Stäben. Universalbrennstoff: $^{233}_{92}U$, $^{235}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$; aber auch natürliches Uran und mit $^{235}_{92}U$ angereichertes Uran.
2. **Konstruktionselemente** zum Halten und Umhüllen des Brennstoffes.
3. **Bremssubstanzen** (Moderatoren) zum Abbremsen der schnellen Neutronen auf die für den Spaltvorgang günstige thermische Geschwindigkeit.
4. **Reflektoren** zur Verringerung der bei der Spaltung nach außen diffundierenden Neutronen.
5. **Regelelemente** (Absorberstäbe) aus Kadmium oder Bor zur Steuerung der Neutronenzahl bei der Kettenreaktion.
6. **Kühlsystem** zur Abführung der durch die Kettenreaktion entstandenen Wärmeenergie (Kühlmittel: gewöhnliches Wasser, schweres Wasser, flüssiges Natrium oder Kohlendioxid).
7. **Strahlenschutzmantel** aus meterdicken Schwerbetonwänden mit zusätzlicher Bleiauskleidung zur Abschirmung der radioaktiven Strahlung und der Neutronenstrahlung.

Wirkungsweise eines Kernreaktors

In einem mit Brennstoff beschickten Reaktor kann die Kettenreaktion eingeleitet werden. Die auftretenden schnellen Neutronen werden durch den Moderator auf die für weitere Kernspaltung günstigen Geschwindigkeiten abgebremst. Vom zentralen Schaltraum aus wird der Neutronenstrom automatisch durch Absorberstäbe geregelt. Die in Form von Wärme frei werdende Energie wird dann weiter verwendet.

Reaktortypen

schneller Reaktor	thermischer Reaktor	Brutreaktor
Spaltung durch schnelle Neutronen	Spaltung durch thermische Neutronen	Erzeugung spaltbaren Materials ($^{233}_{92}U$ oder $^{239}_{94}Pu$)

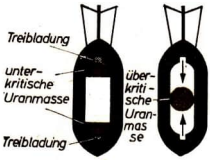
Verwendungszweck der Kernreaktoren

1. Energiereaktoren zur Erzeugung wirtschaftlich verwertbarer Energien (z. B. im Kernkraftwerk).
2. Forschungsreaktoren
   a) als Neutronenquelle für Forschungszwecke,
   b) zur Erzeugung radioaktiver Isotope,
   c) zum Studium der Reaktorphysik.
3. Brutreaktoren zur Erzeugung spaltbaren Materials.

Kernbomben

Die Uranbombe

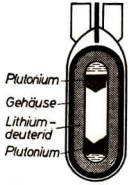
Das voneinander getrennte Spaltmaterial unterkritischer Größe wird zur Auslösung der Kernexplosion durch eine Zündvorrichtung aufeinandergeschossen. Die Menge des spaltbaren Materials ($^{235}_{92}U$ oder $^{239}_{94}Pu$) übersteigt die zur Auslösung der lawinenartig anwachsenden Kettenreaktion notwendige kritische Masse. In 10^{-6} s explodiert die Kernbombe.



173/1

Die Wasserstoffbombe

Durch Zündung einer normalen Uranbombe werden die zur Auslösung des Kernverschmelzungsvorganges notwendigen Temperaturen erreicht. Die Wirkung der H-Bombe beruht auf den bei der Kernverschmelzung frei werdenden Energiemengen.



173/2

A

Anhang

176 Physikalische Größen und Maßeinheiten
177 Arbeit mit Tabellen und grafischen Darstellungen
179 Physikalische Messungen und ihre Auswertung
183 Lösen physikalischer Aufgaben
186 Tabelle der verwendeten physikalischen Größen, Formelzeichen und Maßeinheiten
192 Griechisches Alphabet
192 Umrechnung von Maßeinheiten der Kraft
193 Umrechnung von Maßeinheiten des Druckes
194 Umrechnung von Maßeinheiten der Arbeit bzw. Energie
195 Umrechnung von Maßeinheiten der Leistung
195 Dichte einiger fester Stoffe
196 Dichte einiger Flüssigkeiten und Gase
196 Linearer Ausdehnungskoeffizient einiger Stoffe
196 Raum-Ausdehnungs-Koeffizient einiger Flüssigkeiten
197 Spezifische Wärme einiger fester und flüssiger Stoffe
197 Schmelztemperatur und Schmelzwärme einiger Stoffe
198 Siedetemperatur und Verdampfungswärme einiger Stoffe

Anhang

Physikalische Größen und Maßeinheiten

Physikalische Größen

Wie in jeder anderen Wissenschaft gibt es auch in der Physik zur Beschreibung der Tatsachen bestimmte **Fachbegriffe** (z. B. Weg, Masse, Temperatur, Stromstärke, Energie).

Das Besondere der meisten physikalischen Begriffe ist, daß sie durch bestimmte **Meßverfahren** festgelegt werden und damit eine **quantitative Bedeutung** haben.

▷ **Die durch ein Meßverfahren definierten Begriffe zur Beschreibung physikalischer Vorgänge oder Zustände nennt man physikalische Größen.**

In jedem Teilgebiet der Physik werden nur so viele Größen eingeführt, wie zur eindeutigen Beschreibung nötig sind. Dadurch bleibt die Gesamtzahl der verwendeten Größen relativ gering.

Jede Größe erhält ein **Größensymbol** (Formelzeichen).

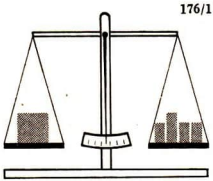
▷ **Die für die einzelnen Größen zu verwendenden Symbole sind durch DDR-Standard festgelegt.**

(↗ S. 187 bis 191)

Zum Kennzeichnen einer physikalischen Größe sind zwei Angaben nötig: Zahlenwert und Maßeinheit.

1. Der **Zahlenwert** der Größe gibt an, wievielmal die Maßeinheit in der zu messenden Größe enthalten ist.
2. Die **Maßeinheit** ist eine Vergleichsgröße gleicher Art.

176/1



Zu messende **physikalische Größe:**	**Maßeinheit:**	**Zahlenwert:**
Masse m des Körpers K	**Vergleichsmasse** m_E des Körpers K_E	$\frac{m}{m_E} = 3{,}5$

▷ **Physikalische Größe ist gleich Zahlenwert mal Maßeinheit.**

Mit physikalischen Größen kann gerechnet werden wie mit Zahlen. Bei jeder Größenangabe sind stets beide Faktoren niederzuschreiben.

	Richtig	Falsch
Fallbeschleunigung	$g = 9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	$g = 9{,}81$
Dichte des Wassers	$\varrho = 1\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$	$\varrho = 1$

Maßeinheiten — Maßsystem

Um die Ergebnisse physikalischer Messungen vergleichen zu können, sind internationale Vereinbarungen getroffen worden, die **für alle Größen einheitliche Maßeinheiten** festlegen (↗ S. 187 bis 192).
Für die Deutsche Demokratische Republik ist die Verwendung dieses international gültigen Einheitensystems seit 1958 Gesetz.

Vielfache und Teile der Maßeinheiten werden durch gesetzlich festgelegte Dezimalvorsätze gekennzeichnet.
(↗ S. 187)

Schreibweise von Maßeinheiten. Soll nicht die Größe selbst, sondern nur ihre Maßeinheit angegeben werden, so kann das **Größensymbol in eckige Klammern** gesetzt werden.

$[m] = 1$ kg (Gelesen: „Maßeinheit der Masse gleich ein Kilogramm“)
$[F] = 1$ N (Gelesen: „Maßeinheit der Kraft gleich ein Newton“)

Arbeit mit Tabellen und grafischen Darstellungen

Tabellen

dienen zur übersichtlichen und zeitsparenden Anordnung gleichartiger Größen, Meßwerte und sonstiger Zahlenangaben.
Tritt bei physikalischen Größen in einer Spalte die gleiche Maßeinheit auf, dann gibt man in der Tabelle nur Zahlenwerte an.
Es gibt zwei Möglichkeiten:

1. Es ist Zahlenwert gleich dem Quotienten aus Größe und Maßeinheit. Dieser Quotient steht im Kopf der Spalte.

A

Beispiel Tabelle zur Bestimmung der unterschiedlichen elektrischen Energie in einem Stromkreis.

