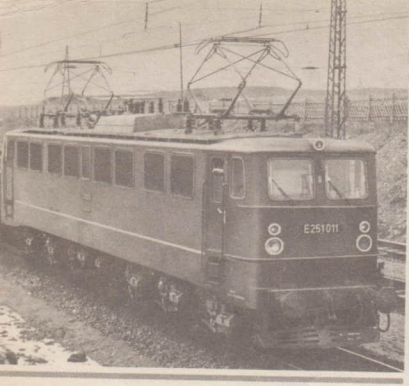
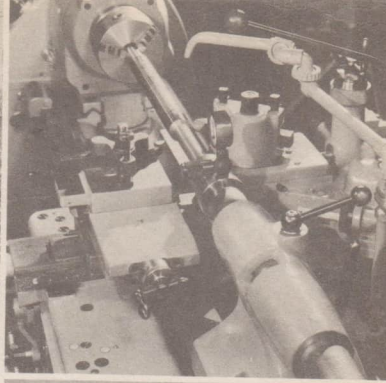
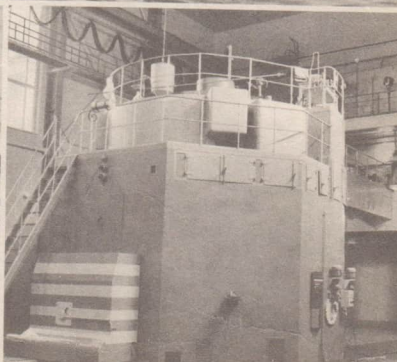
PHYSIK 12





Der Betrag der Energie bleibt bei der Umwandlung konstant



PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 12

Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin

1973

An der Entwicklung des Schulbuches waren beteiligt:

Dr. Hansjoachim Lechner	Regelung
Günter Meyer	
Prof. Oskar Mader	Mechanik, Gravitation
Helmut Penzel	Schülerexperimente
Dr. Rudolf Plötz	Felder
Paul Schulze	Aus der speziellen Relativitätstheorie
Prof. Dr. Walter Kuhn	
Prof. Dr. Richard Wehner	Energieerhaltungssatz

Bei der Bearbeitung einzelner Textstellen wurden die bisher erschienenen Schulbücher des Verlages zugrunde gelegt.

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

4. Auflage · Ausgabe 1970
Lizenz-Nr. 203/1000/72(DN) · ES 11 H
Redaktion: Werner Golm · Günter Meyer
Ausstattung: Manfred Behrend
Technische Zeichnungen: Ingrid Schäfer
Illustrationen: Fritz Hampel · Harry Förster
Printed in the German Democratic Republic
Satz: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", Bad Langensalza
Druck und Binden: Grafischer Großbetrieb
Völkerfreundschaft Dresden (III/9/1)
Gesetzt aus der Bodoni-Antiqua
P 1/26/72
Redaktionsschluß: 13. 12. 1972
Bestell-Nr. 02 12 52-4 · EVP: 3,60

Inhaltsverzeichnis

Mechanik

Die Drehbewegung 8

Bahn- und Winkelgrößen 8 — Weg und Drehwinkel 8 — Bahn- und Winkelgeschwindigkeit 9 — Bahn- und Winkelbeschleunigung 11 — Radialbeschleunigung und Radialkraft 11 — Bezugssysteme bei der Drehbewegung 13 — Die Fliehkraft 13 — Kosmische Geschwindigkeit 14 — Drehmoment und Trägheitsmoment 16 — Das Drehmoment 16 — Das Trägheitsmoment 18 — Das Grundgesetz der Drehbewegung 21 — Drehimpuls und Rotationsenergie 21 — Der Drehimpuls 21 — Die Rotationsenergie 23 — Fortschreitende Bewegung und Drehbewegung 25 — Zum Lösen von Aufgaben aus dem Gebiet der Mechanik 26

Felder

Der Begriff des Feldes 30

Das Feld als objektive Realität 30 — Wechselwirkungen des Feldes mit stofflichen Körpern 31 — Feldgrößen und ihre Messung 32 — Die Struktur der Felder 32 — Das physikalische Feld in philosophischer Sicht 33

Das Gravitationsfeld 35

Die Keplerschen Gesetze 35 — Das Gravitationsgesetz 37 — Das Gravitationsfeld 39 — Die Arbeit im Gravitationsfeld 41 — Kosmische Geschwindigkeiten 42

Das elektrische Feld 46

Quantitative Beschreibung des elektrischen Feldes 46 — Die Entstehung eines elektrischen Feldes 46 — Beschreibung eines elektrischen Feldes 46 — Einzel-

fälle elektrischer Felder 47 — Die Kraft zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern 49 — Die Energie des elektrischen Feldes 51 — Die Beschleunigung geladener Teilchen im elektrischen Feld 53

Das elektromagnetische Feld 56

Historische Betrachtung 56 — Quantitative Beschreibung des elektromagnetischen Feldes 57 — Die Entstehung eines elektromagnetischen Feldes 57 — Die Messung des magnetischen Feldes – die magnetische Induktion 58 — Die Lorentzkraft 60 — Vergleich der Kräfte in verschiedenartigen physikalischen Feldern 61 — Die spezifische Ladung eines Elektrons 61 — Synthese der Bahnkurve des Elektrons 62 — Mehrfach-Teilchenbeschleuniger 63 — Anwendungsgrenzen des Zyklotrons 63 — Das homogene magnetische Feld im Innern einer Spule 64 — Stoffe im magnetischen Feld 65 — Ferromagnetische Stoffe 65 — Paramagnetische Stoffe 65 — Diamagnetische Stoffe 66 — Die Magnetisierungskurve 66 — Moderne magnetische Werkstoffe 66

Die elektromagnetische Induktion 68

Induktionserscheinungen 68 — Induktion im bewegten und im ruhenden Leiter 69 — Das Induktionsgesetz in allgemeingültiger Form 70 — Das Lenzsche Gesetz 71 — Die Selbstinduktion 72 — Die Energie des magnetischen Feldes 73 — Wirbelströme 75 — Anwendung des Induktionsgesetzes 76 — Der Wechselstromgenerator 76 — Der magnetohydrodynamische Generator 76 — Der Vergleich physikalischer Felder 77 — Klassifizieren der Felder 77 — Physikalische Theorie der Felder und philosophischer Materiebegriff 77 — Gemeinsame Merkmale der Gravitationsfelder und der elektromagnetischen Felder 78

Aus der speziellen Relativitätstheorie

Bewegte Bezugssysteme 80

Bezugssysteme 80 — Gleichförmig bewegte Systeme – Galilei-Transformation 81 — Beschleunigte Systeme 82 — Inertialsysteme 83 — Relativitätsprinzip der Mechanik 84

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 85

Der Michelson-Versuch 85 — Das spezielle Relativitätsprinzip 88 — Die Gleichzeitigkeit von Ereignissen 88 — Die Relativität der Gleichzeitigkeit 89 — Die Lorentz-Transformation 90

Ergebnisse der speziellen Relativitätstheorie 92

Die Zeitdilatation 92 — Die Längenkontraktion 94 — Addition von Geschwindigkeiten 95 — Massenänderung 95 — Masse-Energie-Beziehung 97 — Die spezielle Relativitätstheorie als grundlegende Gesetzmäßigkeit 98 — Philosophisch-weltanschauliche Folgerungen aus der speziellen Relativitätstheorie 100 — Raum und Zeit 100 — Masse und Energie 101 — Beziehungen zwischen klassischer und moderner Physik 101

Der Energieerhaltungssatz

Energieumwandlung 104

Die Energie und ihre Erscheinungsformen 104 — Umwandlung der Energie 106 — Bedeutung des Energieprinzips 108 — Umrechnung der Energieeinheiten 109 — Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung 109 — Übersicht über Verfahren zur direkten Energieumwandlung 112

Energiebilanz bei Kernreaktionen 113

Kernkräfte und Bindungsenergie 113 — Massendefekt und Bindungsenergie 114 — Die Bindungsenergiekurve 116 — Die Kernspaltung 116 — Die Kernfusion 118 — Masse-Energiebeziehung bei Paarzerstrahlung und Paarbildung 122

Die Energieversorgung in Gegenwart und Zukunft 123

Die Energieversorgung in der Vergangenheit 123 — Die Entwicklung der Energiewirtschaft in der Sowjetunion 124 — Die Entwicklung der Weltenergiewirtschaft 125 — Die Strukturänderung der Energieträger 126 — Die Perspektive der Energiewirtschaft 126 — Die Entwicklung der Energiewirtschaft in der DDR 126

Die Erhaltungssätze der Physik 128

Der Energieerhaltungssatz 128 — Der Impulserhaltungssatz 128 — Der Drehimpulserhaltungssatz 128 — Der Schwerpunkterhaltungssatz 129 — Der Ladungserhaltungssatz 129 — Der Masseerhaltungssatz 129

Regelung

Grundbegriffe der Regelung 132

Prinzip einer Regelung 132 — Wirkungsweise einer Regelung 135 — Elektronische Spannungsregelung 135 — Erkennen der Wirkungsweise einer Regelanlage 136 — Wirkungskette bei Spannungserhöhung 136

Eigenschaften von Regelanlagen 138

Zeitverhalten einer Regelanlage 138 — Die Sprungfunktion 138 — Die Übergangsfunktion 138 — Formen der Regelung 140 — Proportionalregler 140 — Integralregler 141

Aufgaben 144

Schülerexperiment 151

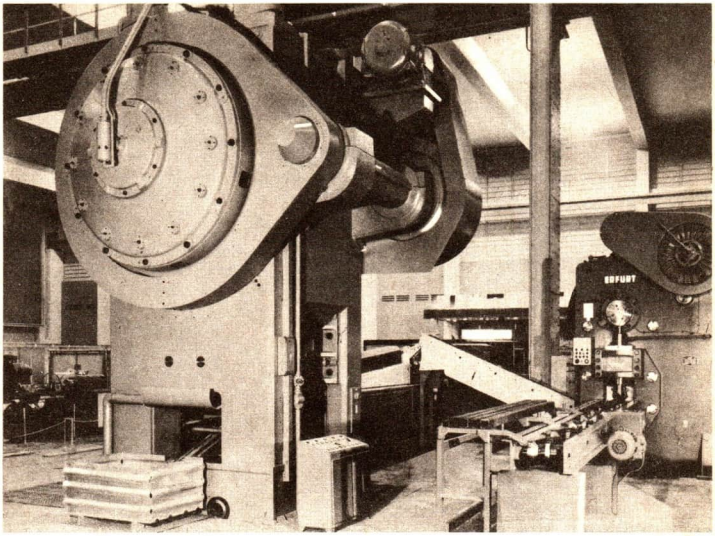
Lösungen 154

Register 157

Verwendete Symbole

● Fragen
▼ Versuche
■ Beispiele
▷ Einfache Merksätze
▶ Merksätze mit besonderer Bedeutung

Im Abschnitt Aufgaben sind die Nummern der Fragen und Aufträge fett gedruckt, für die eine Lösung angegeben ist.



Mechanik

Die Dynamik, die Lehre von den mechanischen Bewegungen und ihren Ursachen, ist für die Technik von besonderer Bedeutung; denn die Mehrzahl aller Maschinen und Maschinensysteme besitzt Bauteile, die — ihrem Zweck entsprechend — genau bestimmte mechanische Bewegungen ausführen müssen. Unter den verschiedenen Formen der mechanischen Bewegung spielt dabei die Drehbewegung eine entscheidende Rolle. Im Unterschied zu translatorisch bewegten Maschinenelementen brauchen bei rotierenden Teilen keine Massen in Bahnrichtung fortwährend beschleunigt und wieder abgebremst zu werden. Das ermöglicht eine raum- und materialsparende Bauweise. Ein weiterer Vorteil für die maschinelle Technik ergibt sich aus der Möglichkeit, mittels umlaufender Massen mechanische Energie zu speichern und rasch wieder in mechanische Arbeit umzusetzen, wie es z. B. bei Kolbenkraftmaschinen sowie bei Pressen und Scheren durch Schwungräder oder anders geformte Schwungkörper geschieht.

Die Drehbewegung

In der Mechanik werden nach der Bahnform gerad- und krummlinige, nach der zeitlichen Änderung der Geschwindigkeit gleich- und ungleichförmige Bewegungen unterschieden. Bei den krummlinigen Bewegungen bildet die Umlaufbewegung auf einer Kreisbahn um ein Zentrum, wie zum Beispiel am Schaufelrad eines alten Elbdampfers, einen Sonderfall, der mit der Drehung eines Körpers um eine feste Achse (Rotation) in engem Zusammenhang steht.

Bahn- und Winkelgrößen

Weg und Drehwinkel. Bei einer Drehbewegung unterscheidet man zwischen dem (krummlinigen) Weg s, den eine Punktmasse zurücklegt, und dem Drehwinkel σ, den die Verbindungsgerade des Drehzentrums mit der Punktmasse, der *Leitstrahl* oder *Radiusvektor*, überstreicht (Bild 8/2). Hierbei ist es üblich, den Drehwinkel nicht im Gradmaß, sondern im Bogenmaß anzugeben.

● *Wie ist das Bogenmaß eines Winkels definiert?*

Bei der Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn mit dem Radius r gehört zum Weg s der

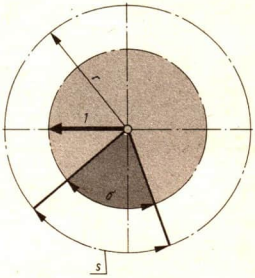
▷ **Drehwinkel** $$\sigma = \frac{s}{r}. \qquad (1)$$

Weg und Drehwinkel unterscheiden sich in ihrer Größenart; der Weg ist ein Kreisbogenstück, er hat die Größenart l, der im Bogenmaß gemessene Winkel ist eine Verhältniszahl.

Führt nicht eine Punktmasse, sondern ein ausgedehnter Körper von unveränderlich angenommener Form eine Drehung um eine feste Achse aus, so sind die Drehwinkel, die von den Leitstrahlen verschiedener Punkte des Körpers überstrichen werden, in der gleichen Zeit gleich.

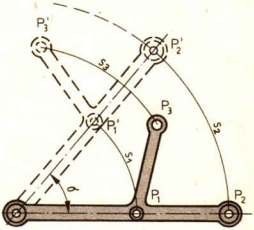
Die Wege der einzelnen Punkte sind dabei jedoch von ihrem Abstand vom Drehzentrum abhängig und im allgemeinen verschieden (Bild 8/3).

Dieser Sachverhalt legt nahe, für die Untersuchung von Drehbewegungen neben der Punktmasse ein weiteres Denk-



8/2 Weg und Drehwinkel

8/3 Wege verschiedener Punkte bei gleichem Drehwinkel



Gradmaß	Bogenmaß
360°	$2\pi \approx 6{,}28$
180°	$\pi \approx 3{,}14$
90°	$\pi/2 \approx 1{,}57$
$\approx$ 57,3°	$= 1$
45°	$\approx 0{,}785$
30°	$\approx 0{,}523$
1°	$\approx 0{,}01745$

modell heranzuziehen: den *starren Körper*. Bei diesem Denkmodell wird von den stofflichen Eigenschaften wie Formbarkeit, Elastizität, Masseverteilung u. ä. abstrahiert; es wird eine unveränderliche, „starre" Form des Körpers angenommen. Der starre Körper ist somit als ein System von Punkten anzusehen, die ihren gegenseitigen Abstand beibehalten. Beim starren Körper können bestimmte Punkte mit Masse belegt, d. h. als Punktmassen betrachtet werden.

Bahn- und Winkelgeschwindigkeit. Überstreicht bei der Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn der Leitstrahl in gleichen Zeiten gleiche Winkel, so spricht man von einer *gleichförmigen Kreisbewegung*. Rotiert ein starrer Körper so um eine Achse, daß der Leitstrahl eines beliebigen Punktes in gleichen Zeiten gleiche Winkel überstreicht, so liegt *gleichförmige Rotation* vor. Bei diesen Bewegungen wird die *Bahngeschwindigkeit* v eines Punktes wie bei der gleichförmigen geradlinigen Bewegung durch den Quotienten aus dem (auf dem Kreisbogen gemessenen) Weg und der Zeit ausgedrückt:

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

Die zeitliche Änderung des Drehwinkels wird durch die *Winkelgeschwindigkeit* ω gekennzeichnet, bei der gleichförmigen Kreisbewegung ist die Winkelgeschwindigkeit entsprechend der Definition dieser Bewegungsform konstant; sie kann in diesem Falle ausgedrückt werden durch den Quotienten aus dem Drehwinkel und der Zeit:

Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{\sigma}{t}$ oder (2) ◁

$$\omega = \frac{v}{r}. \qquad (3)$$

Weisen Sie die Richtigkeit dieses Zusammenhangs zwischen den Gleichungen (2) *und* (3) *nach!* ●

Die Zeit, in der ein voller Umlauf eines Punktes um einen Drehpunkt erfolgt, heißt *Umlaufzeit* T, die Anzahl der Umläufe je Zeiteinheit *Umlaufzahl* (Drehzahl) n; zwischen diesen Größen besteht die Beziehung

$$n \cdot T = 1. \qquad (4)$$

Daraus folgt $n = \frac{1}{T}$ und $T = \frac{1}{n}$.