Spannung, Stromstärke und Zeit werden gemessen;
die Energie wird berechnet: $W = U \cdot I \cdot t$

Nr.	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{t}{s}$	$\frac{U \cdot I \cdot t}{VAs}$
1.	5	0,5	20	50
2.	5	1,0	10	50
3.	10	0,5	20	100

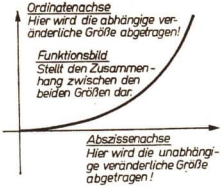
2. Im Kopf der Spalte steht das Formelzeichen der Größe mit Angabe, in welcher Einheit die Größe zu messen ist, z. B. U in V.

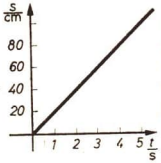
Eine Reihe enthält zusammengehörige Werte verschiedener Größen.

178/1

Grafische Darstellungen

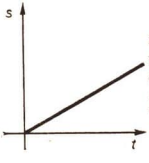
Der Zusammenhang zwischen physikalischen Größen kann mathematisch als Funktion angesehen werden. Er läßt sich auch grafisch darstellen.
Die Beschriftung der Achsen kann auf zwei Arten geschehen:





178/2

Bild der Funktion
$s = v_1 \cdot t$
$v_1 = \text{const} = 20 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$
$[s] = 1\ \text{cm}$ $[t] = 1\ \text{s}$



178/3

Bild
der Funktion
$s = v \cdot t$
$v = \text{const}$

A

Die Kurve wird aus zusammengehörigen Werten der beiden Größen konstruiert. Die Größen haben **bestimmte Maßeinheiten.**
Auf den Achsen werden die entsprechenden Zahlenwerte abgetragen.

B

Die Kurve soll den prinzipiellen Zusammenhang zwischen zwei Größen angeben. Bestimmte Meßwerte mit bestimmten Einheiten liegen nicht vor. Auf den Achsen werden die **Größen** abgetragen.

Physikalische Messungen und ihre Auswertung

Meßverfahren

Physikalische Größen lassen sich nach verschiedenen Methoden messen. Man benutzt dazu **Meßgeräte**. Diese messen die betreffende Größe

direkt	oder	**indirekt**
Beispiel		
(Meßschieber)		(Federwaage)
Gemessen wird eine **Länge**		Gemessen wird eine **Kraft**
Gerät zeigt eine **Länge** an		Gerät zeigt eine **Länge** an
(Abstand der Meßschneiden)		(Längenänderung der Feder)

Direkte Messungen sind selten. Meist werden die zu messenden Größen auf Längenänderungen zurückgeführt (Zeigerausschlag).

Beispiele	Waagen, Manometer.	Thermometer, elektrische Meßgeräte.

Bei jeder indirekten Messung einer Größe muß der **Zusammenhang zwischen gemessener und angezeigter Größe** in Form einer **Gleichung** bekannt sein.

Beispiel Federwaage

Meßgröße: F: Kraft

Anzeigegröße: l: Längenänderung der Feder

Zusammenhang: $F = k \cdot l$

k: Federkonstante

Meßfehler

Messen bedeutet Vergleich der zu messenden Größe mit einer als Maßeinheit gewählten Größe derselben Art. Dieser Vergleich muß mit großer Sorgfalt ausgeführt werden, um ein möglichst **genaues Meßergebnis** zu erhalten.

Bei jeder Messung treten aber **Meßfehler** auf.

Meßfehler	
Systematische Fehler	Durch Eigenschaften der **Meßgeräte** bestimmt. (Ungenaue oder fehlerhafte Eichung; schlechte Justierung usw.)

A

Zufällige Fehler	Entstehen beim **Meßvorgang:** ungenaue Ablesungen, unterschiedliche Geschicklichkeit des Beobachters, Unzuverlässigkeit der menschlichen Sinnesorgane, Störungen durch die Umwelt (Temperaturschwankungen, Erschütterungen). **Die einzelnen Meßergebnisse streuen um einen Mittelwert.**

Um die zufälligen Fehler abzuschätzen, muß man eine Einzelmessung durch eine Meßreihe ersetzen.

Registrierung einer Messung

Um physikalische Messungen bewerten und miteinander vergleichen zu können, müssen Art der Messung und Meßergebnisse registriert werden. Dazu dient ein **Meßprotokoll.**

Inhalt eines Meßprotokolls

1. Aufgabe
2. Versuchsaufbau
3. Angabe des Meßverfahrens
   (Meßgeräte; angewandte Gesetzmäßigkeiten und Gleichungen mit Erklärung der auftretenden Größen.)
4. Messungen
   (Angabe der gemessenen Größen. Ergebnisse von Meßreihen in Tabellenform.)
5. Auswertung
   (Errechnung der zu bestimmenden Größe aus den gemessenen Größen. Deutliche Kennzeichnung von Meßergebnis und Meßfehlern.)

Auswertung einer Messung

1. Anlegen einer dreispaltigen Meßtabelle

Beispiel (Bestimmung des Durchmessers eines Holzzylinders mit einem Meßschieber) (Meßtabelle auf Seite 181 oben)

Spalte 1: Nummer n der Einzelmessung der Meßreihe

Spalte 2: Meßwerte der Einzelmessungen

$$\frac{d_n}{[d]} = \frac{d_n}{\text{mm}}$$

Nr.	$\frac{d_n}{mm}$	$\left\lvert\frac{\Delta d_n}{mm}\right\rvert$
1	11,3	0,03
2	11,2	0,07
3	11,2	0,07
4	11,3	0,03
5	11,4	0,13
6	11,2	0,07
	67,6	0,40

$\bar{d} = 11{,}27\ \text{mm}$ $\quad |\Delta \bar{d}| \approx 0{,}07\ \text{mm}$

$\boldsymbol{d = (11{,}27 \pm 0{,}07)\ \text{mm}}$

$\frac{|\Delta \bar{d}|}{\bar{d}} = \frac{0{,}07\ \text{mm}}{11{,}27\ \text{mm}} = 0{,}0062;$ das entspricht 0,6 %

In der letzten Reihe der Spalte 2 (unter dem Strich) erscheint die Summe der Meßwerte der Einzelmessungen.

Zur Auswertung bildet man den Mittelwert $\bar{d}$ als das arithmetische Mittel aller Einzelmessungen:

Der Mittelwert ist gleich dem Quotienten aus der Summe aller Meßwerte und der Anzahl der Messungen.

Den errechneten Mittelwert schreibt man unter die Meßtabelle in Fortsetzung der Spalte 2.

Spalte 3: Zahlenwerte der absoluten Beträge der Abweichungen jeder Einzelmessung vom errechneten Mittelwert $\left(\left|\frac{\Delta d_n}{mm}\right|\right)$.

Der griechische Buchstabe Δ (lies „Delta"!) ist eine Abkürzung für „Differenz". Er soll andeuten, daß die Abweichung die Differenz zwischen dem Meßwert d_n und dem Mittelwert $\bar{d}$ der Meßreihe ist.

Der **Absolutbetrag** $|\Delta d_n|$ ist die berechnete Abweichung ohne Berücksichtigung des Vorzeichens (Abweichung nach oben oder unten).

In der letzten Reihe der Spalte 3 (unter dem Strich) erscheint die Summe der absoluten Abweichungen.

Zur Auswertung bildet man den Mittelwert $\Delta \bar{d}$ als das arithmetische Mittel aller Abweichungen. Den errechneten Mittelwert $\Delta \bar{d}$ schreibt man unter die Meßtabelle in Fortsetzung der Spalte 3. Dieser Mittelwert heißt durchschnittlicher Fehler.

A

2. Fehlerangaben

Durchschnittlicher Fehler

Er ist der Mittelwert der Einzelabweichungen vom Mittelwert der Meßwerte der Meßreihe.

In Tabelle S. 181 $|\triangle \bar{d}| = 0{,}07$ mm

Der durchschnittliche Fehler gibt das Intervall an, in dem der wirkliche Wert der gemessenen Größe zu finden ist. Das bringt man im Meßergebnis zum Ausdruck.

Im Beispiel S. 181 ist die Meßgröße $d = (11{,}27 + 0{,}07)$ mm

$11{,}20 \text{ mm} < d < 11{,}34 \text{ mm}$

Relativer Fehler

Relativer Fehler ist gleich dem Quotienten aus durchschnittlicher Fehler und Mittelwert der Meßwerte der Einzelmessungen.

Im Beispiel S. 181 $\frac{|\Delta \bar{d}|}{\bar{d}} = \frac{0{,}07 \text{ mm}}{11{,}27 \text{ mm}} = 0{,}0062$, das entspricht 0,6%.

Man gibt den relativen Fehler meist in Prozent an.

Je kleiner der relative Fehler ist, desto genauer ist das Meßergebnis.

Er ist ein Maß für die Genauigkeit einer Messung.

3. Weiterführende Rechnungen

Oft dient die Meßgröße zum Berechnen weiterer Größen, die von der gemessenen abhängig sind.

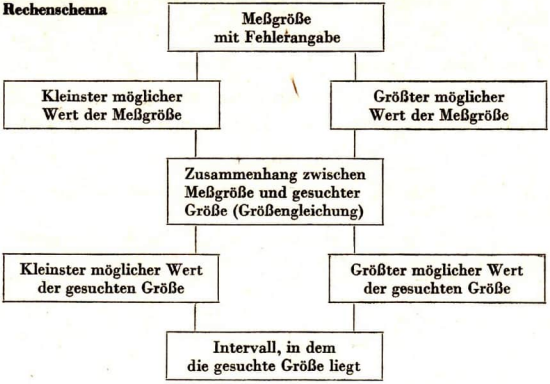
Beispiele

gemessene Größe	gesuchte Größe
Kugeldurchmesser	Volumen
Durchmesser, Höhe, Dichte	Masse eines Zylinders
Spannung, Stromstärke	Elektrische Leistung
Gegenstandsweite, Bildweite	Brennweite einer Linse

In solchen Fällen muß die Meßgröße in eine entsprechende Formel eingesetzt werden.

Auch bei weiterführenden Rechnungen muß der Meßfehler berücksichtigt werden.

Rechenschema



Beispiel Aus der Messung des Durchmessers d eines Zylinders (S. 180) soll die Querschnittsfläche bestimmt werden.

$d = (11{,}27 \pm 0{,}07)$ mm,

$d_1 = (11{,}27 - 0{,}07)$ mm, $d_2 = (11{,}27 + 0{,}07)$ mm;

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 ,$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}(11{,}20)^2 \text{ mm}^2 , \qquad A_2 = \frac{\pi}{4}(11{,}34)^2 \text{ mm}^2 ,$$

$98{,}6 \text{ mm}^2 < A < 101{,}2 \text{ mm}^2$

Ist die gesuchte Größe von **mehreren** Meßgrößen abhängig (z. B. Zylindervolumen), so ist die Rechnung nach dem angegebenen Schema umständlich. Daher sind besondere Methoden der Fehlerrechnung entwickelt worden.

Lösen physikalischer Aufgaben

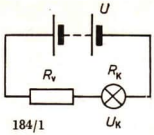
A

1. Aufgabenstellung

Jede physikalische Aufgabe stellt in erster Linie ein physikalisches Problem dar. Man versuche als erstes, dieses zu erfassen.

Dazu fertigt man – wenn möglich – eine **Skizze** an.

Beispiel



184/1

Wie groß muß ein Vorschaltwiderstand sein, wenn durch ein 6-V-Lämpchen mit dem Widerstand von 20 Ohm nur $\frac{2}{3}$ der zulässigen Stromstärke fließen sollen? Die am Kreis angelegte Spannung beträgt 6 Volt.

2. Übersichtliche Zusammenstellung der gegebenen und der gesuchten Größen

Treten verschiedene Werte der gleichen Größe auf, so werden sie durch einen Index am Größensymbol unterschieden.

Gegeben	*Gesucht*
$U = 6\,\mathrm{V}$	R_V
$U_K = 6\,\mathrm{V}$	
$R_K = 20\,\Omega$	
$I = \frac{2}{3} I_K$	

(Index K bezeichnet Kenndaten der Lampe: durch die zulässige Stromstärke bestimmte zusammengehörige Werte von Stromstärke, Spannung und Widerstand.)

3. Eintragung der Größensymbole (ohne Zahlenwerte und Maßeinheiten) in die Skizze

Gegebene und gesuchte Größen werden durch Farbe oder Zeichen unterschieden.

4. Ansatz

Aufsuchen von Größengleichungen, in denen die gesuchten und die gegebenen Größen miteinander verknüpft sind. Umstellen der Größengleichungen nach den gesuchten Größen.

Mehrmalige Anwendung (wenn notwendig) z. B.

in der Aufgabe stehen z. B. **mehrere** gesuchte Größen
oder
in der Größengleichung sind die anderen Größen nicht alle direkt gegeben, sondern **müssen** erst **berechnet werden.**

$\boxed{R = R_V + R_K}$ Größengleichung für Gesamtwiderstand bei Reihenschaltung

Umstellung: $R_V = R - R_K$

(↗ S. 91)

R nicht direkt gegeben. Zu errechnen nach dem Ohmschen Gesetz.

(a) $\boxed{R = \frac{U}{I}}$ (↗ S. 89)

I nicht direkt gegeben. Zu errechnen durch gegebene Bedingung.

(b) $I = \frac{2}{3} \cdot I_K$

I_K nicht direkt gegeben. Zu errechnen aus dem Ohmschen Gesetz, angewandt auf Kenngrößen.

(c) $\boxed{I_K = \frac{U_K}{R_K}}$

> Erfolgt die Lösung durch mehrmalige Anwendung der Ansatzregel (4.), so faßt man alle Gleichungen zusammen, die nur Quotienten und Produkte enthalten.

5. Rechnung

Gleichungen (a), (b), (c) werden zusammengefaßt:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{\frac{2}{3} \cdot I_K} = \frac{U}{\frac{2}{3} \cdot \frac{U_K}{R_K}}$$

(d) $R = \frac{3 \cdot U \cdot R_K}{2 \cdot U_K}$

> Die Größensymbole in den Größengleichungen werden durch die gegebenen Größen (Zahlenwert, Maßeinheit) ersetzt. Beim Ausrechnen gelten für Zahlenwerte wie für Maßeinheiten die aus der Mathematik bekannten Rechenregeln.

$R = 30\,\Omega$

$R_V = 30\,\Omega - 20\,\Omega$

$\boldsymbol{R_V = (30 - 20)\,\Omega = 10\,\Omega}$

> Sind für die gesuchten Größen bestimmte Maßeinheiten verlangt, so werden die entsprechenden Umrechnungsgleichungen benutzt. Diese werden nach den gegebenen Einheiten umgestellt!
> Die gefundenen Werte werden für die gegebenen Maßeinheiten eingesetzt.
>
> Man führe die Umrechnung der Maßeinheiten stets während oder am Schluß der Rechnung aus, niemals schon bei der Aufgabenstellung. Man erspart sich dadurch oft unnötige Rechenarbeit!

A

6. Ergebnis

Das Ergebnis der Aufgabe wird in einem Schlußsatz formuliert.

Man benötigt einen Vorschaltwiderstand von 10 Ω.

7. Proben

Fehler können sich beim Umstellen und Zusammenfassen der Gleichungen und beim Ausrechnen ergeben.

Um die erste Art möglichst auszuschalten, führt man eine **Kontrolle** der Einheiten durch.

In die entsprechende Größengleichung werden nur die Maßeinheiten der auftretenden Größen eingesetzt. Auf beiden Seiten vom Gleichheitszeichen müssen dann gleiche Maßeinheiten stehen! (Notwendige Bedingung für die Richtigkeit einer Größengleichung.)

$$\text{(d)}\ R = \frac{3 \cdot U \cdot R_K}{2 \cdot U_K}$$

$$[R] = \frac{[U] \cdot [R_K]}{[U_K]}$$

$$[R] = 1\,\Omega = 1\,\frac{\text{V}}{\text{A}}$$ (Zahlenwerte werden nicht berücksichtigt)

$$\frac{\text{V}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{V}}{\text{V} \cdot \text{A}} \qquad \frac{\text{V}}{\text{A}} = \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

Zur Feststellung der zweiten Fehlergruppe überlege man – neben den üblichen Rechenproben –, **ob das Ergebnis für das vorliegende physikalische Problem sinnvoll ist.** Dazu schätzt man die Größenordnung des zu erwartenden Ergebnisses ab.

Das Ergebnis der Aufgabe kann nicht sehr weit ab vom Widerstand der Glühlampe liegen, da sich ja auch die Stromstärke nicht sehr viel ändern soll. Errechnete Tausende oder Hundertstel von Ohm deuten auf einen Rechenfehler hin!

Tabelle der verwendeten physikalischen Größen, Formelzeichen und Maßeinheiten

Um das Lesen und Auswerten physikalischer Literatur zu erleichtern, sind auf Grund internationaler Vereinbarungen für die wichtigsten

physikalischen Größen einheitliche Formelzeichen (TGL 0-1304, Januar 1963, Gesetzblatt der Deutschen Demokratischen Republik vom 15. Dezember 1958) und Maßeinheiten eingeführt worden.
Die nachstehende Tabelle ist eine Auswahl aus der TGL 0-1304 und der Tafel der gesetzlichen Einheiten. Es wurden darüber hinaus einige Angaben aufgenommen, die für den Unterricht an der Oberschule notwendig sind.
Das an erster Stelle stehende Formelzeichen ist bevorzugt zu verwenden.
Die Grundgrößen und Grundeinheiten sind halbfett gedruckt.