Da ein Umlauf im Winkelmaß 2π beträgt, ist bei der Umlaufzahl n die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = 2\pi \cdot n. \qquad (5)$$

■ Ein Elektromotor hat eine Drehzahl $n = 3000\ \text{min}^{-1}$.
Wie groß sind Umlaufzahl, Umlaufzeit und Winkelgeschwindigkeit der Welle und die Bahngeschwindigkeit an der Peripherie einer an der Welle befestigten Riemenscheibe von 120 mm Durchmesser?

Gegeben:

$n = 3000\ \text{min}^{-1}$

$d = 120\ \text{mm}$

Gesucht:

n

T

ω

v

Lösung:

$$n = \frac{3000\ \text{min}^{-1}}{60\ \text{s} \cdot \text{min}^{-1}}$$

$$\underline{\underline{n = 50\ \text{s}^{-1}}}$$

$$T = \frac{1}{n}$$

$$\underline{\underline{T = 0{,}02\ \text{s}}}$$

$$\omega = 2\pi \cdot n$$

$$\underline{\underline{\omega \approx 314\ \text{s}^{-1}}}$$

$$v = \omega \cdot r$$

$$v \approx 314\ \text{s}^{-1} \cdot 0{,}06\ \text{m}$$

$$\underline{\underline{v \approx 18{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Allgemein gilt, analog zur Definition der Geschwindigkeit einer geradlinigen Bewegung, für die Drehbewegung

Bahngeschwindigkeit	Winkelgeschwindigkeit
$v = \frac{ds}{dt}$	$\omega = \frac{d\sigma}{dt}$

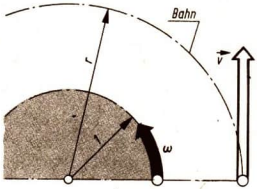
● *Weisen Sie nach, daß die Gleichung* (3) *auch für ungleichförmige Kreisbewegungen gültig ist!*

Die Bahngeschwindigkeit ist wie die Geschwindigkeit bei einer geradlinigen Bewegung eine vektorielle Größe. Ihre Richtung fällt mit der Tangente an die Bahnkurve zusammen (Bild 10/1).
Die Winkelgeschwindigkeit wird ebenfalls durch einen Vektor dargestellt, der aber im Unterschied zum Vektor der Bahngeschwindigkeit *senkrecht auf der Bahnebene* steht. Der Richtungssinn dieses Vektors (Bild 10/2) ist festgelegt und wird nach folgender Regel bestimmt:

▷ **Hält man die gekrümmten Finger der rechten Hand in die Richtung der Kreisbewegung, so zeigt der abgespreizte Daumen die Richtung des Vektors der Winkelgeschwindigkeit an.**

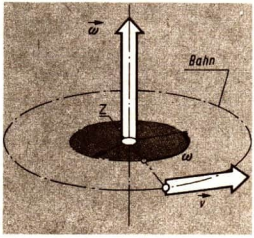
Statt dessen kann auch die Drehung einer Schraube mit Rechtsgewinde als Gedankenstütze dienen: Die Drehrichtung der Schraube entspricht der Bahnbewegung, der Vorschub der Richtung des Vektors der Winkelgeschwindigkeit (Bild 11/1).

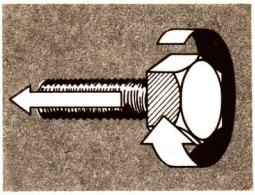
Vektoren, die wie der Vektor der Winkelgeschwindigkeit einen Drehsinn angeben, bezeichnet man als *axiale Vektoren* oder als *Drehvektoren*. Demgegenüber nennt man



10/1 Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit

10/2 Zur vektoriellen Darstellung der Winkelgeschwindigkeit





11/1

Vektoren, die eine Translationsrichtung angeben, wie die Vektoren der Bahngeschwindigkeit oder der Kraft, *Schubvektoren.*

Bahn- und Winkelbeschleunigung. Ebenso wie bei der geradlinigen Bewegung wird auch bei der Drehbewegung die Beschleunigung durch den Differentialquotienten der Geschwindigkeit nach der Zeit definiert. Somit gelten für

Bahnbeschleunigung	Winkelbeschleunigung
$a = \frac{dv}{dt}$	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$
$a = \frac{d^2 s}{dt^2}$	$\alpha = \frac{d^2 \sigma}{dt^2}$

In welcher Weise lassen sich die Bewegungsgleichungen für eine gleichmäßig beschleunigte Kreisbewegung darstellen? ●

Weisen Sie nach, daß für die Kreisbewegung allgemein gilt $\alpha = a/r$! ●

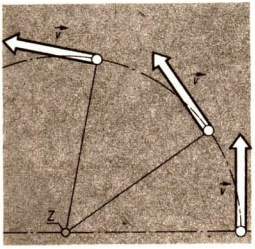
Ein Elektromotor erreicht nach 4 s Anlaufzeit eine Drehzahl von 2400 min^{-1}. Wie groß ist die Winkelbeschleunigung seiner Welle, wenn während dieser Zeit gleichmäßige Beschleunigung angenommen wird? ■

Gegeben:	*Lösung:*
$n = 2400\ min^{-1}$	$\omega = 2\pi \cdot n$
$t = 4\ s$	$\omega = 2\pi \cdot 40\ s^{-1}$
	$\omega \approx 251{,}3\ s^{-1}$
Gesucht:	
ω	$\alpha = \frac{\omega}{t}$
α	$\alpha \approx \frac{251{,}3\ s^{-1}}{4\ s}$
	$\alpha \approx 62{,}8\ s^{-2}$

Dieser Wert ist gleich $10 \cdot 2\pi$, d. h. in jeder Sekunde erhöht sich die Drehzahl um 10 Umläufe je Sekunde.
Auch die Winkelbeschleunigung wird wie die Winkelgeschwindigkeit durch einen axialen Vektor dargestellt.

Radialbeschleunigung und Radialkraft. Jede krummlinige Bewegung ist eine beschleunigte Bewegung; im allgemeinen ändern sich bei einer solchen Bewegung Betrag und Richtung des Geschwindigkeitsvektors. Bei der gleichförmigen Kreisbewegung ändert sich nur die Richtung der Bahngeschwindigkeit; ihr Betrag bleibt konstant (Bild 11/2).

11/2 Konstanz des Betrages und Änderung der Richtung der Bahngeschwindigkeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung



Der Beschleunigungsvektor dieser Bewegung hat in Bahnrichtung die Komponente 0, d. h. er steht senkrecht zur Bahn und ist damit stets zum Kreismittelpunkt gerichtet (Bild 12/1). Eine zum Zentrum der Kreisbahn gerichtete Beschleunigung wird *Radialbeschleunigung* genannt.

● *Weisen Sie nach, daß sich andernfalls keine gleichförmige Kreisbewegung ergäbe!*

Um den Betrag der Radialbeschleunigung bei gleichförmiger Kreisbewegung zu ermitteln, stellt man folgende Überlegungen an (Bild 12/2): Eine Punktmasse bewegt sich auf einer Bahn vom Radius r mit der Bahngeschwindigkeit v. Würde die Punktmasse, wenn sie sich im Punkt A befindet, keine Radialbeschleunigung und auch keine andersartige Beschleunigung erfahren, so legte sie nach dem Trägheitsgesetz in der Zeitspanne Δt die Strecke $\overline{AB} = v \cdot \Delta t$ zurück. In Wirklichkeit beschreibt sie aber auf dem Kreis den Bogen AC. Fällt man vom Punkt C das Lot auf den Radius MA und bezeichnet den erhaltenen Fußpunkt des Lotes mit D, so gibt die Strecke $\overline{AD}$ den Weg an, den die Punktmasse während der Zeitspanne Δt zum Mittelpunkt hin zurücklegt. Diese Bewegung zum Zentrum hin ist als gleichmäßig beschleunigt mit der unbekannten konstanten Radialbeschleunigung a_R aufzufassen.

Es ist

$$\overline{AD} = \frac{1}{2}\, a_R\, (\Delta t)^2 .$$

Wenn Δt sehr klein angenommen wird (streng gälte diese Überlegung nur für $\Delta t \to 0$), so kann die Krümmung des Bogens AC vernachlässigt und AC als Strecke betrachtet werden. Verbindet man den Punkt C mit dem Punkt E, der in der geraden Verlängerung des Radius AM über M hinaus auf dem Kreisumfang liegt, so ergibt sich das rechtwinklige Dreieck AEC. In diesem Dreieck ist nach dem Höhensatz

$$\overline{AC}^2 = \overline{AE} \cdot \overline{AD} ,$$

das heißt

$$(v \cdot \Delta t)^2 = 2\, r \cdot \frac{1}{2}\, a_R\, (\Delta t)^2 .$$

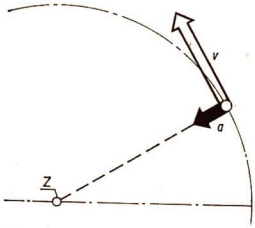
Daraus folgt für die

▷ **Radialbeschleunigung**

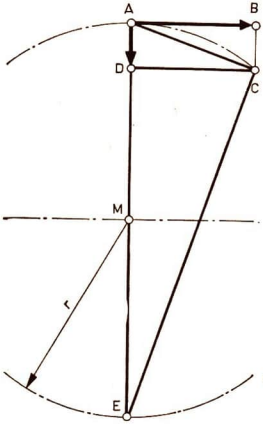
$$a_R = \frac{v^2}{r} \quad \text{oder}$$

$$a_R = r \cdot \omega^2 . \qquad (6)$$

Wenn Beschleunigungen auftreten, so kann auf das Wirken von Kräften geschlossen werden. Die Kraft, welche die Radialbeschleunigung hervorruft, wird als *Radialkraft* bezeichnet. In Richtung und Richtungssinn stimmt die



12/1 Bahngeschwindigkeit und Radialbeschleunigung



12/2 Zur Herleitung des Betrages der Radialbeschleunigung

Radialkraft mit der Radialbeschleunigung überein; ihr Betrag F_R ist nach dem Newtonschen Grundgesetz der Mechanik gleich dem Produkt aus der Masse m und der Radialbeschleunigung a_R:

$$m \cdot a_R = m \frac{v^2}{r}.$$

Daraus ergibt sich die Gleichung der

Radialkraft $$F_R = m \cdot \frac{v^2}{r} \qquad (7) \triangleleft$$

$$F_R = m \cdot r \cdot \omega^2.$$

Stellen Sie die Gleichung für die Radialkraft auf, wenn der Radius r und die Umlaufzeit T gegeben sind! ●

Hört die Radialkraft auf zu wirken, z. B. wenn der Faden bei einem im Kreis herumgeschwungenen Körper reißt, so bewegt sich der Körper infolge seiner Trägheit auf einer Bahntangente weiter, und zwar mit konstanter Geschwindigkeit, solange keine bremsenden Einflüsse bestehen.

Ein Körper mit der Masse $m = 100$ g wird an einem langen Faden ($r = 1$ m) in der Sekunde 2 mal im Kreise herumgeschleudert. Mit welcher Kraft muß er festgehalten werden, damit er in der Kreisbahn verbleibt? ■

Gegeben:	*Lösung:*
$m = 100$ g	$\omega = 2\pi \cdot n$
$r = 1$ m	$\omega \approx 12{,}6\ \mathrm{s}^{-1}$
$n = 2\ \mathrm{s}^{-1}$	
Gesucht:	$F_R = m \cdot r \cdot \omega^2$
ω	
F_R	$\underline{\underline{F_R \approx 15{,}8\ \mathrm{N}}}$, $\underline{\underline{F_R \approx 1{,}6\ \mathrm{kp}}}$

Bezugssysteme bei der Drehbewegung

Wie bei jeder Bewegung ist auch bei der Drehbewegung das Bezugssystem zu beachten. Die in den vorausgegangenen Abschnitten formulierten Aussagen zu Bahn- und Winkelgeschwindigkeit sowie zu Bahn- und Winkelbeschleunigung gelten für ein Bezugssystem, in dem sich das Drehzentrum in Ruhe befindet und nicht an der Drehbewegung teilnimmt. In einem mitrotierenden System ist die umlaufende Punktmasse bzw. der rotierende Körper in Ruhe.

Die Fliehkraft. Wie aus den Ausführungen zur Radialbeschleunigung hervorgeht, muß ein Körper durch eine zum Drehzentrum gerichtete Kraft, die Radialkraft, in seiner Bahn gehalten werden. Für ein mitrotierendes Bezugssystem folgt daraus, daß auf jeden außerhalb des

Drehzentrums befindlichen Körper eine Kraft einwirken muß, um ihn in bezug auf dieses System in Ruhe zu halten. Das bedeutet, daß in einem mitrotierenden Bezugssystem auf einen in diesem System außerhalb des Drehzentrums ruhenden Körper eine Kraft zu wirken scheint, die den gleichen Betrag wie die entsprechende Radialkraft hat, dieser aber entgegen, d. h. vom Zentrum weg gerichtet ist. Man nennt diese Kraft deshalb *Fliehkraft* oder *Zentrifugalkraft* F_z.

Beim Loslassen des Körpers, wenn also die Radialkraft zu wirken aufhört, bewegt sich der Körper im mitrotierenden System nicht in der Wirkungslinie der Fliehkraft weiter, d. h. radial nach außen, sondern auf einer seitlich abgelenkten Bahn.

● *Wie ist diese Erscheinung zu erklären? Welche Bewegung führt der Körper in einem nicht mitrotierenden Bezugssystem aus?*

Aus der Gleichheit der Beträge der Radialkraft und der Fliehkraft folgt für den Betrag der

▷ **Fliehkraft** $$F_z = m \cdot r \cdot \omega^2. \qquad (8)$$

Kosmische Geschwindigkeit. Mit Hilfe der Gleichung für den Betrag der Radial- bzw. der Fliehkraft läßt sich die Geschwindigkeit eines um das Zentralgestirn kreisenden Himmelskörpers, z. B. eines künstlichen Satelliten um die Erde, berechnen. Beim Umlauf des Satelliten befinden sich, betrachtet von einem mitrotierenden Bezugssystem aus, die Fliehkraft und die Gewichtskraft des Körpers im Gleichgewicht, der Körper ist in diesem System „schwerelos". Es gilt somit, wenn r den Radius der Bahn, m die Masse des Körpers, v seine Bahngeschwindigkeit und g die Schwerebeschleunigung (im Abstand r vom Zentrum) bedeuten:

$\frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot g$; daraus ergibt sich für den Radius r die

▷ **Kreisbahngeschwindigkeit** $$v = \sqrt{g \cdot r}. \qquad (9)$$

● *Erklären Sie, weshalb die Kreisbahngeschwindigkeit von der Masse des Körpers unabhängig ist!*

■ Es ist die Bahngeschwindigkeit für eine oberflächennahe kreisförmige Umlaufbahn eines Erdsatelliten zu berechnen.

Gegeben:

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

$r = 6{,}371 \cdot 10^6\ \mathrm{m}$

Gesucht:

v

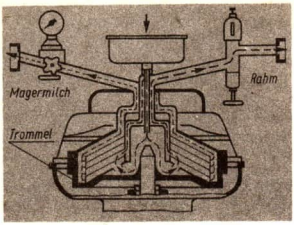
Lösung:

$v = \sqrt{g \cdot r}$

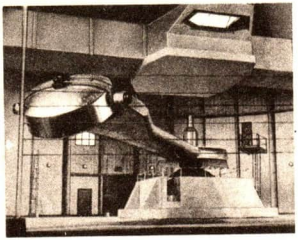
$v = \sqrt{9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}} \cdot 6{,}371 \cdot 10^6\ \mathrm{m}}$

$v \approx 7900\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

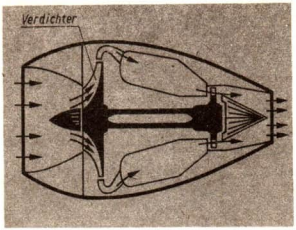
Das ist die *erste kosmische Geschwindigkeit der Erde.*



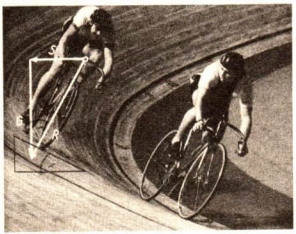
Zentrifuge. In der Milchzentrifuge wird der Rahm dadurch von der Magermilch getrennt, daß man die Vollmilch, eine Emulsion von Fetttröpfchen in einer wäßrigen Lösung, in einem Kessel in rasche Drehung versetzt. Da die Fliehkraft der Masse proportional ist, wird die Magermilch wegen ihrer größeren Dichte nach außen getrieben und dort abgesondert, während sich der Rahm auf der Innenseite der rotierenden Flüssigkeit nahe der Drehachse abscheidet.



Beschleunigungssimulator. Mittels Zentrifugen können Fliehkräfte erreicht werden, die ein Vielfaches der Schwerkraft an der Erdoberfläche betragen. Zum Beispiel können in einer Kabine, die sich am Ende eines rotierenden Armes befindet, Schwereverhältnisse simuliert, d. h. nachgeahmt werden, wie sie beim Aufstieg und bei der Landung eines Raumschiffes eintreten. Solche Zentrifugen dienen vor allem luft- und raumfahrtmedizinischen Zwecken und dem Training von Flugzeugführern und Kosmonauten.