Vorsatz	Kurzzeichen	Bedeutung
Tera	T	1 000 000 000 000 (10^{12}) Einheiten
Giga	G	1 000 000 000 (10^{9}) Einheiten
Mega	M	1 000 000 (10^{6}) Einheiten
Kilo	k	1 000 (10^{3}) Einheiten
Hekto	h	100 (10^{2}) Einheiten
Deka	da	10 (10^{1}) Einheiten
Dezi	d	0,1 (10^{-1}) Einheiten
Zenti	c	0,01 (10^{-2}) Einheiten
Milli	m	0,001 (10^{-3}) Einheiten
Mikro	μ	0,000 001 (10^{-6}) Einheiten
Nano	n	0,000 000 001 (10^{-9}) Einheiten
Pico	p	0,000 000 000 001 (10^{-12}) Einheiten

Physikalische Größe	Formelzeichen	Maßeinheiten	Kurzzeichen	Beziehung zu Grundeinheiten
Länge Höhe Breite Radius Durchmesser Weg Wellenlänge	*l*, *L* *h*, *H* *b*, *B* *r*, *R* *d*, *D* *s* λ	**Meter**	**m**	**Grundeinheit**
Fläche		Quadratmeter	m^2	$1\ m^2 = 1\ m \cdot 1\ m$
Querschnitt	*A*, *S*, *F*	Ar	a	$1\ a = 10^2\ m^2$
Oberfläche		Hektar	ha	$1\ ha = 10^4\ m^2$

A

Physikalische Größe	Formelzeichen	Maßeinheiten	Kurzzeichen	Beziehung zu Grundeinheiten
ebener Winkel	α, β, γ	rechter Winkel	L	
		Grad	°	$1° = \frac{1\,L}{90}$
		Minute	′	$1' = \frac{1}{60}$
		Sekunde	″	$1'' = \frac{1'}{60}$
Volumen Rauminhalt	V	Kubikmeter Liter	m^3 l	$m^3 = 1\,m \cdot 1m \cdot 1m$ $1\,l = 1{,}000028 \cdot 10^{-3}\,m^3$
Zeit	t, τ, z	**Sekunde**	**s**	**Grundeinheit**
		Minute	min	1 min = 60 s
		Stunde	h	1 h = 3600 s
		Tag	d	1 d = 24 h = 86400 s
Periodendauer (Umlaufdauer, Schwingungsdauer)	T			
Frequenz Umlauffrequenz (Drehzahl, Umlaufzahl)	f, ω, n	Hertz Hertz (Umdrehung je Minute)	Hz Hz	$1\,Hz = 1\,s^{-1}$ $1\,Hz = 1\,s^{-1}$ $(1\,\frac{U}{min} = \frac{1}{60}\,Hz)$
Geschwindigkeit	v, u, w	Meter je Sekunde	$\frac{m}{s}$	$1\,\frac{m}{s} = 1\,m \cdot s^{-1}$
Beschleunigung	a, b	Meter je Sekunde z. Quadrat	$\frac{m}{s^2}$	
Fallbeschleunigung	g			
Masse	m	**Kilogramm** Gramm Tonne	**kg** g t	**Grundeinheit** $1\,g = 10^{-3}\,kg$ $1\,t = 10^3\,kg$

Physikalische Größe	Formelzeichen	Maßeinheiten	Kurzzeichen	Beziehung zu Grundeinheiten
Dichte	ϱ, d	Kilogramm je Kubikmeter	$\frac{kg}{m^3}$	$1 \frac{kg}{m^3} = 1\ kg \cdot m^{-3}$
Kraft	F, P, K	Newton	N	$1\ N = 1 \cdot kg \cdot m \cdot s^{-2}$
		Kilopond	kp	$1\ kp = 9{,}80665\ N$
		Pond	p	$1\ p = 10^{-3}\ kp$
		Dyn	dyn	$1\ dyn = 10^{-5}\ N$
Drehmoment	M, T	Newtonmeter	Nm	
		Kilopondmeter	kpm	$1\ kp \cdot m = 9{,}80665\ Nm$
Druck	p	Newton je Quadratmeter	$\frac{N}{m^2}$	
		Technische Atmosphäre	at	$1\ at = 10^4 \frac{kp}{m^2} = 98\,066{,}5 \frac{N}{m^2}$
		Physikalische Atmosphäre	atm	$1\ atm = 101\,325 \frac{N}{m^2}$
		Torr	Torr	$1\ Torr = \frac{1}{760}\ atm$
Reibungszahl	μ, f			
Arbeit	W, A	Newtonmeter	Nm	$1\ N \cdot m = 1\ J = 1\ W \cdot s = 1\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Energie	W, E	Joule	J	
		Wattsekunde	Ws	$1\ kp \cdot m = 9{,}80665\ N \cdot m$
Wärmemenge	W, Q	Kilopondmeter	kpm	
		Erg	erg	$1\ erg = 10^{-7}\ N \cdot m$
		Kalorie	cal	$1\ cal = 4{,}1868\ N \cdot m$
Leistung	P, N	Watt	W	$1\ W = 1\ N \cdot m/s$
Wirkungsgrad	η			

A

Physikalische Größe	Formelzeichen	Maßeinheiten	Kurzzeichen	Beziehung zu Grundeinheiten
Kelvin-Temperatur (absolute Temperatur)	T, ϑ, Y	**Grad Kelvin**	°K	**Grundeinheit**
Celsius-Temperatur	t, ϑ, y	Grad Celsius	°C	
Wärmemenge (Schmelzwärme, Verdampfungswärme)	W, Q	Einheiten wie bei Arbeit u. Energie		
Innere Energie	u			
Spezifische Wärme	c	z. B. Kalorie je Gramm u. Grad	$\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grd}}$	
Gaskonstante	R	z. B. Newtonmeter je Gramm u. Grad	$\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{K}}$	
Relative Atommasse (Atomgewicht)	A	(Verhältniszahl)		
Relative Molekelmasse (Molekulargewicht)	M	(Verhältniszahl)		
Spezifische Umwandlungswärme	q	z. B. Kalorie je Gramm	$\frac{\text{cal}}{\text{g}}$	
Stromstärke	I	**Ampere**	A	**Grundeinheit**
Spannung	U	Volt	V	$1\,\text{V} = \frac{1\,\text{W}}{1\,\text{A}}$

Physikalische Größe	Formelzeichen	Maßeinheiten	Kurzzeichen	Beziehungen zu Grundeinheiten
Widerstand (Wirkwiderstand)	R	Ohm	Ω	$1\ \Omega = 1\ \frac{V}{A}$
Blindwiderstand	X			
Scheinwiderstand	Z			
Spezifischer Widerstand	ϱ	z. B. Ohm-meter	$\Omega \cdot m$	
Elektrische Ladung	Q, q	Coulomb (Ampere-sekunde)	C	$1\ C = 1\ A \cdot s$
Kapazität	C	Farad	F	$1\ F \doteq 1\ \frac{A \cdot s}{V}$
Induktivität	L	Henry	H	$1\ H = 1\ \frac{V \cdot s}{A}$
Windungszahl	N, w			
Permeabilität	μ			
Lichtgeschwindigkeit	c	Kilometer je Sekunde	$\frac{km}{s}$	
Wellenlänge	λ	Meter Nanometer	m nm	$1\ nm = 10^{-9}\ m$
Brennweite	f	Meter	m	
Bildweite	s'			
Gegenstandsweite	s			
Bildgröße	y'			
Gegenstandsgröße	y			

A

Griechisches Alphabet (Auswahl)

Buchstabe		Name	Wiedergabe in Antiqua		Buchstabe		Name	Wiedergabe in Antiqua	
A	α	Alpha	A	a	N	ν	Ny	N	n
B	β	Beta	B	b	Ξ	ξ	Xi	X	x
Γ	γ	Gamma	G	g	O	o	Omikron	Ŏ	ŏ
Δ	δ	Delta	D	d	Π	π	Pi	P	p
E	ε	Epsilon	Ĕ	ĕ	P	ϱ	Rho	R(h)	r(h)
Z	ζ	Zeta	Z	z	Σ	σ ς	Sigma	S	s
H	η	Eta	Ē	ē	T	τ	Tau	T	t
Θ	ϑ	Theta	Th	th	Y	υ	Ypsilon	Y	y
I	ι	Jota	I	i	Φ	φ	Phi	Ph	ph
K	$\varkappa$	Kappa	K	k	X	χ	Chi	Ch	ch
Λ	λ	Lambda	L	l	Ψ	ψ	Psi	Ps	ps
M	μ	My	M	m	Ω	ω	Omega	Ō	ō