Kreiselpumpe, Kreiselverdichter. Auf der Ausnutzung der Fliehkraft beruhen auch die Kreiselpumpe und der Kreiselverdichter. Eine axial in einen Rotor eintretende Flüssigkeit oder ein Gas werden auf Grund der bei der Drehung auftretenden Fliehkraft nach außen befördert. Infolge der Fliehkraft ist der Druck in dem zu transportierenden Stoff nach Verlassen des Rotors größer als vor dem Eintritt.
Kreiselpumpen werden für kontinuierliche Fördermengen, große Fördermengen und Förderhöhen verwendet. Kreiselverdichter haben besondere Bedeutung für den Betrieb von Gasturbinen in Flugzeugtriebwerken.



Bahnüberhöhung. Bewegt sich ein Fahrzeug in einer gekrümmten Bahn auf einer horizontalen Ebene, so besteht die Gefahr, daß es infolge der Fliehkraft nach außen weggleitet oder umkippt.
Um dieser Gefahr zu begegnen, werden bei Eisenbahnen, Autostraßen und Radrennbahnen die Kurven nach außen hin *überhöht*.
Der Neigungswinkel des Bahnprofils wird zweckmäßig so gewählt, daß die Resultierende aus der Gewichtskraft des Fahrzeugs und der angreifenden Fliehkraft auf der Bahn senkrecht steht.

Die erste kosmische Geschwindigkeit ist die geringste Geschwindigkeit, mit der ein Körper um die Erde frei kreisen könnte, ohne zur Erdoberfläche zurückzufallen (praktisch ist eine solche oberflächennahe Erdumkreisung wegen des großen Luftwiderstandes, der bei dieser Geschwindigkeit auftritt, jedoch unmöglich).

Der erste von Menschenhand geschaffene Körper, der auf eine Umlaufbahn um die Erde gebracht wurde, war der sowjetische Sputnik 1 (4. Oktober 1957; Bild 16/1). Seit dieser Zeit hat die UdSSR eine Vielzahl künstlicher Himmelskörper zur friedlichen Erforschung des erdnahen und des interplanetaren Raumes gestartet. Mit dem erfolgreichen Flug von Sputnik 1 begann ein neuer Abschnitt in der Geschichte der astronomischen und geophysikalischen Forschung.

16/1 Sputnik 1

Drehmoment und Trägheitsmoment

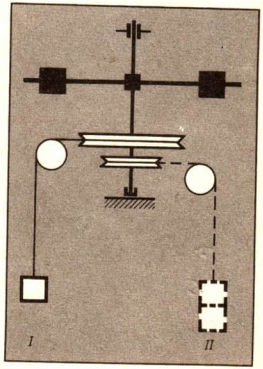
Bei der geradlinigen Bewegung ist die Beschleunigung durch den Quotienten aus der angreifenden Kraft und der Masse des Körpers gegeben. Im folgenden soll untersucht werden, welche Größen die Beschleunigung bei einer Drehbewegung bestimmen. Zunächst wird der Zusammenhang von Krafteinwirkung und Beschleunigung bei konstanter Masse und Masseverteilung, anschließend der Zusammenhang zwischen Masse, Masseverteilung und Beschleunigung bei konstanter Krafteinwirkung betrachtet. In beiden Fällen werden experimenteller Nachweis und theoretische Überlegungen miteinander verbunden.

1 **Das Drehmoment.**

▼ An einer vertikal gestellten, auf Spitzen drehbar gelagerten Welle ist waagerecht ein Stab befestigt, der ähnlich einer Hantel symmetrisch angeordnete Körper gleicher Masse trägt. Mit dem Stab sind zwei Rollen fest verbunden, deren Radien sich wie 1:2 verhalten. Um jede der Rollen kann ein Faden gewickelt werden, an dessen anderem Ende, das über eine weitere, feste Rolle geführt ist, eine Schale mit Wägestücken angebracht werden kann (Bild 16/2).

Wird der Faden um die größere Rolle geschlungen, ein Wägestück auf die Schale gelegt und die Vorrichtung in Gang gesetzt, so geraten Welle und Stab in Rotation, die Bewegung verläuft, wie durch Messung der Bahnen oder der Drehwinkel der rotierenden Körper festgestellt werden kann, gleichmäßig beschleunigt, solange die Kraft des sinkenden Wägestückes wirkt. Wird der Faden jedoch um die kleinere Rolle gelegt und der Versuch mit dem gleichen bewegenden Wägestück wiederholt, so ist die Beschleunigung, die das rotierende System erhält, geringer, sie beträgt die Hälfte des ursprünglichen Wertes. Um bei dieser Anordnung des Fadens die ursprüngliche Beschleunigung zu erhalten, muß die bewegende Gewichtskraft verdoppelt werden.

16/2 Zum Zusammenhang zwischen Kraft und Winkelbeschleunigung bei der Rotation



Durch weitere Versuche läßt sich bestätigen, daß die Winkelbeschleunigung, die ein drehbarer Körper erhält, der Kraft F und dem (senkrechten) Abstand ihrer Wirkungslinie von der Drehachse, dem *Kraftarm* r, proportional ist. Der Körper erhält die gleiche Winkelbeschleunigung, wenn gilt:

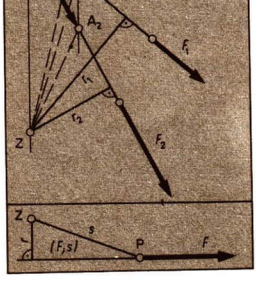
$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2 \,. \qquad (10)$$

Das gleiche Ergebnis läßt sich theoretisch gewinnen: An einem um eine Achse drehbaren starren Körper greifen in einer zur Drehachse senkrechten Ebene zwei nichtparallele Kräfte F_1 und F_2 an; die entsprechenden Kraftarme seien r_1 und r_2. Unter welchen Bedingungen sind F_1 und F_2 im Hinblick auf ihre Drehwirkung gleichwertig?

Man denkt sich die Kräfte F_1 und F_2 in ihren Wirkungslinien bis zu deren Schnittpunkt P verschoben, so daß F_1 und F_2 in P angreifen. Da sich der Körper nicht geradlinig bewegen, sondern nur um die durch Z gehende Achse drehen kann, ist für die Drehbewegung nur jene Komponente der angreifenden Kraft wirksam, die in die Richtung der Bahntangente in P fällt, d. h. auf PZ senkrecht steht (Bild 17/1). Für die Kraft F_1 ist dies nach dem Satz über die Zerlegung einer Kraft die Komponente F_0. Wenn die Kraft F_2 im Hinblick auf ihre Drehwirkung der Kraft F_1 gleichwertig sein soll, muß ihre im Punkt P in Richtung der Bahntangente angreifende Komponente im Betrag mit F_0 übereinstimmen. Unter dieser Bedingung ergibt sich, daß das Dreieck ZPA_2 ebenso wie das Dreieck ZPA_1 mit dem Dreieck ZPA_0 flächengleich ist. Daraus folgt $ZPA_1 = ZPA_2$ und somit, da r_1 die Höhe auf PA_1 und r_2 die Höhe auf PA_2 ist, $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$.

17/1 Gleichwertige Kraftwirkungen bei der Drehbewegung (theoretisch)

17/2 Zur Herleitung des Drehmomentes



Vergleichen Sie diese Aussagen, die sich auf die dynamische Wirkung einer Kraft bezieht, mit dem Hebelgesetz, das eine statische Kraftwirkung betrifft!

Die bisherigen Überlegungen über die Kraftwirkung bei einer Drehbewegung gingen davon aus, daß die Kraft und der Kraftarm, d. h. der Abstand der Wirkungslinie der Kraft von der Drehachse, bekannt sind. Hat — im allgemeinen Falle — der Angriffspunkt P einer Kraft F vom Drehzentrum Z die Entfernung $\overline{ZP} = s$ und schließt die Kraftrichtung mit der Richtung des Strahles ZP den Winkel (F, s) ein (Bild 17/2), so ist der Kraftarm

$r = s \cdot \sin(F; s)$ und

$$F \cdot r = F \cdot s \cdot \sin(F; s) \,. \qquad (11)$$

Das Produkt aus der Kraft und dem auf diese Weise bestimmten Kraftarm ist das

Drehmoment $\boldsymbol{M = F \cdot s \cdot \sin(F; s)}$. (12)

Das Drehmoment ist eine physikalische Größe, die die Drehwirkung einer Kraft auf einen starren Körper kennzeichnet. Es wird durch einen axialen Vektor dargestellt. Die Richtung des axialen Vektors des Drehmoments wird analog der Richtung des Vektors der Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung bestimmt (↗ Seite 10/11), an die Stelle der Bahnebene bei der Winkelgeschwindigkeit oder der Winkelbeschleunigung tritt die Ebene, die von der Wirkungslinie der Kraft und dem Drehzentrum gebildet wird; an die Stelle der Richtung der Bahngeschwindigkeit bzw. der Bahnbeschleunigung tritt die Kraftrichtung.
Greifen am gleichen Körper mehrere Kräfte an, so werden die Drehmomente addiert (vektorielle Addition).
Analog zur Gleichgewichtsbedingung für einen verschiebbar beweglichen Körper

$$\Sigma F_i = 0 \tag{13}$$

gilt für einen drehbaren (starren) Körper

$$\Sigma M_i = 0\,. \tag{14}$$

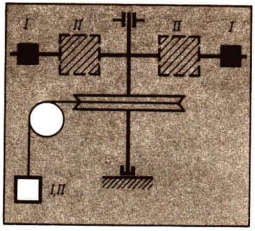
● *Formulieren Sie mit Hilfe des Begriffs „Drehmoment" das Hebelgesetz für zwei Kräfte F_1 und F_2, die in den Entfernungen s_1 und s_2 vom Drehpunkt angreifen (allgemeiner Fall)!*

Das Trägheitsmoment.

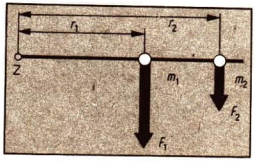
2 ▼ In der in Bild 18/1 dargestellten Vorrichtung wird der Abstand der Körper vom Drehzentrum auf die Hälfte verringert. Das gleiche Drehmoment bewirkt dann eine vierfache Winkelbeschleunigung gegenüber der ursprünglichen Lage. Um die ursprüngliche Winkelbeschleunigung zu erhalten, muß in der neuen Lage die Masse der Körper vervierfacht werden.

Durch weitere Versuche kann man bestätigen, daß zwei umlaufende Körper dann durch das gleiche Drehmoment die gleiche Winkelbeschleunigung erhalten, wenn die Produkte aus ihrer Masse m und dem Quadrat ihres Abstands r von der Drehachse gleich sind, d. h. wenn $m_1 \cdot r_1^2 = m_2 \cdot r_2^2$ ist. Das gleiche Ergebnis läßt sich theoretisch durch folgende Überlegung gewinnen:
An einem masselosen starren, um eine Achse drehbaren Körper befindet sich im Abstand r_1 von der Drehachse eine Punktmasse m_1; am Ort der Punktmasse greift in der zur Achse senkrechten Ebene eine Kraft F_1 in Richtung der Bahntangente von m_1 an (Bild 18/2).
Nach den Bewegungsgesetzen erfährt die Punktmasse m_1 eine Bahnbeschleunigung $a_1 = \frac{F_1}{m_1}$ und eine Winkelbe-

18/1 Zum Zusammenhang zwischen Masseverteilung und Winkelbeschleunigung bei der Rotation



18/2 Gleichwertige Trägheitswirkungen bei der Drehbewegung (theoretisch)



schleunigung $\alpha_1 = \frac{a_1}{r_1} = \frac{F_1}{m_1 \cdot r_1}$. Das Drehmoment, das diese Beschleunigung bewirkt, beträgt $F_1 \cdot r_1$.

Nun ist zu ermitteln, wie groß jene Punktmasse m_2 im Abstand r_2 sein müßte, die durch das Drehmoment $F_1 \cdot r_1$ die gleiche Winkelbeschleunigung erfährt wie die Punktmasse m_1, d. h. die beim angenommenen starren Körper die Punktmasse m_1 ersetzen kann.

Eine im Abstand r_2 angreifende Kraft F_2 erteilt einer in diesem Abstand befindlichen Punktmasse m_2 die Winkelbeschleunigung $\alpha_2 = \frac{F_2}{m_2 \cdot r_2}$. Da nach der Voraussetzung die Drehmomente $F_1 \cdot r_1$ und $F_2 \cdot r_2$ gleich sein sollen, folgt $F_2 = \frac{F_1 \cdot r_1}{r_2}$. Damit lautet die Bedingung für die Gleichheit der Winkelbeschleunigungen

$$\frac{F_1}{m_1 \cdot r_1} = \frac{F_1 \cdot r_1}{r_2} \cdot \frac{1}{m_2 \cdot r_2}; \tag{15}$$

daraus ergibt sich

$$m_1 \cdot r_1^2 = m_2 \cdot r_2^2 . \tag{16}$$

Das Produkt $m \cdot r^2$ der Punktmasse m im Abstand r von der Drehachse heißt

Trägheitsmoment $\quad J = m \cdot r^2 .$ (17) ◁

Das Trägheitsmoment ist ein Maß für die Trägheit eines mechanischen Objekts bei Rotation, analog zur Masse bei einer geradlinigen Bewegung.

Ist das rotierende Objekt keine Punktmasse, sondern ein ausgedehnter Körper, so ergibt sich das Trägheitsmoment als Summe der Trägheitsmomente seiner einzelnen Massenelemente. Beträgt deren Anzahl n, so ist

$$J = \sum_{k=1}^{n} (m_k \cdot r_k^2) . \tag{18}$$

Der Grenzwert dieser Summe für $n \to \infty$ ist das Integral

$$J = \int r^2 \cdot \mathrm{d}m . \tag{19}$$

Das Trägheitsmoment eines Körpers ist von der Lage der Drehachse abhängig.

Auch die Parallelverschiebung der Drehachse führt im allgemeinen zu einer Veränderung des Trägheitsmoments. Das läßt sich z. B. leicht an der Masseverteilung eines um eine Querachse rotierenden Stabes erkennen, wenn diese Achse einmal durch den Schwerpunkt des Körpers geht, zum anderen sich in der Nähe eines der Stabenden befindet.

In der Praxis werden Trägheitsmomente von Körpern entweder experimentell bestimmt oder, bei einfachen Formen, berechnet. Für die experimentelle Bestimmung eines Trägheitsmoments werden vielfach Beschleunigungsmessungen nach dem auf Seite 18 dargelegten Prinzip (siehe Bild 16/2 und 18/1) durchgeführt; aus dem bekannten Drehmoment und der gemessenen Winkelbeschleunigung ergibt sich — siehe Gleichung (22) — das gesuchte Trägheitsmoment. Eine weitere Methode beruht auf der Erzeugung von Drehschwingungen. Der Körper, dessen Trägheitsmoment bestimmt werden soll, wird drehbar gelagert, es greift, ähnlich wie bei der Unruh einer Uhr, ein Drehmoment an, das dem Winkel der Auslenkung von der Ruhelage proportional ist und der Auslenkung entgegenwirkt (ein solches Drehmoment kann z. B. von einer Spiralfeder oder, bei kleinen Winkeln, von einer an einem Arm angreifenden Schraubenfeder erzeugt werden). Wird der Körper aus der Ruhelage gedreht und losgelassen, so gerät der Körper in Drehschwingungen.

Analog zur geradlinigen Schwingung des Fadenschwingers, bei der die Schwingungsdauer der Wurzel aus der Masse des Körpers proportional ist, erweist sich bei der Drehschwingung die Schwingungsdauer der Wurzel aus dem Trägheitsmoment des schwingenden Körpers proportional:

$$T \sim \sqrt{J}$$

Die Berechnung eines Trägheitsmoments wird an folgendem Beispiel erläutert:

Es ist das Trägheitsmoment eines um seine Längsachse rotierenden Kreiszylinders vom Radius r_Z und der Höhe h zu berechnen; der Körper besteht aus homogenem Material von der Dichte ϱ, seine Gesamtmasse ist m_Z.

Man denkt sich den Zylinder in Massenelemente in der Form dünner koaxialer Hohlzylinder mit dem Innenradius r, dem Außenradius $r + \Delta r$ und der (konstanten) Höhe h zerlegt (Bild 20/1). Die Masse eines solchen Elements beträgt somit

$$\pi \cdot h\,[(r + \Delta r)^2 - r^2]\,\varrho = \pi \cdot h \cdot \varrho\,[2\,r \cdot \Delta r + (\Delta r)^2]\,.$$

Da Δr klein gegenüber den anderen Größen ist, kann man $(\Delta r)^2$ vernachlässigen, daraus ergibt sich für die Masse des Elements $\Delta m = 2\,\pi \cdot h \cdot \varrho \cdot r \cdot \Delta r$ und für sein Trägheitsmoment $\Delta J = 2\pi \cdot h \cdot \varrho \cdot r^3 \cdot \Delta r$. Wenn man die Summe aller Trägheitsmomente der Elemente bildet und ihren Grenzwert ermittelt, erhält man für das Trägheitsmoment des Zylinders

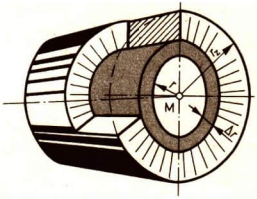
$$J_Z = \int_0^{r_Z} 2\,\pi \cdot h \cdot \varrho \cdot r^3 \cdot \mathrm{d}r = 2\,\pi \cdot h \cdot \varrho \cdot \frac{1}{4}\,r_Z^4 = \frac{1}{2}\,\pi \cdot h \cdot \varrho \cdot r_Z^4\,.$$

Da die Masse m_Z des Zylinders gegeben und $m_Z = \pi \cdot r_Z^2 \cdot h \cdot \varrho$ ist, folgt daraus

$$J_Z = \frac{1}{2}\,m_Z \cdot r_Z^2\,. \qquad (20)$$

Das Trägheitsmoment einer Kugel aus homogenem Material mit dem Radius r_K und der Masse m_K beträgt für einen Durchmesser als Drehachse, wie hier ohne Beweis genannt wird,

$$J_K = \frac{2}{5}\,m_K \cdot r_K^2\,. \qquad (21)$$



20/1 Zur Bestimmung des Trägheitsmoments eines Zylinders

Das Grundgesetz der Drehbewegung

Aus den in den vorangegangenen Abschnitten dargelegten Zusammenhängen folgt das

Grundgesetz der Drehbewegung $\alpha = \frac{M}{J}$. (22) ◁

Die Winkelbeschleunigung eines rotierenden Systems ist gleich dem Quotienten aus dem Drehmoment und dem Trägheitsmoment

Das Grundgesetz der Drehbewegung entspricht dem Grundgesetz der geradlinigen Bewegung $a = \frac{F}{m}$.