Umrechnung von Maßeinheiten der Kraft

Kraft	N	dyn	kp
1 N	1	10^5	$\frac{1{,}0197}{10}$ $1{,}0197 \cdot 10^{-1}$
1 dyn	$\frac{1}{10^5}$ 10^{-5}	1	$\frac{101{,}97}{10^6}$ $1{,}0197 \cdot 10^{-6}$
1 kp	9,80665	$\frac{9{,}80665}{10^5}$ $9{,}80665 \cdot 10^{-5}$	1

Umrechnung von Maßeinheiten des Druckes

Druck	$\frac{N}{m^2}$	at $\left(\frac{kp}{cm^2}\right)$	atm	Torr	bar (10^3 mbar)
1 $\frac{N}{m^2}$	1	$\frac{1{,}0197}{10^5}$ $1{,}0197 \cdot 10^{-5}$	$\frac{9{,}869}{10^6}$ $9{,}869 \cdot 10^{-6}$	$\frac{7{,}5}{10^3}$ $7{,}5 \cdot 10^3$	$\frac{1}{10^5}$ 10^{-5}
1 at $\left(\frac{1\ kp}{cm^2}\right)$	$9{,}80665 \cdot 10^4$	1	$\frac{9{,}6784}{10}$ $9{,}6784 \cdot 10^{-1}$	$7{,}3556 \cdot 10^2$	$\frac{9{,}80665}{10}$ $9{,}80665 \cdot 10^{-1}$
1 atm	$1{,}01325 \cdot 10^5$	1,0332	1	$7{,}4 \cdot 10^2$	1,01325
1 Torr	$1{,}3332 \cdot 10^2$	$\frac{1{,}36}{10^3}$ $1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1{,}316}{10^3}$ $1{,}316 \cdot 10^{-3}$	1	$\frac{1{,}3332}{10^3}$ $1{,}3332 \cdot 10^{-3}$
1 bar (10^3 mbar)	10^5	1,0197	$\frac{9{,}869}{10}$ $9{,}869 \cdot 10^{-1}$	$7{,}5 \cdot 10^2$	1

Umrechnung von Maßeinheiten der Arbeit bzw. Energie

Arbeit (Energie)	Nm (Ws, J)	kWh	kcal	kpm	MeV
1 Nm (1 Ws, 1 J)	1	$\frac{2{,}778}{10^7}$ $2{,}778 \cdot 10^{-7}$	$\frac{2{,}388}{10^4}$ $2{,}388 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1{,}0197}{10}$ $1{,}0197 \cdot 10^{-1}$	$6{,}242 \cdot 10^{12}$
1 kWh	$3{,}6 \cdot 10^6$	1	$8{,}598 \cdot 10^2$	$3{,}671 \cdot 10^5$	$2{,}247 \cdot 10^{19}$
1 kcal	$4{,}1868 \cdot 10^3$	$\frac{1{,}163}{10^3}$ $1{,}163 \cdot 10^{-3}$	1	$4{,}269 \cdot 10^2$	$2{,}613 \cdot 10^{16}$
1 kpm	9,80665	$\frac{2{,}724}{10^6}$ $2{,}724 \cdot 10^{-6}$	$\frac{2{,}342}{10^3}$ $2{,}342 \cdot 10^{-3}$	1	$6{,}121 \cdot 10^{13}$
1 MeV	$\frac{1{,}602}{10^{13}}$ $1{,}602 \cdot 10^{-13}$	$\frac{4{,}45}{10^{20}}$ $4{,}45 \cdot 10^{-20}$	$\frac{3{,}826}{10^{17}}$ $3{,}826 \cdot 10^{-17}$	$\frac{1{,}634}{10^{14}}$ $1{,}634 \cdot 10^{-14}$	1

Umrechnung von Maßeinheiten der Leistung

Leistung	kW	$\frac{\text{kcal}}{\text{s}}$	$\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	PS
1 kW	1	$\frac{2{,}388}{10}$ $2{,}388 \cdot 10^{-1}$	$1{,}0197 \cdot 10^{2}$	1,359
$1\ \frac{\text{kcal}}{\text{s}}$	4,1868	1	$4{,}269 \cdot 10^{2}$	5,692
$1\ \frac{\text{kpm}}{\text{s}}$	$\frac{9{,}80665}{10^{3}}$ $9{,}80665 \cdot 10^{-3}$	$\frac{2{,}342}{10^{3}}$ $2{,}342 \cdot 10^{-3}$	1	$\frac{1{,}333}{10^{2}}$ $1{,}333 \cdot 10^{-2}$
1 PS	$\frac{7{,}355}{10}$ $7{,}355 \cdot 10^{-1}$	$\frac{1{,}757}{10}$ $1{,}757 \cdot 10^{-1}$	$7{,}5 \cdot 10$	1

Dichte einiger fester Stoffe

Stoff	ϱ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Stoff	ϱ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Stoff	ϱ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Aluminium	2,70	Graphit	2,2	Nickel	8,85
Barium	3,65	Gummi, roh	0,94	Osmium	22,48
Bernstein	1,0	Harz	1,07	Platin	21,4
Blei	11,34	Iridium	22,4	Porzellan	2,3
Braun-		Kalium	0,86	Selen	4,80
kohle	≈ 1,3	Kobalt	8,8	Silber	10,50
Bronze		Koks	1,4	Stahl	≈ 7,85
(Cu + Sn)	≈ 8,7	Kork	≈ 0,2	Steingut	1,5
Chrom	7,19	Kreide	2,2	Stein-	
Diamant	3,5	Kupfer	8,93	kohle	≈ 1,3
Eis	0,9	Leder,		Titan	4,50
Eisen,		trocken	0,9	Uran	19,16
rein	7,86	Magnesium	1,74	Wismut	9,80
Grauguß	7,25	Mangan	7,21	Wolfram	19,1
Glas	≈ 2,5	Marmor	2,6	Zink	7,12
Glimmer	2,9	Messing	≈ 8,3	Zinn	7,28
Gold	19,3				

A

Dichte einiger Flüssigkeiten und Gase

(bei 0 °C und 760 Torr)

Flüssigkeit	ϱ in $\frac{g}{cm^3}$	Flüssigkeit	ϱ in $\frac{g}{cm^3}$	Gas	ϱ in $\frac{g}{cm^3}$
Äther	0,72	Schwefel-		Helium	0,0001785
Äthanol	0,79	säure 50%	1,40	Kohlen-	
Benzin	0,70	100%	1,83	dioxid	0,0019768
Benzol	0,88	Seewasser	1,02	Luft	0,0012928
Glyzerin	1,26	Spiritus	0,83	Sauer-	
Petroleum	0,85	Wasser bei		stoff	0,0014290
Quecksilber	13,59	10 °C	0,9997	Stickstoff	0,0012505
		Wasser bei		Wasser-	
		4 °C	1,0000	stoff	0,0008899

Linearer Ausdehnungskoeffizient einiger Stoffe

(zwischen 0 °C und 100 °C)

Stoff	Linearer Ausdehnungskoeffizient α in $\frac{1}{grd}$	Stoff	Linearer Ausdehnungskoeffizient α in $\frac{1}{grd}$
Aluminium	0,000023	Zinn	0,000027
Beton, Stahl	0,000012	Quarzglas	0,000001
Eisen	0,000012	Handelsglas	0,000011
Konstantan	0,000015	Jenaer Normal-	
Kupfer	0,000016	glas	0,000008
Messing	0,000019	Jenaer Thermo-	
Platin	0,000009	meterglas	0,000006
Zink	0,000036		

Raum-Ausdehnungs-Koeffizient einiger Flüssigkeiten

Flüssigkeit	β in $\frac{1}{grd}$	Flüssigkeit	β in $\frac{1}{grd}$
Äthanol	0,00110	Petroleum	0,00096
Äther	0,00162	Quecksilber	0,00018
Benzol	0,00106	Wasser	0,00018