● *Vergleichen Sie die Größenarten der im Grundgesetz der Drehbewegung (Gleichung (16)) auftretenden physikalischen Größen mit den Größen des Newtonschen Grundgesetzes der Mechanik; machen Sie bei Gleichung (18) die Größenprobe!*

■ Der Rotor einer Zentrifuge hat zylindrische Form; sein Durchmesser ist $2\,r = 280$ mm, seine Masse beträgt $m = 18$ kg. Er wird von einem Elektromotor angetrieben, der in der Anlaufphase ein durchschnittliches Drehmoment $M = 30$ Nm bewirkt. Nach welcher Zeit hat der Rotor eine Drehzahl $n = 24\,000\ \text{min}^{-1}$ erreicht?

Gegeben:

$r = 0{,}14$ m

$m = 18$ kg

$M = 30$ Nm

$n = 400\ \text{s}^{-1}$

Gesucht:

J

t

Lösung:

$$J = \frac{1}{2}\, m \cdot r^2$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot 18\ \text{kg} \cdot 0{,}14^2\ \text{m}^2$$

$$\underline{\underline{J = 0{,}176\ \text{kgm}^2}}$$

$$t = \frac{\omega}{\alpha} \qquad \omega = 2\,\pi \cdot n$$

$$\omega = 2512\ \text{s}^{-1}$$

$$t = \frac{2512\ \text{s}^{-1}}{170\ \text{s}^{-2}} \qquad \alpha = \frac{M}{J}$$

$$\underline{\underline{t = 14{,}8\ \text{s}}} \qquad \alpha = 170\ \text{s}^{-2}$$

Drehimpuls und Rotationsenergie

Der Drehimpuls. Wie im vorigen Abschnitt experimentell und theoretisch nachgewiesen wurde, gerät ein drehbar gelagerter Körper unter der Einwirkung eines Drehmoments in Rotation, deren Winkelgeschwindigkeit von der Größe des Drehmoments und von der Zeit seiner Einwirkung abhängt. Für die Änderung des Bewegungszustandes gilt analog zur geradlinigen Bewegung

$$M \cdot \Delta t = J \cdot \Delta\omega\,. \qquad (23)$$

● *Begründen Sie den Zusammenhang in Gleichung* (23)*!*

Das Produkt $J \cdot \omega$ ist eine physikalische Größe, die in Analogie zum Impuls bei der geradlinigen Bewegung den Bewegungszustand eines rotierenden Körpers charakterisiert. Man bezeichnet dieses Produkt als

▶ **Drehimpuls** $\boldsymbol{D = J \cdot \omega}$. (24)

Der Drehimpuls wird durch einen axialen Vektor dargestellt, der in Richtung und Richtungssinn mit dem Vektor der Winkelgeschwindigkeit übereinstimmt.
Wird einem bereits in Drehung befindlichen Körper ein weiterer Drehimpuls zugeführt, so addiert sich dieser vektoriell zum ursprünglichen Drehimpuls. Dabei braucht der zugeführte Drehimpuls mit dem ursprünglichen weder in Richtung noch in Richtungssinn übereinzustimmen.

● *Welche Bedingung gilt für den Drehimpuls* ($M =$ *konst.*; t), *der einem rotierenden Körper* (J; ω) *zugeführt werden muß, damit dieser zum Stillstand kommt?*

Auf Grund des Zusammenhangs zwischen der zeitlichen Einwirkung eines Drehmoments und dem Drehimpuls eines Körpers kann das Grundgesetz der Drehbewegung auch als **Gesetz der Änderung des Drehimpulses** formuliert werden:

▷ **Das Drehmoment ist gleich dem Differentialquotienten des Drehimpulses nach der Zeit.**

$$\boldsymbol{M = \frac{d(J \cdot \omega)}{dt}} . \qquad (25)$$

● *Wie lautet das zur Gleichung* (24) *analoge Gesetz für die geradlinige Bewegung?*

Entsprechend dem Gesetz von der Erhaltung des Impulses bei der geradlinigen Bewegung gilt für die Drehbewegung

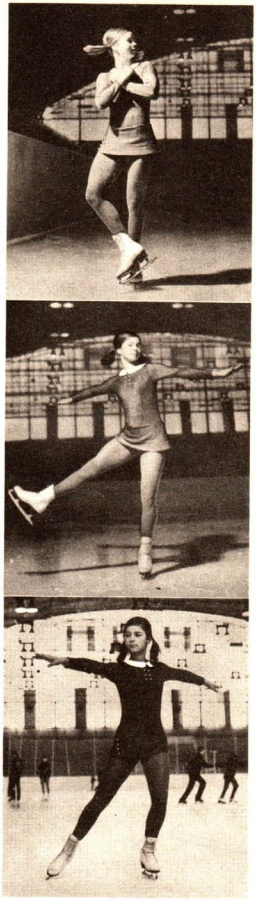
$$J \cdot \omega = \text{konstant, falls } M = 0 . \qquad (26)$$

Dieser Zusammenhang gilt allgemein, d. h. auch für Systeme, die aus mehreren Teilen bestehen, die sich gegeneinander bewegen und aufeinander durch innere Kräfte bzw. Drehmomente einwirken. Er kann deshalb auch in folgender Form als

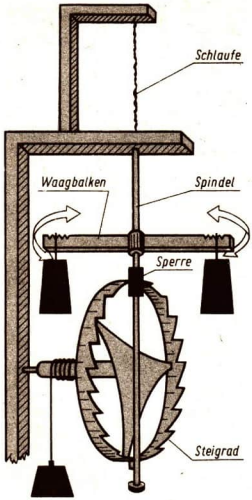
▶ **Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses**

$$\boldsymbol{\sum_{k=1}^{n} (J_k \cdot \omega_k) = \text{konstant},} \qquad (27)$$

falls $M = 0$ geschrieben werden, wobei die Summe aller $J_k \cdot \omega_k$ die Drehimpulse der einzelnen Teile bedeuten.



22/1 Bei der Pirouette hängt die Winkelgeschwindigkeit vom Abstand der Masse von der Drehachse ab



23/1 Waagbalkenuhr

Bei diesen alten Uhren drehte sich ein Balken um eine vertikale Achse. An beiden Enden des Balkens waren verstellbare Schwungkörper angebracht, mit denen man den Gang der Uhr regulieren konnte. Wenn diese Körper sehr dicht an dem Drehpunkt angeordnet wurden, lief die Uhr schnell. Entfernte man sie vom Drehpunkt, so lief die Uhr langsamer.
Die Achse des Waagbalkens hing in einer Fadenschlaufe, deren Länge verändert werden konnte. Drehte sich die Spindel, so wickelte sich die Schlaufe auf, verkürzte sich dabei, hob also die Spindel aufwärts und gab den Waagbalken bis zum nächsten Zahn des Steigrades frei. Die Spindel senkte sich danach wieder und wickelte sich in umgekehrter Richtung wieder auf. Dieser Vorgang wiederholte sich fortwährend, bis das Massestück seinen tiefsten Punkt erreicht hatte und wieder hochgezogen werden mußte.

Der Drehimpuls eines physikalischen Systems ist konstant, wenn auf das System kein äußeres Drehmoment einwirkt.

Wird bei einem rotierenden System durch innere Kräfte die Masseverteilung in bezug auf die Drehachse verändert, so verändert sich auch das Trägheitsmoment des Systems und nach dem Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses auch die Winkelgeschwindigkeit der Rotation. Man kann diese Erscheinung z. B. bei den Pirouetten der Eiskunstläufer beobachten (Bild 22/1) oder experimentell, z. B. mit Hilfe eines Drehschemels, nachweisen.
Das Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses wurde im Mittelalter für die komplizierte Steuerung von Uhrwerken genutzt (Bild 23/1), bevor das Pendelgesetz erkannt worden war.
Das Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses gilt für alle Drehbewegungen, auch für die Bewegung von Körpern auf Bahnen, die von Kreisen verschieden sind (Planeten- und Satellitenumläufe).

Die Rotationsenergie. Wie ein geradlinig bewegter Körper, so hat auch ein rotierender Körper kinetische Energie. Für eine im Abstand r vom Drehzentrum umlaufende Punktmasse m beträgt die kinetische Energie nach Gleichung (3)

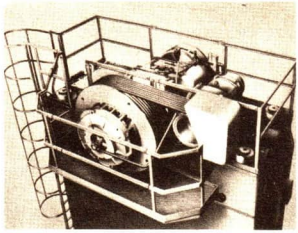
$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \cdot \omega^2 . \qquad (28)$$

Bei einem ausgedehnten, nicht punktförmig angenommenen rotierenden Körper setzt sich die Gesamtenergie aus der Summe der Energien der einzelnen Massenelemente des Körpers zusammen, es ist die

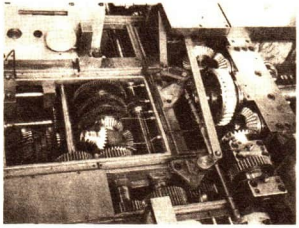
$$\textbf{Rotationsenergie} \quad W_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 . \qquad (29)$$

Rotierende Körper finden in der Technik als Speicher mechanischer Energie vielfältige Verwendung. So wird mit Hilfe von Schwungrädern oder Schwungkörpern anderer Form ein gleichmäßiger Lauf von Maschinen, oder, wie z. B. bei Pressen oder Scheren, kurzzeitig eine große Kraftwirkung erreicht.

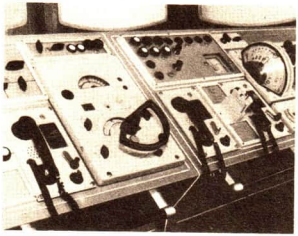
Schwungradantrieb. Kurbelpressen, Exzenterpressen und Reibspindelpressen werden während des Arbeitstaktes nicht vom Motor, sondern von einem Schwungrad angetrieben. Dem Schwungrad wird während des verhältnismäßig lang dauernden Werkzeugrücklaufs von einem Motor Rotationsenergie zugeführt. Diese Energie wird im Schwungrad gespeichert.
Während des kurzzeitigen Arbeitstaktes wird die Rotationsenergie zur Formung des Preßstückes genutzt, das Schwungrad kommt fast völlig zum Stillstand.



Trägheit rotierender Maschinenteile. Bei programmgesteuerten Werkzeugmaschinen machen die Schaltzeiten einen großen Teil der Herstellungszeit des Werkstückes aus. Je schneller eine solche Maschine geschaltet werden kann, um so produktiver ist sie. Kurze Schaltzeiten sind möglich, wenn die Rotationsenergie aller sich drehenden Teile gering ist, so daß die Maschine schnell zum Stillstand gebracht, geschaltet und wieder in Gang gesetzt werden kann. Das kann durch ein kleines Trägheitsmoment der rotierenden Teile erreicht werden.



Kreiselkompaß. Verschiedene Geräte zum Anzeigen der Lage eines Fahrzeuges enthalten einen Kreisel. Der Kreiselkörper hat auf Grund seiner Rotation die Eigenschaft, daß seine Achse ihre Richtung im Raum beibehält, wenn der Kreisel entsprechend beweglich gelagert ist (zum Beispiel durch eine kardanische Aufhängung). Solche Kreiselgeräte werden verwendet zur Stabilisierung im Kompaß, im Kurszeiger und im künstlichen Horizont sowie in den automatischen Steuergeräten von Schiffen, Flugzeugen, Raketen und Raumfahrtgeräten.



Geschoßdrall. Die Treffsicherheit eines Geschosses hängt unter anderem davon ab, daß es auf seiner Wurfbahn eine stabile Lage einnimmt. Um eine Taumelbewegung oder gar ein Überschlagen zu verhindern, erteilt man dem Geschoß in der Antriebsphase eine Drehbewegung. Auf Grund der Rotation behält die Achse des Geschosses beim Flug ihre Richtung im wesentlichen bei. Die Drehbewegung wird dem Geschoß im Geschützlauf durch die eingearbeiteten Züge vermittelt.

Gegenüberstellung der Größen und Zusammenhänge bei fortschreitender Bewegung und Drehbewegung

Fortschreitende Bewegung	Drehbewegung
Weg s	Drehwinkel σ
Geschwindigkeit $v = \frac{ds}{dt}$	Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\sigma}{dt}$
Beschleunigung $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	Winkelbeschleunigung $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\sigma}{dt^2}$
Kraft F	Drehmoment M
Masse m	Trägheitsmoment J
Impuls $m \cdot v$	Drehimpuls $J \cdot \omega$
Kinetische Energie $\frac{1}{2} m \cdot v^2$	Rotationsenergie $\frac{1}{2} J \cdot \omega^2$
Grundgesetz der Mechanik $F = m \cdot a$	Grundgesetz der Drehbewegung $M = J \cdot \alpha$
Gesetz von der Änderung des Impulses $F = \frac{d(m \cdot v)}{dt}$	Gesetz von der Änderung des Drehimpulses $M = \frac{d(J \cdot \omega)}{dt}$
Gesetz von der Erhaltung des Impulses $\sum_{k=1}^{n} m_k \cdot v_k = \text{konst.}$, falls $F = 0$	Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses $\sum_{k=1}^{n} J_k \cdot \omega_k = \text{konst.}$, falls $M = 0$
Zusammenhänge zwischen Bahn- und Winkelgrößen bei der Kreisbewegung	Weg $\sigma = \frac{s}{r}$
	Geschwindigkeit $\omega = \frac{v}{r}$
	Beschleunigung $\alpha = \frac{a}{r}$

Zum Lösen von Aufgaben aus dem Gebiet der Mechanik

Beim Lösen umfangreicherer und komplizierterer Aufgaben ist es zweckmäßig, nach einer bestimmten Methode, zum Teil auch nach einem Schema vorzugehen. Ein möglicher Weg soll am folgenden Beispiel gezeigt werden:

■ Aufgabe: Der Förderkorb eines Aufzuges hat einschließlich der Nutzlast eine Masse von 300 kg. Es wird in 4 s auf eine Steiggeschwindigkeit von $2\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ gleichmäßig beschleunigt, dann gleichförmig weiterbewegt und auf den letzten drei Metern des insgesamt 27 m langen Steigweges bis zum Stillstand gleichmäßig abgebremst. Das Zugseil des Förderkorbes wird auf eine Trommel von 280 mm Durchmesser aufgerollt.
Welches Drehmoment wirkt während der verschiedenen Phasen der Bewegung des Förderkorbes an der Welle der Seiltrommel?
Welche Gesamtarbeit wird verrichtet?
Die Reibungskraft am Seil und an der Führung des Förderkorbes wird dabei konstant mit 25 kp angenommen.

1. Analyse der Aufgabe und Gliederung

Die Aufgabe besteht aus zwei Hauptteilen: aus der Berechnung eines Drehmoments und der Berechnung einer Arbeit. Die Berechnung des Drehmoments muß dabei für jede der drei Phasen der Bewegung des Förderkorbes gesondert erfolgen, daraus ergibt sich eine weitere Untergliederung der ersten Teilaufgabe. Bei der Berechnung der Arbeit brauchen die einzelnen Bewegungsphasen nicht besonders berücksichtigt zu werden, da sich die gesuchte Arbeit nur aus der Gesamthubarbeit am Förderkorb und der Reibungsarbeit längs des gesamten Steigweges ergibt.
Die Anfertigung einer anschaulichen oder schematischen Skizze ist bei dieser Aufgabe nicht erforderlich, da die Aufgabenstellung unmittelbar einsichtig ist.

2. Lösung der ersten Teilaufgabe:

Bestimmung des Drehmoments

2.1. Analytischer Lösungsschritt: Feststellung der physikalischen Größen und Gesetzmäßigkeiten zur Bestimmung der gesuchten Größe (von der gesuchten Größe aus)

2.1.1. Drehmoment

Zur Berechnung des gesuchten Drehmoments an der Welle der Seiltrommel ist die Kenntnis der am Zugseil angreifenden Kraft und des Kraftarmes erforderlich. Von diesen Größen ist der Kraftarm gegeben, die Kraft unbekannt.

2.1.2. Kraft

Die Kraft am Zugseil setzt sich aus dem Gewicht des Förderkorbes, der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungskraft am Förderkorb und der Reibungskraft an Seil und Führung zusammen.

Das Gewicht des Förderkorbes kann aus den gegebenen Werten für die Masse und die Gravitationsbeschleunigung errechnet werden. Die Beschleunigungs- bzw. Verzögerungskraft am Förderkorb ergibt sich nach dem Newtonschen Grundgesetz aus der Masse des Förderkorbes und dessen Beschleunigung. Für die erste und die dritte Phase der Bewegung ist die Beschleunigung unbekannt, für die zweite Phase ist sie gleich 0. Die Reibungskraft an Seil und Führung ist gegeben, sie ist konstant.

2.1.3. Beschleunigung

Die Beschleunigung in der ersten und der dritten Phase der Bewegung ist gleichmäßig. Für die erste Phase sind Zeit, Anfangs- und Endgeschwindigkeit, für die dritte Phase Weg, Anfangs- und Endgeschwindigkeit gegeben. Für beide Phasen läßt sich somit die Beschleunigung nach den Gesetzen der gleichmäßig beschleunigten Bewegung berechnen.

2.2. Synthetischer Lösungsschritt: Ermittlung der Lösung aus den gegebenen physikalischen Größen und den zugrunde liegenden physikalischen Gesetzen

2.2.1. Beschleunigung

Gegeben: $v = 2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $t_1 = 4\ \mathrm{s}$; $s_3 = 3\ \mathrm{m}$

1. Bewegungsphase: $a_1 = \dfrac{v}{t_1} = \dfrac{2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{4\ \mathrm{s}} = 0{,}5\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

2. Bewegungsphase: $a_2 = 0$

3. Bewegungsphase: $a_3 = \dfrac{v^2}{2\,s_3} = \dfrac{4\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}}{2 \cdot 3\ \mathrm{m}} = 0{,}667\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

$$\left(a = \frac{v^2}{2s} \text{ folgt aus } s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad \text{und} \quad v = a \cdot t\right)$$

2.2.2. Kraft

Gegeben: $m = 300\ \mathrm{kg}$, $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$, $F_\mathrm{R} = 25\ \mathrm{kp} = 245\ \mathrm{N}$

(Die Berechnung wird mit den kohärenten Einheiten des Gesetzlichen Maßsystems durchgeführt)

Bereits errechnet: a_1; a_2; a_3

1. Bewegungsphase: $F_1 = m\,(g + a_1) + F_\mathrm{R}$
$= 300\,(9{,}81 + 0{,}5)\ \mathrm{N} + 245\ \mathrm{N}$
$= 3338\ \mathrm{N}$

2. Bewegungsphase: $F_2 = m \cdot g + F_\mathrm{R}$
$= 300 \cdot 9{,}81\ \mathrm{N} + 245\ \mathrm{N}$
$= 3\,188\ \mathrm{N}$

3. Bewegungsphase: $F_3 = m\,(g - a_3) + F_\mathrm{R}$
$= 300\,(9{,}81 - 0{,}67)\ \mathrm{N} + 245\ \mathrm{N}$
$= 2\,988\ \mathrm{N}$

2.2.3. Drehmoment

Gegeben: $r = 0{,}14$ m

Bereits errechnet: F_1; F_2; F_3

1. Bewegungsphase: $M_1 = F_1 \cdot r = 3\,338\ \text{N} \cdot 0{,}14\ \text{m}$
$= \underline{467\ \text{Nm}}$

2. Bewegungsphase: $M_2 = F_2 \cdot r = 3\,188\ \text{N} \cdot 0{,}14\ \text{m}$
$= \underline{446\ \text{Nm}}$

3. Bewegungsphase: $M_3 = F_3 \cdot r = 2\,988\ \text{N} \cdot 0{,}14\ \text{m}$
$= \underline{418\ \text{Nm}}$

Eine andere Möglichkeit der Lösung besteht darin, zunächst das Drehmoment zu errechnen, das der Summe aus dem Gewicht und der Reibungskraft entspricht (Teillösung für die 2. Bewegungsphase), und zu diesem die Drehmomente der Beschleunigungs- und der Verzögerungskraft zu addieren.

3. Lösung der zweiten Teilaufgabe:

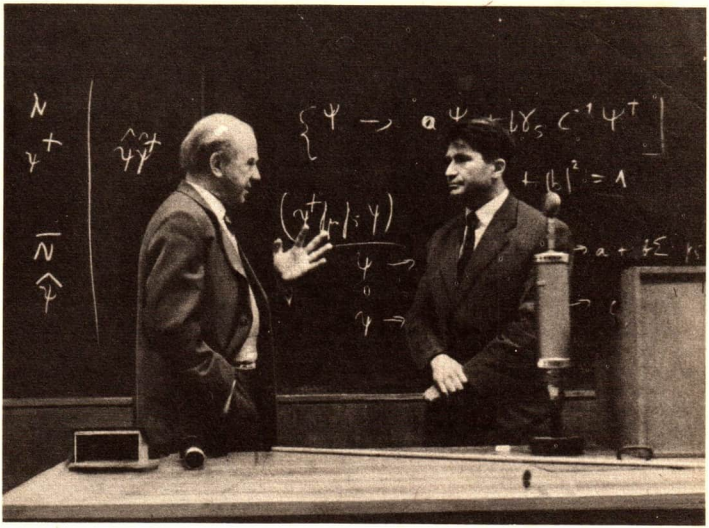
Bestimmung der Arbeit

3.1. Analytischer Lösungsschritt: Feststellung der physikalischen Größen und Gesetzmäßigkeiten zur Bestimmung der gesuchten Größe (von der gesuchten Größe aus).
Die bei der Bewegung des Förderkorbes zu verrichtende Arbeit setzt sich aus der Hubarbeit und der Reibungsarbeit zusammen. Beide Komponenten der Arbeit lassen sich als Produkt aus Kraft und Weg errechnen, da Kraftrichtung und Wegrichtung zusammenfallen. Das Gewicht des Förderkorbes wurde bereits bei der Lösung der ersten Teilaufgabe errechnet (als Zwischenergebnis), die Reibungskraft und der Weg sind gegeben.

3.2. Synthetischer Lösungsschritt: Ermittlung der Lösung aus den gegebenen physikalischen Größen und den zugrundeliegenden physikalischen Gesetzen

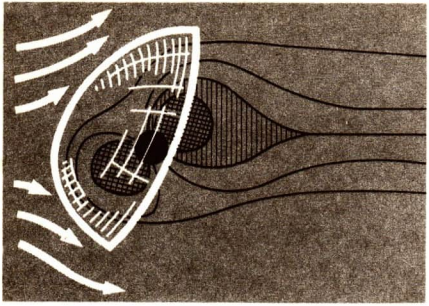
Gegeben: $F_R = 25\ \text{kp} = 245\ \text{N}$; $s = 27\ \text{m}$
Bereits errechnet: $G = m \cdot g = 300 \cdot 9{,}81\ \text{N}$
$W = (G + F_R) \cdot s = (2940 + 245)\ \text{N} \cdot 27\ \text{m}$

$$W = 86\,080\ \text{J} = 23{,}9\ \text{Wh}$$



Felder

Die Existenz physikalischer Felder ist den Menschen seit der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts bewußt. Die Felder sind seit dieser Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen, die Erkenntnisse über sie wurden zum gesicherten Bestandteil der Wissenschaft Physik. Dennoch kann man nicht von einer absolut geschlossenen Theorie sprechen. Die moderne Technik erlaubt fortschreitend tiefere Einsichten in den Mikro- und Makrokosmos und damit auch in die Eigenschaften der physikalischen Felder. So haben unsere Vorstellung vom Strahlungsgürtel der Erde in der jüngsten Vergangenheit durch die Meßergebnisse mit den künstlichen Erdsatelliten eine Korrektur erfahren. Die Weiterentwicklung der Feldtheorie ist außerdem in starkem Maße von den Leistungen der Wissenschaftler auf dem Gebiet der Mathematik und der Philosophie abhängig. Das Bild zeigt Prof. Heisenberg (links) und Prof. Migdal (rechts) bei einer wissenschaftlichen Tagung in Leipzig.



Der Begriff des Feldes

Der Begriff „Feld" bezeichnet ein materielles Objekt, das sich in der Umgebung stofflicher Körper befindet. Physikalische Felder sind nur an den Wechselwirkungen mit anderen materiellen Objekten zu erkennen. Im übertragenen Sinne spricht man auch von einem Feld einer physikalischen Größe, wobei die Verteilung ihrer Werte im Raum mit grafischen oder arithmetischen Mitteln eine Modellvorstellung des eigentlichen natürlichen Sachverhalts darstellt.

Das Feld als objektive Realität

Als Vorbereitung auf das vertiefte Eindringen in die Feldtheorie seien die verschiedenen physikalischen Felder mit ihrer Bezeichnung und einer typischen Wechselwirkungserscheinung aufgezählt:

Zwischen allen Körpern befinden sich **Gravitationsfelder** oder **Schwerefelder.** Sie bestimmen die Schwere eines Körpers an einem Punkt des Raumes und veranlassen z. B. die Bewegung zweier Himmelskörper in einem bestimmten Abstand voneinander (Bild 30/2a).

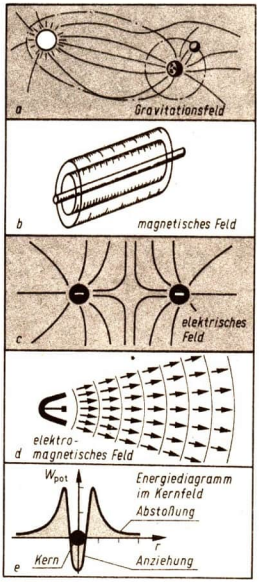
In der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters oder eines natürlichen Magneten erfahren eiserne Körper eine Bewegungsänderung, weil es dort **magnetische Felder** gibt. Die magnetischen Felder sind auch da, wenn der Mensch keine Eisenteilchen dorthin bringt (Bild 30/2b).

Trockenes Haar „steht zu Berge", und es knistert, wenn man sich kämmt, weil bei diesem Vorgang ein **elektrisches Feld** aufgebaut wird (Bild 30/2c).

Wie sollte die Übertragung von Informationen von der Erde zum Mond, ja sogar bis zur Venus, oder von fernsten Gestirnen zu unseren Radioteleskopen auf der Erde möglich sein, wenn der physikalische Träger dieser Informationen nicht objektive Realität besäße? Eine Art des physikalischen Trägers wird veränderliches **elektromagnetisches Feld** genannt (Bild 30/2d).

Die große Stabilität der meisten Atome und die sehr großen Energiebeträge, die zur Spaltung von Atomkernen aufgewendet werden müssen, sind Ausdruck des Vorhandenseins von **Kernfeldern** (Bild 30/2e).

30/2

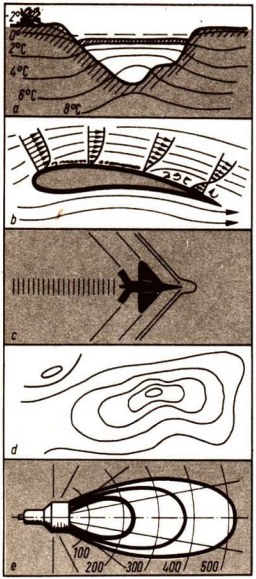


Für alle diese Felder gilt:

Physikalische Felder sind reale Objekte, die in Raum und Zeit existieren und durch Wechselwirkungen mit anderen materiellen Objekten nachgewiesen werden.

Beispiele für die Verwendung des Feldbegriffs in übertragenem Sinne sind: Temperaturfeld, Geschwindigkeitsfeld, Druckfeld, Höhenlagenfeld, Beleuchtungsstärkefeld.
Vor FARADAY (1791 bis 1867) nahmen die Naturwissenschaftler an, daß die Kräfte von einem stofflichen Körper auf den anderen unvermittelt über den Zwischenraum hinweg wirken. Diese Auffassung negierte einen objektiv realen Zustand des Raumes, der außerhalb der stofflichen Körper existiert. FARADAY war der Begründer der Feldtheorie. Aus einer Hypothese mit einfachen mechanistischen Vorstellungen wurde schrittweise eine gesicherte Theorie entwickelt, die durch Experimente ständig bestätigt wird. Am Ausbau der Feldtheorie sind berühmte Physiker wie OERSTED, AMPERE, MAXWELL, HERTZ, EINSTEIN, HEISENBERG usw. beteiligt. Gezieltes Experimentieren und theoretisches Verarbeiten haben sich hier wie bei jedem wissenschaftlichen Fortschritt gegenseitig bedingt und gefördert.

31/1
a) Temperaturfeld an der Erdoberfläche
b) Geschwindigkeitsfeld eines umströmten Tragflügelprofils
c) Druckfeld um ein Überschallflugzeug
d) Höhenlagenfeld auf einer Karte
e) Beleuchtungsstärkefeld eines Tiefstrahlers



Wechselwirkungen des Feldes mit stofflichen Körpern

Die elektrischen, magnetischen und Gravitationsfelder sind sinnlich direkt nicht wahrnehmbar. Ihr Vorhandensein ist nur indirekt durch die Wechselwirkung mit einem anderen materiellen Objekt zu erkennen.

Wirft ein Kind einen Stein in eine etwas entfernt befindliche Pfütze, so wird sich das Wasser bewegen und die Pfütze deformieren. Es liegt eine Wechselwirkung von einem stofflichen Körper, der Hand des Kindes, mit einem anderen stofflichen Körper, der Wasserpfütze, vor, vermittelt durch einen dritten stofflichen Körper, den Stein.

Wie soll aber die Bewegung des stromdurchflossenen Ankers im Raum zwischen den Polen des Magneten eines Elektromotors erklärt werden, wo keinerlei mechanische Kopplung vorliegt?
Hier treten die im Leiter bewegten elektrischen Ladungen mit dem Magneten in Wechselwirkung, vermittelt durch das im Raum um den Magneten vorhandene magnetische **Feld.** Die Wechselwirkung findet also direkt zwischen dem Ladungsträger (einem stofflichen Körper) und dem Felde statt, durch das er sich bewegt. Sie ist Ursache für die beobachtbare Wirkung, in diesem Fall die Bewegungsänderung des Motorankers. Die Wechselwirkung vom Magneten über das Magnetfeld zum Anker verläuft auch nicht augenblicklich,

sondern in einem bestimmten, wenn auch sehr kurzen Zeitintervall.

Ortsveränderungen stofflicher Teilchen in elektromagnetischen Feldern sind auch der entscheidende physikalische Effekt in der Fernsehröhre oder in Teilchenbeschleunigern. Eine andere Wirkung der gleichen Ursache kann eine Leuchterscheinung sein, z. B. das Nordlicht, welches durch Wechselwirkung von Höhenstrahlungskorpuskeln mit dem Magnetfeld der Erde entsteht. Mit künstlichen Raumsonden wurde die veränderliche Deformierung des Magnetfeldes der Erde als Folge der Wechselwirkung mit Strahlungsfeldern der Sonne (sog. Sonnenwind) festgestellt (Bild 30/1).

▷ **Aus Wechselwirkungen zwischen materiellen Objekten ist auf das Vorhandensein von Feldern und auf ihre Eigenschaften zu schließen.**

32/1 Nordlicht

Feldgrößen und ihre Messung

Der nächste Schritt in der Erkenntnisfindung ist das *Definieren* von Größen zur Beschreibung des Feldes. Das kann nur unter Ausnutzung der zu beobachtenden Wechselwirkungen und unter Verwendung meßbarer Größen an den ins Feld gebrachten stofflichen Körpern geschehen. Als Beispiel sei die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ angeführt (↗ LB Physik Kl. 9):

Zu beobachtende Wirkung:

Beschleunigung eines ladungstragenden Körpers in einem elektrischen Feld

meßbare Größen am „Probekörper":

ablenkende Kraft $\vec{F}$

Ladung Q

Definition:

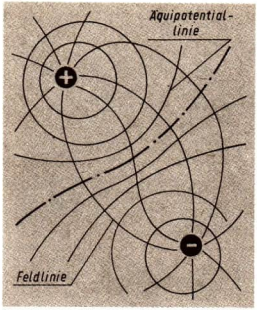
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}.$$

Die vektorielle Größe $\vec{E}$, genannt elektrische Feldstärke, ist charakteristisch für den Punkt des Feldes, an dem die Messung ausgeführt wurde.