Spezifische Wärme einiger fester und flüssiger Stoffe

Stoff	Spezifische Wärme c in $\frac{cal}{g \cdot grd}$	Stoff	Spezifische Wärme c in $\frac{cal}{g \cdot grd}$
Wasser	1	Eis (bei 0 °C)	0,50
Äthanol (bei 0 °C)	0,57	Glas, Jenaer	0,20
Äther (bei 0 °C)	0,56	Holz (Fichte)	0,45
Quecksilber	0,03	Aluminium	0,22
Benzol	0,41	Blei	0,03
Maschinenöl (bei 18 °C)	0,40	Eisen	0,11
Petroleum (bei 18 °C)	0,50	Kupfer	0,09
Asphalt	0,19	Platin	0,03
Beton, Stahl	0,22	Silber	0,06
		Silizium	0,018
		Zink	0,09
		Ziegelstein	0,23

Schmelztemperatur und Schmelzwärme einiger Stoffe

Stoff	Schmelztemperatur t_s in °C Luftdruck 760 Torr	Schmelzwärme q_s in $\frac{kcal}{kg}$
Aluminium	660	95
Blei	327	6
Eis	0	79,7
Eisen	1535	65
Kupfer	1083	49
Nickel	1453	71
Platin	1773	24
Quecksilber	– 39	2,7
Silber	960	25
Wolfram	3350	46
Zink	419	25
Zinn	232	14

A

Siedetemperatur und Verdampfungswärme einiger Stoffe

Stoff	Siedetemperatur in °C Luftdruck 760 Torr	Verdampfungswärme q_v in $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
Äther	35	86
Ammoniak	– 33	327
Äthanol	78	201
Benzol	80	94
Luft	– 193	47
Quecksilber	357	68
Sauerstoff	– 183	51
Schwefeldioxid	– 10	96
Stickstoff	– 196	48
Wasser	100	539
Wasserstoff	– 253	112

Sachwortverzeichnis

Größengleichungen

Mechanik

Bewegungslehre

		Seite
Geschwindigkeit	$v = \frac{s}{t}$	7
Gleichmäßig beschleunigte Bewegung (Beschleunigung)	$a = \frac{v - v_0}{t}$	9
Weg-Zeit-Gesetz der beschleunigten Bewegung	$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$	10
Freier Fall	$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$,	10
	$v = g \cdot t$	10
Senkrechter Wurf nach oben	$s = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$	11
Senkrechter Wurf nach unten	$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$	11
Umlauffrequenz	$n = \frac{1}{T}$	12
Bahngeschwindigkeit	$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$	13

Kräftegleichgewicht bei ruhenden Körpern

Druck	$p = \frac{F}{A}$	14

S

		Seite
Standfestigkeit	$F = \frac{G \cdot d}{S}$	17

Kraft und Bewegung

Kraft	$F = m \cdot a$	18
Reibungskraft	$F_R = \mu \cdot F_N$	20
Zentripetalbeschleunigung	$a_p = \frac{v^2}{r}$	21
Zentripetalkraft	$F_p = m \cdot \frac{v^2}{r}$	21
Gravitationsgesetz	$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	22

Energie

Arbeit	$W = F \cdot s$	23
Leistung	$P = \frac{W}{t}$	23
Lageenergie (potentielle Energie)	$W_{pot} = G \cdot s$	24
Bewegungsenergie (kinetische Energie)	$W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$	24
Erhaltung der mechanischen Energie	$W_{pot} + W_{kin} = \text{const}$	25
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{P_e}{P_i}$	25

Einfache kraftumformende Einrichtungen

Hebelgesetz	$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$	25
Kraft an der losen Rolle	$F_1 = \frac{F_2}{2}$	27
Kraft am Flaschenzug	$F_1 = \frac{F_2}{n}$	27
Kraft am Wellrad	$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$	27

		Seite
Drehmomentensatz	$M_1 + M_2 + \ldots M_n = 0$	28
Übersetzungsverhältnis	$i = \frac{n_1}{n_2}$	29
Steigung an der geneigten Ebene	$k = \frac{h}{l}$	30
Hangabtriebskraft	$\frac{F_H}{F} = \frac{h}{l}$	30

Ruhende Flüssigkeiten und Gase

Kolbendruck	$p = \frac{F}{A}$	33
Schweredruck	$p = h \cdot \varrho \cdot g$	34
Boylesches Gesetz	$p_1 \cdot V_1 = \text{const}$	35
Auftrieb	$F_A = G_{Fl}$,	
	$F_A = V_k \cdot \gamma_{Fl}$,	
	$F_A = V_k \cdot \varrho_{Fl} \cdot g$	36

Wellen

Wellenausbreitung	$c = \lambda \cdot f$	46
Brechungsverhältnis	$n = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	47

Wärmelehre

Struktur der Körper — Temperatur

Absolute Temperatur eines Gases	$T \sim \frac{m}{2} \cdot v^2 = W_{kin}$	53

Ausdehnung der Körper bei Temperaturänderung

Lineare Ausdehnung von Festkörpern	$l_1 = l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$	56

S

		Seite
Kubischer Ausdehnungskoeffizient	$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta t}$	56
Gay-Lussacsche Gesetze	$V_1 = V_0 (1 + \gamma \cdot \Delta t)$ $(p = \text{const}, t_0 = 0\,°\text{C})$,	57
	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (p = \text{const})$,	57
	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	58
Allgemeine Zustandsgleichung der Gase	$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$	58
Gaskonstante	$R = \frac{p_0 \cdot V_0}{m \cdot T_0}$	59

Wärmemenge und spezifische Wärme

Wärmemenge	$W = c \cdot m \cdot \Delta t$	60
Spezifische Wärme	$c = \frac{W}{m \cdot \Delta t}$	61

Änderung des Aggregatzustandes

Schmelzwärme	$q_s = \frac{W_s}{m}$	64
Verdampfungswärme	$q_v = \frac{W_v}{m}$	65

Elektrizitätslehre

Elektrische Ladung

Ladung	$Q = I \cdot t \quad (I \text{ const})$	74

Elektrische Felder

Ladung des Kondensators	$Q = C \cdot U$	76

Seite

Das Ohmsche Gesetz — Der Widerstand

Ohmsches Gesetz (für Gleichstrom)	$R = \frac{U}{I}$,	
	$I = \frac{U}{R}$,	
	$U = I \cdot R$	89
Spezifischer Widerstand	$\varrho = \frac{R \cdot A}{l}$	90

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

Reihenschaltung	$U = U_1 + U_2$,	90
	$I = I_1 = I_2$,	91
	$R_{ges} = R_1 + R_2$	91
Parallelschaltung	$U = U_1 = U_2$,	90
	$I = I_1 + I_2$,	91
	$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	91
Leistung	$P = I \cdot U$	93

Elektrische Arbeit und Energie

Arbeit	$A = P \cdot t$	93

Induktion — Induktivität

Induktionsgesetz	$U_{ind} = -\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t}$	96
Induzierte Spannung	$U_{ind} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	97
Induktivität einer Spule	$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot N^2 \frac{A}{l}$	98

Anwendung der elektromagnetischen Induktion

Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis	$R = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	100

S

		Seite
Induktiver Widerstand	$X_L = \omega L = 2\pi f L,$	
	$X_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	100
Kapazitiver Widerstand	$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C},$	
	$X_C = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	100
Scheinleistung	$P_S = U_{eff} \cdot I_{eff}$	102
Wirkleistung	$P_W = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi$	102
Scheinarbeit	$W_S = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot t$	102
Wirkarbeit	$W_W = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot t \cdot \cos\varphi$	102
„Verlustloser" Transformator	$P_1 = P_2,$	
	$U_{1eff} \cdot I_{1eff} = U_{2eff} \cdot I_{2eff}$	
	$(\cos\varphi_1 \approx \cos\varphi_2)$	104

Elektromagnetische Schwingungen im geschlossenen Schwingkreis

Thomsonsche Gleichung	$T = 2\pi\sqrt{LC}$	108

Optik

Lichtgeschwindigkeit	$c = \lambda \cdot \nu$	124

Reflexion an Spiegeln

Brennweite sphärischer Spiegel	$f = \frac{r}{2}$	128
Abbildungsgleichung für gekrümmte Spiegel (gilt nur für achsennahe Strahlen)	$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$	129

Brechung des Lichtes

Snelliussches Brechungsgesetz	$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$	131

		Seite
Grenzwinkel der Totalreflexion	$\sin \alpha_g = \frac{1}{n}$	132

Brechung an Linsen

Abbildungsgleichung für Linsen	$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$	135