● *Welche Bedingungen sind mit der Definition von $\vec{E}$ verknüpft? Beschreiben Sie den Meßvorgang!*

Die Struktur der Felder

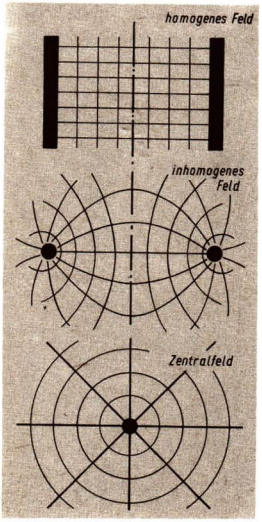
Aus den Meßwerten der definierten Größen kann man auf die Eigenschaften des Feldes im Raum schließen. Dazu müssen an möglichst vielen Punkten des Raumes Messungen



33/1 Äquipotentiallinien und Feldlinien

der gleichen Größe, z. B. $\vec{E}$, vorgenommen worden sein. Notiert man die Meßergebnisse von vielen Punkten einer Ebene auf Papier und verbindet alle diese Punkte gleicher Beträge, so erhält man die sogenannten **Äquipotentiallinien.** Die Menge der Linien, die senkrecht auf ihnen stehen und sie schneiden, beginnen und enden jeweils auf den Körpern, auf denen die felderzeugenden Ladungen sitzen. Längs dieser Linien würde sich ein ins Feld gebrachter Probekörper bewegen. Sie heißen **Kraftlinien** des elektrischen Feldes, oft auch einfach Feldlinien genannt. Ein solches Linienbild ist nicht nur für eine Fläche, sondern für den ganzen felderfüllten Raum konstruierbar. Das Feld erhält damit eine Struktur. Die Linien könnte man unendlich dicht zeichnen. Selbstverständlich ist dieses Strukturbild von der gewählten Größe abhängig, von deren Messungen man ausgegangen ist. In unserem Fall handelt es sich um das Kraftlinienbild der Größe $\vec{E}$. Es ist eine Modellvorstellung für die Struktur des elektrischen Feldes. Andere Größen (z. B. die Temperatur T) würden andere Strukturbilder des Feldes ergeben.
Das wirkliche elektrische Feld erfüllt den Raum kontinuierlich. Diese Eigenschaft ist zeichnerisch gar nicht darstellbar.

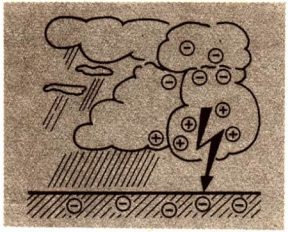
33/2 Verschiedene Feldarten



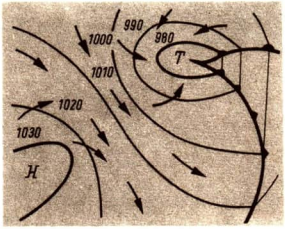
Das physikalische Feld in philosophischer Sicht

Alle bisher getroffenen Aussagen über die Felder enthielten nur physikalische und mathematische Begriffe. Nun soll eine Verallgemeinerung auf der Ebene der Philosophie vorgenommen werden. Das ist zur Schaffung eines wissenschaftlichen Weltbildes unbedingt notwendig, denn gerade am Beispiel der physikalischen Felder wurden und werden von Verfechtern idealistischer philosophischer Richtungen unwissenschaftliche Auffassungen vertreten.
Eine wirklich wissenschaftliche Erklärung im Sinne der theoretischen Verallgemeinerung aller empirischen Erfahrungen gibt der dialektische Materialismus. Nach ihm sind **Stoff und Feld zwei verschiedene physikalische Strukturformen der Materie,** die ineinander umwandelbar sind. Beide existieren außerhalb und unabhängig vom Bewußtsein der Menschen.
In den physikalischen Feldern dokumentiert sich eine wesentliche Seite der materiellen Einheit der Welt.
Von philosophischen Idealisten werden die Begriffe Stoff und Materie gleichgesetzt, Felder als nicht materiell betrachtet, und das Entstehen radioaktiver Strahlung wird als Entmaterialisierung bezeichnet. Umgekehrt würden aus dieser Sicht bei stellaren Prozessen stoffliche Körper aus dem Nichts entstehen, und zur Erklärung dieses Aktes bedarf es dann eines Schöpfers.

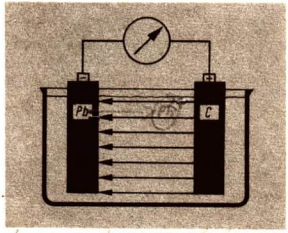
Gewitter. Die in Gewitterwolken vorhandenen Wassertröpfchen werden durch den meist starken vertikalen Wind zersprüht. Dabei tritt eine Ladungstrennung ein, weil in den Wassertröpfchen infolge Influenz eine ungleichmäßige Ladungsverteilung besteht. Durch die Ladungstrennung entsteht ein besonderes elektrisches Feld im Gewittergebiet. Der Ladungsausgleich und damit der Abbau des elektrischen Feldes geschieht meistens in Form eines Blitzes.
Die bei Blitzentladungen umgewandelte Energie ist kleiner, als meist erwartet wird (z. B. $U = 2 \cdot 10^6$ V; $I = 5 \cdot 10^4$ A; $\Delta t = 10^{-3}$ s).



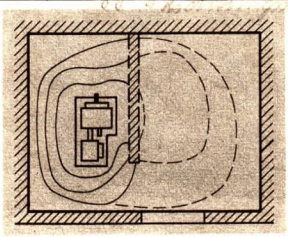
Wetter. Wettererscheinungen sind eine Folge der Bewegungen großer Luftmassen. Diese Luftbewegung kommt durch die unterschiedliche Luftdruckverteilung zustande.
Luft strömt aus Gebieten mit Hochdruck (H) in Tiefdruckgebiete (T).
Aus der Luftdruckverteilung, der Bewegungsrichtung der Hochdruck- und Tiefdruckgebiete und anderen Faktoren läßt sich eine Wettervorhersage durchführen. Die Wetterkarte mit den Luftdrucklinien stellt ein Druckfeld dar. (Hier wird der Begriff Feld im übertragenen Sinne benutzt.)



Galvanisches Element. Zwei Platten aus verschiedenen Metallen bilden nach dem Eintauchen in eine Säure eine Spannungsquelle. Aus dem Metall der einen Platte gehen positive Ionen in die Säure (entsprechend der elektrochemischen Spannungsreihe). Die zu diesen Ionen gehörenden Elektronen bleiben auf der Metallplatte und laden diese negativ. Die unterschiedliche Ladung der beiden Platten ist die Ursache eines elektrischen Feldes.
Beim Herstellen eines äußeren Stromkreises bewegen sich die Elektronen zur anderen Platte, und die positiven Metallionen wandern in Richtung der Kraftlinien des Feldes in der Säure ebenfalls zur anderen Platte.

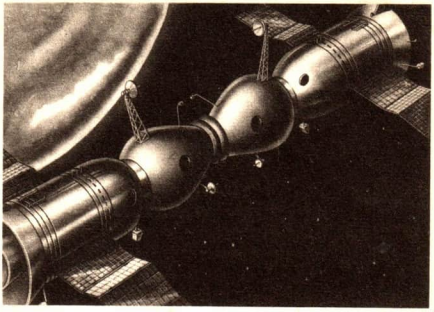


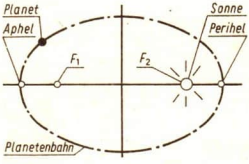
Lärmbekämpfung. Zum Zwecke der Gesunderhaltung der Menschen werden von Organen des Arbeits- und Unfallschutzes in Betrieben mit großer Lärmentwicklung Untersuchungen durchgeführt. Die Messungen der Lärmstärke ergeben mitunter eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Schallenergie im Raum. Auf Grund der Erkenntnisse über das Lärmfeld kann mit meist einfachen Mitteln bereits eine erhebliche Verringerung der Lärmbelästigung erreicht werden (Das sog. Lärmfeld ist ein Feld im übertragenen Sinne.)



Das Gravitationsfeld

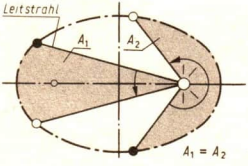
Die Gravitation, die gegenseitige Anziehung der Körper auf Grund ihrer Masse, ist eine allgemeine physikalische Gesetzmäßigkeit der Materie. Sie wirkt zwischen den Himmelskörpern in prinzipiell gleicher Weise wie zwischen den Molekülen eines Gases. Allerdings sind die Beträge der Gravitationskräfte abhängig von der Masse der Körper. Bei dem Kopplungsmanöver der sowjetischen Raumschiffe Sojus 4 und 5 z. B. spielten sie keine Rolle, wohl aber beim Flug eines Raumschiffs um die Erde.



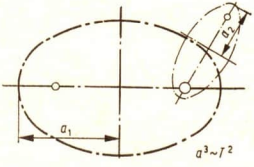


35/2

35/3



35/4



Die Keplerschen Gesetze

Gestützt auf die Theorie des großen polnischen Gelehrten NIKOLAUS KOPERNIKUS (1473 bis 1543) über den Umlauf der Planeten um die Sonne untersuchte der deutsche Mathematiker und Astronom JOHANNES KEPLER (1571 bis 1630) die zahlenmäßigen Zusammenhänge bei der Bewegung der Planeten. Er griff dabei vor allem auf die umfangreichen Beobachtungsergebnisse des dänischen Astronomen TYCHO BRAHE (1546 bis 1601) zurück.

KEPLER versuchte zunächst, die beobachteten Abweichungen im Lauf der Planeten gegenüber der ursprünglich angenommenen gleichförmigen Kreisbewegung durch eine Bewegung auf exzentrischen Kreisen zu erklären.

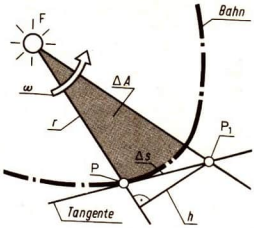
Aber diese Annahme ließ sich mit den Beobachtungen nicht voll in Einklang bringen, wenngleich die Abweichungen im allgemeinen geringer waren als bei der ursprünglichen Annahme. Nach mehrjähriger theoretischer und rechnerischer Arbeit fand KEPLER schließlich Gesetze, die den Beobachtungen mit großer Genauigkeit entsprachen. Die ersten zwei der im folgenden genannten drei Gesetze wurden im Jahr 1609 („Astronomia nova"), das dritte wurde im Jahre 1619 („Harmonices mundi") veröffentlicht.

1. Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2. Ein von der Sonne zum Planeten weisender Leitstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

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

Aus dem zweiten Keplerschen Gesetz folgt, daß die Planetenbahnen, sofern sie nicht kreisförmig sind (Kreis als Sonderfall der Ellipse, bei dem beide Brennpunkte mit dem Mittelpunkt zusammenfallen), mit veränderlicher Bahngeschwindigkeit durchlaufen werden. Die Bahngeschwindigkeit ist im sonnennächsten Punkt, im *Perihel*, am größten und im sonnenfernsten Punkt, im *Aphel*, am kleinsten. Die Winkelgeschwindigkeit des Planeten ist durch die Richtungsänderung je Zeiteinheit des Leitstrahls, der den Planeten mit dem Zentrum (dem Sonnenmittelpunkt) verbindet bestimmt; sie ist im allgemeinen ebenfalls veränderlich.



36/1 Zum zweiten Keplerschen Gesetz

- *Verfolgen Sie in Bild 35/3 den Lauf des Planeten und stellen Sie fest, wie sich Bahn- und Winkelgeschwindigkeit während eines Umlaufs verändern!*

Das zweite Keplersche Gesetz entspricht dem Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses, wie aus der folgenden Überlegung hervorgeht:

In Bild 36/1 bedeutet Δs den Weg und ΔA die vom Leitstrahl überstrichene Fläche in der Zeitspanne Δt.
Δt sei so klein angenommen, daß während dieser Zeit die Winkelgeschwindigkeit ω des Leitstrahles als konstant betrachtet werden kann. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, ΔA durch die Fläche des Dreiecks FPP_1 zu ersetzen, wobei dessen Höhe h durch das Kreisbogenstück $r \cdot \omega \cdot \Delta t$ angenähert dargestellt werden kann:

$$A = \frac{1}{2} r^2 \cdot \omega \cdot \Delta t \,. \qquad (30)$$

Nach dem zweiten Keplerschen Gesetz ist $\Delta A / \Delta t$ für jedes Bahnstück konstant, es ergibt sich somit

$$\frac{1}{2} r^2 \cdot \omega = \text{konstant.} \qquad (31)$$

Da der Drehimpuls des umlaufenden Planeten $D = J \cdot \omega = 0{,}5\, m \cdot r^2 \cdot \omega$ beträgt und die Masse m des Planeten konstant ist, resultiert aus dem Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses $D =$ konstant (für $M = 0$) ebenfalls

$$0{,}5\, r^2 \cdot \omega = \text{konstant.}$$

Aus Gleichung (31) folgt unmittelbar, daß die Winkelgeschwindigkeit der Planetenbewegung dem Quadrat des Abstandes des umlaufenden Körpers vom Zentrum umgekehrt proportional ist. Daraus ergibt sich, daß die Bahngeschwindigkeit des Körpers dem Abstand der Bahntangente vom Zentrum umgekehrt proportional ist.

- *Beweisen Sie diesen Zusammenhang mit der Skizze in Bild 36/1!*

Da bei einer elliptischen Bahn die Richtung des Leitstrahls Sonne — Planet im allgemeinen nicht senkrecht auf der Richtung

der Bahntangenten steht, hat die zur Sonne hin gerichtete Beschleunigung nicht nur eine Komponente senkrecht zur Bahnrichtung, sondern auch eine Komponente in Bahnrichtung, die bewirkt, daß die Umlaufbewegung des Planeten ungleichförmig ist.

Die hier formulierten Keplerschen Gesetze geben die Bewegung der Planeten nur in Annäherung wieder. Die Abweichungen sind auf die gegenseitige Beeinflussung der Planeten und auf die Tatsache zurückzuführen, daß sich die Masse der Planeten, obwohl sie gegenüber der Masse der Sonne sehr gering ist, ebenfalls auf die Bewegung auswirkt.

Das Gravitationsgesetz

ISAAK NEWTON erkannte die Ursache der durch die Keplerschen Gesetze gekennzeichneten Planetenbewegung. Er stützte sich im wesentlichen auf folgende Überlegungen:
Aus dem ersten Keplerschen Gesetz läßt sich folgern, daß auf die Planeten eine nach der Innenseite der Bahn gerichtete Kraft wirkt. Aus dem zweiten Keplerschen Gesetz ergibt sich, wie nur hier mitgeteilt werden soll, daß diese Kraft stets zur Sonne hin gerichtet ist.
Bei der Berechnung der zwischen Sonne und Planet wirkenden Kraft darf man die Planetenbahnen durch Kreise mit dem Radius ihrer großen Halbachse annähern und allgemein die Gleichung für die Radialkraft von Seite 13, Gleichung (7) anwenden. Bedeutet F_R die zwischen der Sonne und dem Planeten wirkende Kraft, m_1 die Masse der Sonne, m_2 die Masse des Planeten, r den Abstand des Planeten von der Sonne und T seine Umlaufzeit, so ist

$$F_R = m_2 \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r, \text{ d. h.}$$

$$F_R \sim \frac{m_2 \cdot r}{T^2}. \tag{32}$$

Da nach dem dritten Keplerschen Gesetz $T^2 \sim r^3$ ist, ergibt sich

$$F_R \sim \frac{m_2}{r^2}. \tag{33}$$

Nach dem dritten Newtonschen Gesetz ist die zwischen der Sonne und dem Planeten auftretende Kraft eine gegenseitig wirkende Kraft, deshalb muß F auch von m_1 ebenso abhängen wie von m_2.
Daraus folgt

$$F \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \tag{34}$$

und nach Einführung eines Proportionalitätsfaktors k ergibt sich die

▶ **Gravitationskraft** $F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$. (35)

Diese Beziehung, **das Gravitationsgesetz,** gilt nicht nur für Sonne und Erde, sondern allgemein.

Der Proportionalitätsfaktor k heißt **Gravitationskonstante.** Bei seinen Überlegungen verglich NEWTON auch die Beschleunigung, die der Mond und die ein Körper in Nähe der Erdoberfläche erfahren. Da sich der Mond annähernd gleichförmig auf einer von einem Kreis nur wenig abweichenden Bahn bewegt, läßt sich mit Hilfe der Gleichung für die Radialbeschleunigung die Beschleunigung a_M ermitteln, die der Mond infolge der Gravitation zwischen Erde und Mond erfährt. Es ist die

Mondbeschleunigung $a_M = 0{,}27\ \mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-2}$.

Der Mond hat von der Erde eine Entfernung, die etwa gleich dem 60fachen des Erdradius, der Entfernung der Erdoberfläche vom Erdmittelpunkt, ist. Da die Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche ($g = 981\ \mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-2}$) etwa gleich dem 3600-($60^2$)fachen der Gravitationsbeschleunigung in Mondentfernung ($a_M = 0{,}27\ \mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-2}$) ist und damit dem Entfernungsgesetz für die Gravitationskraft entspricht, schloß NEWTON, daß auch das Gewicht irdischer Körper nichts anderes ist als die zwischen der Erde und den an ihrer Oberfläche befindlichen Körpern wirkende Gravitationskraft.

Die erste quantitative Bestimmung der Gravitationskraft zwischen irdischen Körpern und damit auch die erste experimentelle Ermittlung der Gravitationskonstanten k gelang dem englischen Physiker HENRY CAVENDISH (1731 bis 1810) im Jahre 1798 mit Hilfe einer Drehwaage (Bild 38/1).

Der von CAVENDISH gewonnene Wert für die Gravitationskonstante war noch recht ungenau. Genauere Messungen führten die deutschen Physiker RICHARZ und KRIGAR-MENZEL im Jahre 1896 in den Spandauer Kasematten in Berlin aus (Bild 39/1).

Gegenwärtig gilt als gesicherter Wert für die

▷ **Gravitationskonstante** $k = (6{,}670 \pm 0{,}007) \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2}$.

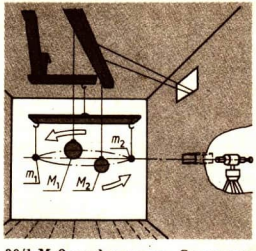
Mit Hilfe des Gravitationsgesetzes lassen sich die Massen von Himmelskörpern errechnen.

■ Es ist die Masse der Sonne zu berechnen.

Die Entfernung der Erde von der Sonne, genauer des Erdmittelpunktes vom Sonnenmittelpunkt, werde mit r bezeichnet, es ist annähernd $r = 150 \cdot 10^6\ \mathrm{km} = 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m}$.

Die Umlaufzeit der Erde (Masse m_E) um die Sonne beträgt $T = 365{,}25\ \mathrm{d} \approx 3{,}156 \cdot 10^7\ \mathrm{s}$.

Gesucht sind die zur Sonne hin gerichtete Beschleunigung der Erde und die Masse der Sonne m_S.



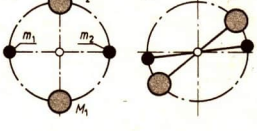
38/1 Meßanordnung von CAVENDISH

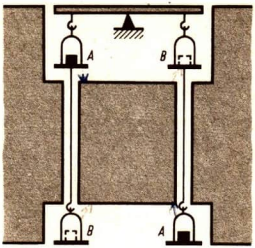
In einer gegen Luftströmung und Wärmeeinfluß geschützten Kammer sind an einem Querbalken in etwa 1,8 m Abstand zwei Bleikugeln M_1 und M_2 mit einer Masse von je 158 kg in gleicher Höhe hängend angebracht. Zwei weitere, kleinere Bleikugeln m_1 und m_2 mit einer Masse von je 703 g befinden sich an den Enden eines leichten hölzernen Stabes. Dieser Stab ist an einem etwa meterlangen dünnen Draht so aufgehängt, daß die kleinen Bleikugeln die gleiche Höhe wie die großen haben.

Durch die Gravitation der einander genäherten Kugeln erhält der bewegliche leichte Stab ein Drehmoment, das den Aufhängedraht soweit verdrillt, bis Gleichgewicht zwischen der Gravitationskraft und der (auf den gleichen Hebelarm bezogenen) Torsionskraft eingetreten ist.

Die wegen der Kleinheit der Gravitationskraft sehr geringe Ablenkung des Stabes gegenüber der Ausgangslage wurde mittels eines in der Kammerwand eingelassenen Fernrohres gemessen.

38/2 Lage der Kugeln in der Drehwaage





39/1 Meßanordnung von RICHARZ und KRIGAR-MENZEL

An den Enden des Balkens einer empfindlichen Waage sind vier Waagschalen aufgehängt, und zwar zwei oberhalb und zwei an langen Fäden unterhalb eines Bleiklotzes von etwa 2 m³ Volumen.

Beim Versuch wurde ein Kilogrammstück auf eine Schale oberhalb, ein zweites auf der anderen Seite unterhalb des Bleiklotzes aufgelegt (A—A). Danach wurden die Plätze der Kilogrammstücke verändert (B—B).

Gegeben:

$r = 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m}$

$T = 3{,}156 \cdot 10^{7}\ \mathrm{s}$

$a_E = \dfrac{F}{m_E}$

Gesucht:

a_E

m_S

Lösung:

$$a_E = \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}$$

$$a_E = \frac{4\pi^2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m}}{3{,}156^2 \cdot 10^{14}\ \mathrm{s}^2}$$

$$\underline{\underline{a_E \approx 0{,}0059\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}}}$$

$$m_S = \frac{a_E \cdot r^2}{k} \qquad \left(\text{aus } a_e \cdot m_E = k \cdot \frac{m_S \cdot m_E}{r^2}\right)$$

$$m_S \approx \frac{0{,}0059\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} \cdot 1{,}5^2 \cdot 10^{22}\ \mathrm{m}^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg}^{-2}}$$

$$\underline{\underline{m_S \approx 1{,}99 \cdot 10^{30}\ \mathrm{kg}}}$$

Das Gravitationsfeld

Nach dem Gravitationsgesetz wirkt zwischen zwei Körpern eine Kraft, die von der Masse und vom gegenseitigen Abstand der Körper abhängig ist. Diese Kraft hat ihre Ursache in dem **Gravitationsfeld,** von dem jeder Körper umgeben ist. Das Gravitationsfeld eines Körpers wird von seiner (schweren) Masse hervorgerufen (auch einer Punktmasse, die bei theoretischen Überlegungen anstelle eines Körpers betrachtet wird, ist ein Gravitationsfeld zuzuschreiben).

Wie jedes physikalische Feld, z. B. das elektrische Feld, läßt sich das Gravitationsfeld durch seine Kraftwirkung auf einen Probekörper nachweisen. Wird ein Probekörper mit der Masse m' in das Gravitationsfeld eines Körpers mit der Masse m gebracht, so wirkt auf ihn eine Kraft F ein.

Der Quotient aus der Kraft F und der Masse m' des Probekörpers enthält keine physikalischen Größen mehr, die von der Beschaffenheit des Probekörpers abhängen; er dient zur Kennzeichnung des vom Probekörper unabhängigen Gravitationsfeldes des Körpers mit der Masse m.

Der Quotient F/m führt — in Analogie zu anderen Feldern — die Bezeichnung *Gravitationsfeldstärke E.*

Die Gravitationsfeldstärke ist wie die Gravitationskraft eine vektorielle Größe, sie hat gleiche Richtungen und gleichen Richtungssinn wie die Gravitationskraft. Aus der Beziehung F/m wird deutlich, daß die Feldstärke eines Gravitationsfeldes die Größenart einer *Beschleunigung* hat. Sie gibt an, welche Beschleunigung ein Körper beliebiger Masse erhält, der sich im jeweils betrachteten Punkt des Gravitationsfeldes befindet.

Wird der Körper mit der Masse m punktförmig, d. h. als Punktmasse angenommen, so läßt sich die Kraft F, die auf einen Probekörper mit der Masse m einwirkt, der sich im Abstand r befindet, nach dem Gravitationsgesetz berechnen:

$F = \frac{k \cdot m \cdot m'}{r^2}$. Daraus folgt mit $E = \frac{F}{m'}$ die

▷ **Gravitationsfeldstärke** $E = \frac{k \cdot m}{r^2}$. (36)

Aus dieser Gleichung geht hervor, daß das Gravitationsfeld einer Punktmasse ein kugelsymmetrisches Zentralfeld ist; seine Feldstärke nimmt mit dem Quadrat der Entfernung vom Zentrum ab (Bild 40/1).

Bereits NEWTON hatte nachgewiesen, daß das Gravitationsfeld einer homogenen oder aus verschiedenen, aber in sich homogenen Schichten zusammengesetzten Kugel, soweit es außerhalb des Körpers liegt, gleichfalls ein kugelsymmetrisches Feld mit dem Mittelpunkt des Körpers als Zentrum ist, d. h. daß es als Feld einer Punktmasse dargestellt werden kann.
Der Erdkörper läßt sich in erster Näherung durch eine Kugel kennzeichnen, die sich aus homogenen Schichten zusammensetzt; daraus ergibt sich die Annahme eines kugelsymmetrischen Gravitationsfeldes mit dem Erdmittelpunkt als Zentrum.

■ Welchen Wert hat die Gravitationsfeldstärke des Erdfeldes in einer Höhe von 1600 km über der Erdoberfläche (größte Flughöhe des sowjetischen Erdsatelliten Sputnik II)?

Gegeben:

$k = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$

$M = 5{,}98 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg}$

$r = 7{,}97 \cdot 10^{6}\,\mathrm{m}$

Gesucht:

E

Lösung (2. Weg):

Lösung: (1. Weg):

$E = k\frac{M}{r^2}$

$E = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}} \times$
$\times \frac{5{,}98 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg}}{7{,}97^2 \cdot 10^{12}\,\mathrm{m^2}}$

$\underline{\underline{E = 6{,}28\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}}}$

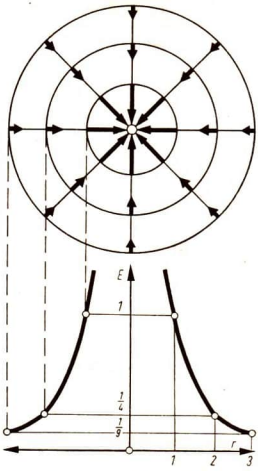
Da 1600 km ungefähr $^1/_4$ des Erdradius sind, verhalten sich die Entfernungen vom Erdzentrum zu einem Punkt in 1600 km Höhe über der Erdoberfläche und zu einem Punkt auf der Erdoberfläche annähernd 5:4. Somit ist das Verhältnis der Gravitationsfeldstärken an diesen Punkten etwa $\left(\frac{1}{5}\right)^2 : \left(\frac{1}{4}\right)^2 = 16:25 = 64:100$.

Demnach beträgt die Gravitationsfeldstärke in 1600 km Höhe 64% der Gravitationsfeldstärke auf der Erdoberfläche, somit ist

$E = 0{,}64 \cdot 9{,}81\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$

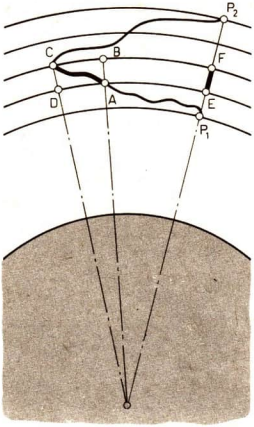
$\underline{\underline{E = 6{,}28\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}}}$.

Für eine genauere Erklärung der Gravitationserscheinungen in Nähe der Erdoberfläche ist jedoch diese erste Näherung nicht ausreichend. Infolge der ellipsoidischen Form des Erdkörpers und der ungleichmäßigen Masseverteilung in der Erdkruste weicht die Richtung der Gravitationsfeldstärke im allgemeinen etwas von der Richtung zum Erdmittelpunkt ab, ihr Betrag variiert gleichfalls gegenüber dem Wert, den die Annahme eines kugelsymmetrischen Feldes ergibt.



40/1 Gravitationsfeld einer Punktmasse

40/2 Geologe mit Gravimeter bei Erkundungsarbeit
Aus örtlichen Abweichungen der Gravitationsfeldstärke der Erde kann man auf das Vorhandensein von Bodenschätzen schließen. Sie werden mit Hilfe von Gravimetern ermittelt.



41/1 Zur Arbeit im Gravitationsfeld

Die Arbeit im Gravitationsfeld. Wird ein Körper in Nähe der Erdoberfläche auf eine bestimmte Höhe gehoben, so ist die Arbeit nur von der Hubhöhe abhängig und nicht vom Weg, längs dessen der Körper befördert wird. Diese Beziehung gilt für die Gravitation allgemein.

Zum Beweis wird (wie im Bild 41/1) ein Zentralfeld in konzentrische Kugelschalen geringer Dicke unterteilt. In dem kleinen Gebiet in jeder Schale, das vom krummlinigen Weg P_1P_2 durchsetzt wird (ABCD), kann das Feld als homogen angesehen werden. Die Arbeit längs des Wegstückes $\overline{AC}$ ist

$$W_{AC} = F \cdot \overline{AC} \cdot \cos(\overline{DAC}),$$

diese ist aber gleich der Arbeit

$$W_{AB} = F \cdot \overline{AB}$$

und damit gleich der Arbeit längs des betreffenden Teilstücks $\overline{EF}$ der zentralen Verbindungsstrecke $\overline{P_1P_2}$. Durch Summenbildung aus den Teilbeträgen ergibt sich der Gesamtbetrag der Arbeit.

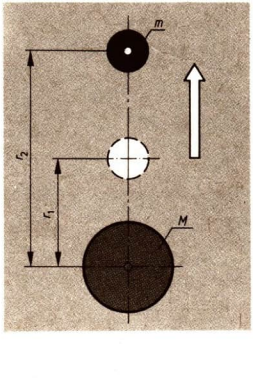
In einem Gravitationsfeld ist die Arbeit, die bei der Bewegung eines Körpers zwischen zwei bestimmten Punkten aufgewendet wird, vom Weg des Körpers unabhängig. ◁

In einem zentralen Gravitationsfeld ist die Kraft ortsabhängig; die Arbeit W, die aufgewendet oder abgegeben wird, wenn sich ein Körper mit der Masse m im Gravitationsfeld eines Zentralkörpers mit der Masse M bewegt, kann mit Hilfe der Integralrechnung bestimmt werden. Die Integrationsgrenzen ergeben sich aus der Anfangs- und der Endlage des Körpers in den Entfernungen r_1 bzw. r_2 vom Zentrum (Bild 41/2). Es ist

$$W = \int_{r_1}^{r_2} F \cdot \mathrm{d}s, \qquad W = \int_{r_1}^{r_2} \frac{k \cdot M \cdot m}{r^2}\,\mathrm{d}r,$$

$$W = k \cdot M \cdot m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \tag{37}$$

41/2 Verschiebung einer Punktmasse im Gravitationsfeld eines Zentralkörpers



Es ist die Arbeit zu berechnen, die notwendig ist, um einen Körper von 1 kg Masse von der Erdoberfläche aus auf Mondentfernung zu bringen. ■

Gegeben:

$k = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$

$M = 5{,}98 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$

$m = 1\ \mathrm{kg}$

$r_1 = 6{,}37 \cdot 10^{6}\ \mathrm{m}$

$r_2 = 3{,}84 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m}$

Gesucht:

W

Lösung: $W = k \cdot M \cdot m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$

$$W = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}} \times 5{,}98 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg} \cdot 1\ \mathrm{kg} \times \left(\frac{1}{6{,}37 \cdot 10^{6}} - \frac{1}{3{,}84 \cdot 10^{8}}\right)\mathrm{m^{-1}},$$

$$W = 6{,}67 \cdot 5{,}98 \cdot 1{,}54 \cdot 10^{6}\ \mathrm{N \cdot m}$$

$$\underline{\underline{W = 6{,}14 \cdot 10^{7}\ \mathrm{N \cdot m}}}$$

Dieser Betrag entspricht ungefähr einer Energie von 17 kWh. Daraus ist ersichtlich, welch große Energie benötigt wird, um einen Flugkörper in den kosmischen Raum zu entsenden. Die sowjetische Raumsonde „Proton 4" hat ohne die letzte Raketenstufe eine Masse von etwa 17 t; die Masse der „Sojus-Raumschiffe, die aus mehreren Sektionen bestehen, ist ähnlich groß.

Kosmische Geschwindigkeiten. Wird ein Körper in der Nähe der Erdoberfläche fortgeschleudert, so trifft er im allgemeinen in geringerer oder größerer Entfernung auf dem Erdboden auf, je nach seiner Anfangsgeschwindigkeit. Im folgenden soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen ein Körper nicht mehr auf den Erdboden zurückfällt, sondern sich auf einer kosmischen Bahn bewegt.

Dazu werden folgende vereinfachende Annahmen gemacht: Der Körper habe im Vergleich mit der Erde eine sehr kleine Masse, er werde horizontal fortgeschleudert und bewege sich ohne Luftwiderstand. Das Erdfeld wird kugelsymmetrisch aufgefaßt. Unter diesen Bedingungen unterliegt der Körper bei seinem Flug nur den Kräften im Gravitationsfeld der Erde, für ihn gelten die Gesetze der Planetenbewegung und das Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie.

Nach den Gesetzen der Planetenbewegung ist die Bahn des Körpers ein Kegelschnitt, von dem ein Brennpunkt im Erdmittelpunkt liegt (Bild 42/1).

Diese Aussage ergibt sich als Verallgemeinerung des ersten Keplerschen Gesetzes, sie folgt aus der Theorie der Bewegung in einem Zentralfeld, nach der neben den geschlossenen Kurven Kreis und Ellipse auch die nicht geschlossenen Kurven in Form von Kegelschnitten als Bahnformen möglich sind.

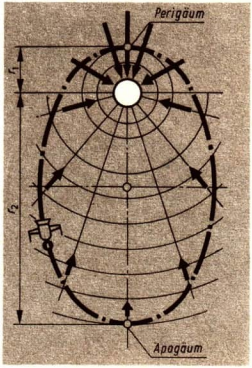
Da der Abflug des Körpers (nach Beendigung des Aufstiegs) horizontal, d. h. senkrecht zum Erdradius erfolgen soll, ist der Punkt des Abfluges Scheitelpunkt der Kegelschnittbahn. Er soll bei unseren Überlegungen zunächst als Punkt angenommen werden, der dem Erdzentrum am nächsten liegt, das heißt als das *Perigäum* der Bahn.

Nun soll errechnet werden, welche Arbeit verrichtet werden muß, um den Körper auf einer elliptischen Bahn vom Perigäum (Entfernung r_1) in den Punkt mit der größten Entfernung vom Erdzentrum, das *Apogäum* (Entfernung r_2) zu bewegen (Bild 42/1).

Nach dem Gesetz über die Arbeit im Gravitationsfeld, Gleichung (37), ist die erforderliche Arbeit der Differenz der Beträge der kinetischen Energie des Körpers im Perigäum und im Apogäum gleich.