Atomphysik

Der Bau der Atome

Atomkernradius	$R = R_0 \sqrt[3]{A}$	148

Die Radioaktivität

Zerfallsgesetz	$N = N_0 e^{-\lambda t}$	153

Energiebilanz bei Kernreaktionen

Masse und Energie	$E = m \cdot c^2$	167

S

Sachwörter

Abbildungs-gleichung 129, 134
—maßstab 135
Absorberstäbe 172
Absorptionsspektrum 144
Abstoßung 82
Achse, optische 128
Adhäsion 31
Aero-dynamik 32
—statik 32
Aggregatzustand 63
Akkumulatoren 86
Allgemeine Zustandsgleichung d. Gase 58
Alphastrahlen 152
Ampere 191
Amplitude 41
—nmodulation 109
Angriffspunkt 15
Anode 115
Anziehung 82
Arbeit 22
—, elektrische 93
—, Gesetz von der Erhaltung der 23
Archimedisches Gesetz 35
Asynchronmotor 106
Atom 52, 148
—bau, Übersicht 148
—kernradius 148
—modell 149
Aufdruckkraft 34
Auftrieb 35
—, dynamischer 39
—skraft, dynamische 39
Ausbreitung, geradlinige 125
—sgeschwindigkeit 45
Ausdehnung, kubische 56
—, lineare 56
—skoeffizient 56
Ausschlag 41
Außenpolmaschine 105

Bahn-geschwindigkeit 12
—linie 37
Berührungsspannung 122
Bestrahlungsverfahren 157
Betastrahlen 152
Beugung 138
—sspektrum 143
Bewegung, aperiodische 42
—, Brownsche 53
—, gleichförmige, geradlinige 7
—, gleichmäßig beschleunigte 9
—, krummlinige 12
—, periodische 40
—, Weg-Zeit-Gesetz der beschleunigten 9
—sarten 7
—senergie 24
—slehre 6
Bild, optisches 126
—, reelles 126, 128
—, virtuelles 126, 129
—entstehung 125, 128, 132
—konstruktion 133
—werfer 138
Bindungsenergie 168
Bleiakkumulator 85
Bodendruckkraft 34
Boylesches Gesetz 35, 58
Brechung 131
—sgesetz 131
—sgesetz, Snelliussches 131
—sverhältnis 47
Brechzahlen 131
Brenn-punkt 128
—punktstrahlen 128
—weite 128
Bremssubstanzen 172

Celsius-Temperatur 53

Dampf-kraftmaschinen 68
—turbinen 68
Darstellungen, grafische 178
Dauermagnete 81
Diaskop 138
Dichte 34, 36
Dieselmotoren 69
Diffusion 53
—skammer 158
Diode 115
Dipol 109
Dispersion 141
—sspektrum 143
Doppelschlußgenerator 106
—motor 107
Dosimeter 158
Dreh-bewegung 6
—eisengerät 87, 88
—moment 28
—momentensatz 27
—spulgerät 87, 88
—strom 102
Drei-eckschaltung 103
—eckspannung 103
—phasenstrom 102
—phasen-Synchronmotor 105

Drei-phasentransformator 104
—phasen-Wechselstromgenerator 105
Druck 13
—, hydrostatischer 34
—, statischer 38
—ausbreitung 33
—kraft 13
Durch-dringungsfähigkeit 145
—laßrichtung 121
—strahlungsverfahren 157
Dynamik 18
—, Grundgesetz der 18

Ebene, geneigte 30
Echo 50
—lot 50
Effekt, äußerer lichtelektrischer 118
—, glühelektrischer 115
—ivwert 99
Eigen-leitung 120
—schwingungen 42
Einfallswinkel 47, 127
Einphasen-Synchronmotor 105
—transformator 104
—Wechselstromgenerator 105
Eisen im Magnetfeld 82
Elektrolyt 82
—lösung 83
Elektronen-emission 115
—gas 119
—zahl 149
Elementarladung 148
Elemente, galvanische 86
Elongation 41
Eloxalverfahren 84
Emissionsspektrum 144
Empfänger 110
Endicon 110
Energie 22, 167
—, elektrische 94
—, Gesetz von der Erhaltung der mechanischen 25
—, innere 59
—, kinetische 24
—, mechanische 24
—, potentielle 24
—, Satz von der Erhaltung der 66
—umsatz 169
—umwandlungen 66, 95
Entladevorgang 85
Entladung, selbständige 112
—, unselbständige 112
Episkop 138
Ergänzungsfarben 142
Erstarren 63
Erstarrungstemperatur 63
Erwärmung fester Leiter 78

Fall, freier 10
—beschleunigung 10
—geschwindigkeit 10
—weg 10
Farbmischung, additive 143
—, subtraktive 143
Fehler, durchschnittlicher 182
—, relativer 182
—, systematischer 179
—, zufälliger 180
Feld, elektrisches 74
—, magnetisches 80
—linien, elektrische 75
—linien, magnetische 80
—linienbilder 75, 80
Fernrohr, astronomisches 136
—, galileisches 136
—, holländisches 136
Fernseh-empfänger 110
—sender 110
Festkörper 52
Flaschenzug 26
Flüssigkeiten 52
—, elektrolytische 82
Flüssigkeitspumpen 37
Formelzeichen 187
Fotokatode 119
Frequenz 41
—modulation 109

Galvano-plastik 84
—stegie 84
—technik 84
Gammastrahlen 152
Gangunterschied 45
Gas, ideales 57
—, reales 57
—, ruhendes 34
—, allgemeine Zustandsgleichung der 58
—entladung 112
—konstante 59
—turbinen 69
Gay-Lussacsche Gesetze 57, 58
Gefäße, verbundene 32
Gegenwirkungsprinzip 19
Geiger-Müller-Zählrohr 158
Generatoren 104
Geräusch 50
Gesamt-spannung 91
—vergrößerung 137
Geschwindigkeit 7
—en, Zusammensetzung von 8
Gesetz, Archimedisches 35
—, Boylesches 35
— von der Erhaltung der Arbeit 23
—e, Keplersche 21
Gewicht 13, 20
Gleichgewicht, indifferentes 17
—, labiles 17
—, stabiles 17
—slagen 16
Gleichstromgenerator 106

S

Gleichstrom-maschinen 106
—motor 106
Gleichung, Thomsonsche 108
Gleitreibung 19
Glimm-entladung 112
—lampe 113
Grad Kelvin 190
Gravitation 21
—sgesetz 22
Grenzwinkel 132
Größe, physikalische 175, 187
—n, vektorielle 14
—symbol 176
Grund-einheit 187
—zustand 150

Haarröhrchen 32
Haftreibungskraft 19
Halbleiter 119
—gleichrichter 120
Halb-schatten 125
—wertszeit 153
Hangabtriebskraft 30
Hauptleiter 103
Hauptsatz der Wärmelehre 60
Hebel 25
—, Einteilung der 26
—gesetz 25
Höhenstrahlung 156
Hohlspiegel 127, 128
Huygenssches Prinzip 46
Hydro-dynamik 32
—statik 32

Ikonoskop 110
Induktion, elektromagnetische 95
—sgesetz 96
—sspannung 96
Induktivität 97
— einer Spule 98
Innenpolmaschine 105
Interferenz 48, 138
—erscheinung 139
Ionen 82
—, negative 83
—, positive 83
—strom 83
Ionisationskammer 158
Isotope 154
—ntrennung 155

Käfigläufer 105
Kamera, fotografische 137
Kapillarität 32
Katode 115
—nstrahlen 114
—nstrahlröhre 118
Keil 30
—winkel 30
Kelvin-Temperatur 53, 190
Keplersche Gesetze 21
—s Fernrohr 136
Kern-bomben 173
—fusion 166
—kräfte 160
—ladung 159
—ladungszahl 149
—reaktionen 159, 160
—reaktor 171
—schatten 125
—spaltung 164
—umwandlungen 153, 162
—verschmelzung 166
Kettenreaktion 170
—, gesteuerte 171
—, ungesteuerte 171
Kilogramm 188
Kinematik 6
Kippmoment 17
Klang 50
Knall 50
Kohäsion 31
Kolben-dampfmaschinen 68
—druck 33
—druckkraft 33
Kommutator 106
Komplementärfarben 142
Kondensationstemperatur 65
Kondensator 76
Kondensieren 65
Kondensor 138
Konkav-linsen 132
—spiegel 128
Konvektion 62
Konvex-linsen 132
—spiegel 127
Kopplung, induktive 108
Körper, elektrische 72
—, starrer 6
—, Struktur der 52
—farben 142
Kraft 13
—übertragung 28
Kräfte, parallele 15
—gleichgewicht 13
—zerlegung 16
Kreis-bewegung 12
—frequenz 99
Krümmungs-mittelpunkt 128
—radius 128
Kugelspiegel 127
Kurbel 27
Kurzzeichen 187

Ladevorgang 85
Ladung 148
—, elektrische 72
—sausgleich 74
—snachweis 73
—strennung 72
Lagenenergie 24
Länge 187
—nzunahme 56
Längswelle 44
Leistung 23
—, effektive 25
—, elektrische 93
—, indizierte 25
Leiter im Magnetfeld 81
Leitung 62
Leucht-röhre 113
—stofflampe 113
Licht, kohärentes 139
—bogen 78
—bündel 125
—geschwindigkeit 124
—quellen 124

Lichtstrahlen 125
Linienspektrum 144
Linsen 132
Longitudinalwelle 44
Lösungsneigung 83
Luftdruck 35
Lupe 135

Mangelleitung 120
Markierungsverfahren 157
Masse 18, 159, 167, 188
—, kritische 171
Massen-defekt 167
—einheit, atomare 160
—mittelpunkt 16
—punkt 6
—spektrograf 155
—spektrum 155
Maß-einheit 176, 187
—system 177
Material, spaltbares 172
Meißnersche Rückkopplungsschaltung 108
Meß-bereichserweiterung 91
—fehler 179
—geräte 93
—protokoll 180
—verfahren, physikalische 179
Metallatome 119
Meter 187
Mikroskop 137
Mischelemente 154
Mittel-punkt, optischer 128
—punktleiter 103
—punktstrahlen 128
Moderatoren 164
Modulation 109
Moleküle 52
Mondfinsternis 125
Motoren 105

Nachrichtenübermittlung, drahtlose 109
Nebelkammer, Wilsonsche 158
Nebenschluß-generator 106
—motor 107
Neutronen, langsame 164
—, schnelle 164
Newtonsche Prinzipien 18, 19
n-Leitung 120
Normalkraft 20
Nuklid 159

Objektiv 136
Oerstedversuch 79
Öffnungswinkel 128
Ohmsches Gesetz (für Gleichstrom) 89
Okular 136
Ordnungszahl 149
Oszillatoren 44

Parabolspiegel 127
Parallel-schaltung 90
—strahlen 128
Pendelschwingungen 41
Periode 41
Permeabilität 96
Perpetuum mobile 67
Phase 41, 45
—nwinkel 99
p-Leitung 120
p-n-Übergang 120
Polarisation 140, 141
—sfilter 141
Positron 156
Positronenstrahlen 152
Primärspule 104
Prinzip, dynamoelektrisches 106
—, Huygenesches 46
—ien, Newtonsche 18, 19
Projektionsapparate 138
Protonenzahl 149

Querwelle 44

Radaranlagen 111
Radioaktivität 151
—, künstliche 156
Reaktionen, endotherme 167
—, exotherme 167
Reaktortypen 172
Rechenschema 183
Rechte-Faust-Regel 80
Reflexion 126
—, diffuse 126
—, regelmäßige 126
—sgesetz 47, 127
—swinkel 47, 127
Regel, Lenzsche 95
—elemente 172
Reibung 19
—skoeffizienten 20
Reihen-schaltung 90
—schlußgenerator 106
—schlußmotor 107
Resonanz 42
Rolle 26
—, feste 26
—, lose 27
Rollreibung 19
Röntgenstrahlen 144
Rotation 6
Rückkopplungsschaltung, Meißnersche 108
Rückkraft 30
Ruhmasse 148

Sammellinsen 132
Schalenaufbau 151
Schall-arten 50
—ausbreitung 49
—entstehung 49
—quellen 49
—verstärkung 50
Schatten 125
Schein-leistung 102
—widerstand 101
Scheitel-spannung 98
—stromstärke 98
Schlupf 105
Schmelz-en 63
—flußelektrolyse 84
—temperatur 63
—wärme 63

S

M W E O A A

Schraube 30
Schwer-druck 34
—punkt 16
Schwingkreis 109
—, elektrischer 107
Schwingung 40, 99
—, elastische 41
—, gedämpfte 42
—, mechanische 40
—, ungedämpfte 42
—en, elektromagnetische 107
—en, erzwungene 42
—en, gedämpfte elektromagnetische 108
—sanzahl 41
—sdauer 41
—sweite 41
Sehwinkel 135
Seitendruckkraft 34
Sekundär-emission 112
—spule 104
Sekunde 188
Selbstinduktion 96
Selenflächengleichrichter 121
Sender 109
Siedetemperatur 64
Snelliussches Brechungsgesetz 131
Sonnenfinsternis 125
Spannungs-messer, statischer 88
—meßgerät 88
—reihe, elektrochemische 85
—teilerschaltung 91
—waage 88
Spektren 143
Spektralfarben 142
Spektrum, elektromagnetisches 111
—, kontinuierliches 144
Sperrichtung 121
Spiegel, asphärischer 127
—, ebener 126
—, gekrümmter 127
—, sphärischer 127
Stand-festigkeit 17
—moment 17
Steigung 30
Stern-schaltung 103
—spannung 103
Steuergitter 117
Störstellenleitung 120
Stoßionisation 112
Strahlenschutzmantel 172
Strahlung 62
—, radioaktive 152
Stromlinie 37
—nbild 37
Stromstärke 87, 191
—meßgeräte 87
Strömung 62
—, stationäre 37
—sgeschwindigkeit 38
—squerschnitt 38
—swiderstand 38
Synchronmotor 105
Synchrozyklotron 163
Szintillationszähler158

Tabellen 177
Teilspannung 91
Temperatur 53
—messung durch Ausdehnung 54
—messung, elektrische 55
—meßgeräte 54
Thermo-diffusion 156
—element 122
—meter 54
—spannung 122
—strom 122
Thomsonsche Gleichung 108
Ton-höhe 50
—stärke 50
Totalreflexion 132
Trägheitssatz 18
Trans-formator 104
—lation 6
—istor 121
—urane 166
—versalwelle 44
Triode 117
Über-schußleitung 120
—setzungsverhältnis 29
Uran-bombe 173
—Kernspaltung 165

Verarmungszone 120
Verbrennungskraftmaschinen 68
Verdampfen 64
Verdampfungswärme 65
Verdunsten 65
Vier-leitersystem 103
—takt-Ottomotoren69

Wangenkraft 30
Wärme, spezifische 61
—kraftmaschinen 67
—lehre, Hauptsatz der 60
—menge 59
Wasserstoffbombe 173
Wechselstrom 98
—, Arbeit des 102
—, Kenngrößen des 98
—, Leistung des 102
—kreis, Widerstände im 99
—maschinen 104
Wellen 44
—, Beugung von 48
—, Brechung von 47
—, elektromagnetische 109
—, Reflexion von 47
—, Überlagerung von 48
—ausbreitung, Gesetz der 46
—berg 46
—länge 45
—normale 47
—tal 46
Wellrad 26
Werkstoffe, magnetische 82
Widerstand 89
—, induktiver 100
—, kapazitiver 100

Widerstand, spezifischer 90
Wilsonsche Nebelkammer 158
Wirbelströme 96
Wirkleistung 102
Wirkungs-grad 25, 67
—linie 14
Wölbspiegel 127, 129
Wurf 11

Zahlenwert 176
Zeit 188
Zentripetal-beschleunigung 20
—kraft 20
Zerfall, radioaktiver 153
—sgesetz 153
—sreihen 154
Zerstreuungslinsen 132
Zwischenbild 136
Zyklotron 162

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen angefertigt von Fritz Hampel, Hangelsberg, und Ingrid Schäfer, Berlin.

S

Galvanische Spannungsquelle

Spannungsquelle mit 20 V

Spannungsquelle
(mehrere Elemente)

Wechselstrom

Gleichstrom

Leitungskreuzung

Leitungsabzweigung

Schalter

Buchse und Stecker

Steckdose

Galvanometer

Elektrometer

Spannungsmesser

Stromstärkemesser

Phasenverschiebungsmesser

Wattstundenzähler

Gleichstromgenerator

Wechselstromgenerator

Gleichstrommotor

Wechselstrommotor

Schmelzsicherung

Widerstand

Heizgerät

Widerstand, verstellbar

Spannungsteiler

Widerstand mit Anzapfungen

Induktiver Widerstand

Induktiver Widerstand
mit Eisenkern

Transformator

Transformator mit Kern

Kondensator

Kondensator, verstellbar

Elektrolytkondensator

Lampe

Glimmlampe

Relais

Sternschaltung

Fotoelement

Diode

Duodiode

Triode

Fotozelle

Transistor

Trockengleichrichter