Ist v_1 die Geschwindigkeit des Körpers im Perigäum, v_2 dessen Geschwindigkeit im Apogäum, so gilt

$$k \cdot M \cdot m \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{m}{2} \left(v_1^2 - v_2^2 \right) . \qquad (38)$$



42/1 Bahn eines Erdsatelliten (schematisch) im Zentralfeld der Erde

Nach dem zweiten Keplerschen Gesetz sind im Perigäum und im Apogäum die Geschwindigkeiten den Entfernungen vom Zentrum umgekehrt proportional:

$$v_1 : v_2 = r_2 : r_1 \,. \tag{39}$$

Leiten Sie die Proportionalität (39) *mit Hilfe von* (31) *her!* ●

Schließlich ist aus den Größen r_1 und v_1, den Werten für das Perigäum, die Größe r_2, die uns Aufschluß über die Form der Bahn gibt, zu ermitteln; denn die Summe $r_1 + r_2 = 2\,a$, d. h. die große Achse der Bahnellipse.

Dazu muß v_2 eliminiert werden. Wird Gleichung (39) nach v_2 umgestellt, der Ausdruck für v_2 in die Gleichung (38) eingesetzt und die Gleichung nach r_2 aufgelöst, so ergibt sich

$$r_2 = \frac{r_1}{\dfrac{2\,k \cdot M}{r_1 \cdot v_1^2} - 1} \,. \tag{40}$$

Aus der Gleichung (40) lassen sich wichtige Schlüsse ziehen.

Erstens: Die Gleichung enthält die Masse m nicht, d. h. sie gilt für Körper beliebiger Masse.

Zweitens: Geht man von einer bestimmten Perigäumsentfernung r_1 aus und verändert die Geschwindigkeit v_1 in diesem Punkte, so ändert sich die Apogäumsentfernung r_2.

Soll der Körper eine Kreisbahn in der Entfernung r vom Erdmittelpunkt durchlaufen, so ist $r_1 = r_2 = r$ zu setzen. Die Gleichung (40) führt dann auf einen bestimmten Wert für v_1, der v_k genannt werden soll.

Aus dem Ansatz

$$r = \frac{r}{\dfrac{2\,k \cdot M}{r \cdot v_k^2} - 1} \tag{41}$$

folgt die

Kreisbahngeschwindigkeit $$v_k = \sqrt{\frac{k \cdot M}{r}} \,. \tag{42}$$ ◀

Für einen Spezialfall, nämlich für die Bewegung eines Körpers in einer Bahn nahe der Erdoberfläche, läßt sich die Kreisbahngeschwindigkeit auch durch die Gleichsetzung von Fliehkraft und Gravitationskraft errechnen (↗ Seite 14).

Weisen Sie nach, daß die Gleichungen (9) *und* (42) *gleichbedeutend sind, falls sich g auf den Abstand r bezieht!* ●

Setzt man in Gleichung (42) für r den mittleren Wert des Erdradius ($6{,}371 \cdot 10^6$ m) ein, so ergibt sich $v_k \approx 7900\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Diese Geschwindigkeit heißt
erste kosmische Geschwindigkeit der Erde.

Die erste kosmische Geschwindigkeit der Erde beträgt $7912\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. ◁

Aus der Länge der Kreisbahn und der (konstanten) Bahngeschwindigkeit läßt sich die Umlaufzeit T_k errechnen.

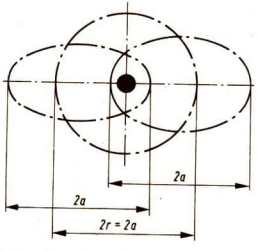
▶ **Umlaufzeit** $T_k = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{k \cdot M}}$. (43)

● *Welche Kreisbahngeschwindigkeit ergibt sich für einen Körper auf einer Bahn in einer Höhe von 220 km über der Erdoberfläche, wie groß ist die Umlaufzeit auf dieser Bahn?*

Wird die Geschwindigkeit v_1, die der Körper im Perigäum (Abstand r_1 vom Zentrum) hat, über die Kreisbahngeschwindigkeit gesteigert, so vergrößert sich, wie aus Gleichung (40) hervorgeht, der Abstand r_2 des Apogäums; die Bahn nimmt die Form einer Ellipse an, die mit zunehmender Geschwindigkeit v_1 immer gestreckter wird. Der Bruch $\frac{2\,k \cdot M}{r_1 \cdot v_1^2}$ im Nenner der Gleichung (40) nähert sich dabei dem Wert 1.

● *Begründen Sie diese Überlegungen!*

Die Umlaufzeit des Körpers auf einer elliptischen Bahn kann mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes berechnet werden, das besagt, daß die Umlaufzeit um den gleichen Zentralkörper nur vom Betrag der großen Halbachse der Bahnellipse $\left(a = \frac{r_1 + r_2}{2}\right)$, nicht aber von deren Form abhängt (Bild 44/1).



44/1 Bahnen gleicher Umlaufzeit

Im Grenzfall $\frac{2\,k \cdot M}{r_1 \cdot v_1} = 1$ ergibt sich für r_2 kein endlicher Wert mehr; die elliptische Bahn ist in eine Parabel übergegangen. Der Körper entweicht der Erde.
Dieser Zusammenhang gestattet, die Entweichungsgeschwindigkeit v_P eines Körpers für die Entfernung r vom Erdmittelpunkt zu errechnen.

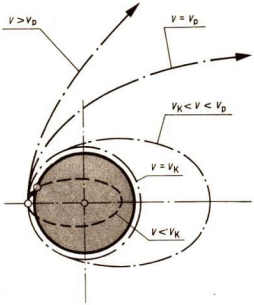
Aus dem Ansatz $\frac{2\,k \cdot M}{r \cdot v_P^2} = 1$ folgt die

▶ **Parabelbahngeschwindigkeit** $v_P = \sqrt{\frac{2\,k \cdot M}{r}}$. (44)

Die Parabelbahngeschwindigkeit für das Niveau der Erdoberfläche heißt *zweite kosmische Geschwindigkeit der Erde.*

▷ **Die zweite kosmische Geschwindigkeit der Erde beträgt 11190 m · s⁻¹.**

● *Welcher allgemeine Zusammenhang besteht zwischen der Kreisbahngeschwindigkeit und der Parabelbahngeschwindigkeit für einen bestimmten Punkt in einem zentralen Gravitationsfeld?*



45/1 Veränderung der Bahnform bei gleichem Ausgangspunkt und gleicher Anfangsrichtung, aber veränderter Anfangsgeschwindigkeit

45/2 Einige kosmische Flugkörper, die in der Sowjetunion gestartet wurden:

a) Sputnik 1
Start: 4. 10. 1957, Masse 83,6 kg

b) Wostok 1
Start: 12. 4. 1961, Masse: 4725 kg
Kosmonaut: Juri Gagarin

c) Mars 1
Start: 1. 11. 1962
Masse: 893 kg

d) Luna 12
Start: 25. 10. 1966, Masse 1645 kg

e) Sojus 6 + 7 + 8
Start: 11. 10. 69; 12. 10. 69; 13. 10. 69
Kosmonauten: Schonin, Kubassow; Filiptschenko, Wolkow, Gorbatko; Schatalow, Jelissejew

Wird einem Körper eine größere Geschwindigkeit als die Parabelbahngeschwindigkeit erteilt, so nimmt seine Bahn die Form eines Hyperbelastes an (Bild 45/1).
Die kosmischen Geschwindigkeiten geben ein anschauliches Beispiel für das allgemeine, philosophische Gesetz vom Qualitätsumschlag bei quantitativen Veränderungen. Wird von der Einwirkung des Gravitationsfeldes anderer Himmelskörper abgesehen, so verbleibt ein Körper im Gravitationsfeld des Zentralkörpers, wenn seine Horizontalgeschwindigkeit im zentrumnächsten Punkte kleiner als die Parabelbahngeschwindigkeit ist; erst beim Überschreiten dieser Geschwindigkeit verläßt er dieses Feld.

Auf einer hyperbolischen Bahn hat sich der erste künstliche Planetoid der Sonne, der sowjetische Flugkörper „XXI. Parteitag" (Lunik I), gestartet am 3. 1. 1959, auf seinem Flug von der Erde am Mond vorbeibewegt, ehe er die endgültige elliptische Bahn im Gravitationsfeld der Sonne erreicht hat.

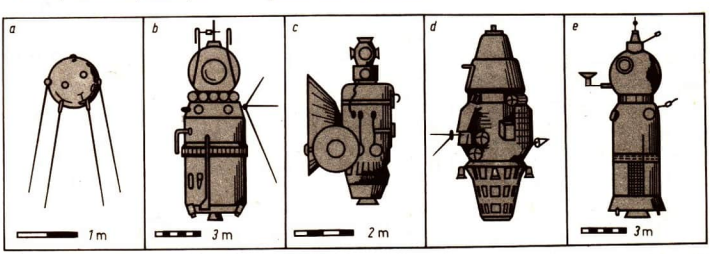
Um auch den Anziehungsbereich der Sonne zu verlassen, ist, wie hier ohne Beweis mitgeteilt wird, eine Anfangsgeschwindigkeit von etwa 16700 m · s^{-1} in Richtung des Umlaufs der Erde um die Sonne notwendig. Diese Geschwindigkeit ist die *dritte kosmische Geschwindigkeit der Erde.*

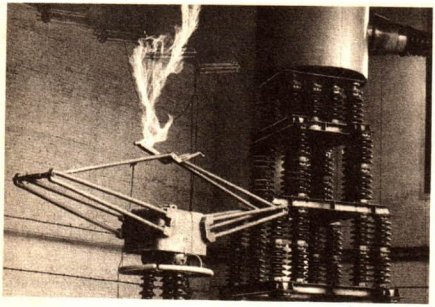
Die dritte kosmische Geschwindigkeit der Erde beträgt 16700 m · s^{-1}. ◁

Prüfen Sie mit Hilfe der Gleichung (44) diesen Wert unter Berücksichtigung der Bahngeschwindigkeit der Erde nach! ●

Die Überlegungen, die hier für eine Bahn im Gravitationsfeld der Erde angestellt wurden, gelten entsprechend auch für Bahnen im Felde anderer Zentralkörper, z. B. der anderen Planeten oder ihrer Monde.

Berechnen Sie die Parabelbahngeschwindigkeit für die Oberfläche des Erdmondes! ●





Das elektrische Feld

Elektrische Felder existieren in der Natur, sie entstehen und zerfallen zufällig auf natürliche Weise, wie z. B. bei Gewittern, und sie werden bewußt vom Menschen erzeugt, um sie technisch zu nutzen, wie z. B. im Hochspannungsgenerator.
In jedem Falle unterliegen die Entstehung der elektrischen Felder und die Vorgänge in ihnen den gleichen Gesetzmäßigkeiten.

Quantitative Beschreibung des elektrischen Feldes

Ist von einem elektrischen Feld die Rede, so ist im allgemeinen ein elektrostatisches Feld gemeint (↗ Lb. Physik, Kl. 9). Es ist im Gegensatz zu einem elektromagnetischen Feld im betrachteten Zeitintervall unveränderlich. Die Prozesse des Aufbaus oder Zerfalls des elektrischen Feldes werden gesondert behandelt oder vernachlässigt.

Die Entstehung eines elektrischen Feldes. Als Bedingung muß das Vorhandensein von Ladungsträgern erfüllt sein. Die Ursache für das Entstehen ist die Ladungstrennung. Teilchen mit positiven und negativen Ladungen ziehen sich erfahrungsgemäß an. Im Zustand der Unordnung der Ladungsträger wirkt der Körper nach außen elektrisch neutral. Ladungstrennung bedeutet „Elektrisieren" der Körper, und zwischen den Körpern mit getrennten Ladungen befindet sich ein elektrisches Feld.

Zur Ladungstrennung ist Energie notwendig. Beim Bandgenerator ist es mechanische Energie, beim Gewitter ist es Wärmeenergie und im Bleiakkumulator ist es chemische Energie, die umgewandelt und im elektrischen Feld gespeichert wird. Ist der Raum des Feldes mit bestimmten Stoffen gefüllt, lassen sich große Energien in ihm speichern. Diese Stoffe heißen Dielektrika. In Nichtleitern läßt sich ein elektrisches Feld beliebig lange aufrecht erhalten. In Leitern ist hierzu ein ständiger Energieaufwand nötig. Feuchtigkeit behindert den Aufbau elektrischer Felder.

Beschreibung eines elektrischen Feldes. Das Beschreiben des elektrischen Feldes kann wie bei jeder anderen Erscheinung nur auf der Grundlage der experimentellen Befunde geschehen.

Phänomenologisch-qualitative Beschreibung:
Wenn in einem Raumbereich elektrisch geladene Körper Kräfte in Richtung von einer Begrenzungsfläche zur anderen erfahren, ohne daß ein Schwerefeld oder ein Magnetfeld die Ursache sein können, nennt man den Bereich ein elektrisches Feld. Jede elektrische Ladung ist von einem solchen Feld umgeben.

Qualitativ-grafische Beschreibung:
Die einfachste Form der Beschreibung eines elektrischen Feldes ist das Zeichnen oder Fotografieren eines Kraftlinienbildes, das man experimentell erzeugt hat.

Quantitativ-analytische Beschreibung:
Jeder Punkt des Raumes ist gekennzeichnet durch einen Wert der elektrischen Feldstärke.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}.$$

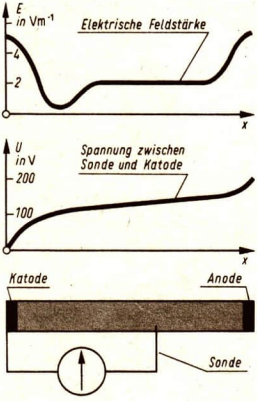
Die elektrische Feldstärke ist eine vektorielle Größe, ihr Richtungssinn ist vereinbarungsgemäß gleich dem der Kraftwirkung auf eine positive Probeladung.
Es gibt noch andere definierte Größen, mit denen das elektrische Feld quantitativ beschrieben werden kann. Die Größen lassen sich alle ineinander umrechnen.

Quantitativ-grafische Beschreibung:
Zusammengehörige Paare aus zwei Mengen gemessener Größen liefern als Kurve in einem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem ebenfalls eine quantitative Beschreibung des Feldes bezüglich der ausgewählten Größen. In Bild 47/1 ist der Betrag der Feldstärke E über dem Abstand zwischen den Elektroden einer Gasentladungsröhre dargestellt.

Nennen Sie (als Wiederholung) die notwendigen Versuchsgeräte und die experimentellen Schritte zur Erzeugung eines Kraftlinienbildes!

Kraftlinienbilder lassen sich bekanntlich auch aus Meßwerten zeichnerisch konstruieren.

Jede Beschreibung ist eine mehr oder weniger abstrahierte Widerspiegelung des objektiv real existierenden elektrischen Feldes. Sie liefert Aussagen über nur einige und nie über alle Merkmale des wirklichen Objektes.



47/1 Beispiel für die Verteilung der Feldstärke und der Spannung in einer Gasentladungsröhre

Einzelfälle elektrischer Felder

Wenn ein elektrisches Feld mit einem anderen verglichen werden soll, müssen die Merkmale festgelegt sein, bezüglich derer der Vergleich zu führen ist. Diese Merkmale sind experimentell zu ermitteln, und nur auf der Grundlage

dieser experimentellen Ergebnisse sind Felder miteinander vergleichbar.
Der vom experimentellen Aufwand einfachste und zugleich anschaulichste Vergleich ist wohl der bezüglich der Form, d. h. bezüglich der Kraftlinienbilder.

● *Skizzieren Sie einige Kraftlinienbilder elektrischer Felder! Welche betrachten Sie als einfache Fälle?*

Offensichtlich richtet sich die Form der Feldlinienbilder nach der Polarität der Ladungen, nach der Form der ladungstragenden Körper sowie nach ihrer Lage zueinander und ihrem Abstand voneinander. Auch der Stoff im Feld hat einen Einfluß auf die Form (Bild 33/2).
Da der Verlauf der Kraftlinien eine Widerspiegelung der Intensität der Wechselwirkungen mit einem ins Feld gebrachten Probekörper darstellt, ist ein Vergleich auch bezüglich der für das Feld definierten Größen möglich. Für die elektrische Feldstärke sei er jetzt vorgenommen:
Aus dem Physikunterricht in der Klasse 9 ist die Größengleichung

$$E = \frac{U}{s} \tag{45}$$

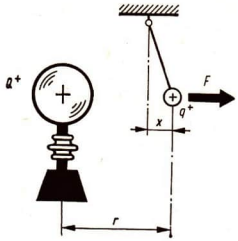
bekannt. Sie gilt für das **homogene elektrische Feld.**

● *Stellen Sie die Merkmale dieses einfachsten Sonderfalles elektrischer Felder zusammen! Wieso hat er große praktische Bedeutung?*

● *Lesen Sie die Größengleichung (45) als Satz! Vergleichen Sie diese Formel mit der Definitionsgleichung für die elektrische Feldstärke, auch hinsichtlich der Einheit!*

Ein zweiter Sonderfall liegt im elektrischen **Feld einer Punktladung** vor. Einen so einfachen analytischen Ausdruck wie für das homogene Feld gibt es hier nicht. Auf die Spannung zwischen den begrenzenden Platten kann man nicht zurückgreifen.

3
▼ Ein kugelförmiger, isolierter Körper (Bild 48/1) trägt die Ladung Q^+. Mit dem kleinen Pendel als Probekörper wird das elektrische Feld in der Umgebung der Kugel gemessen. Die Probeladung q^+ ist konstant. Ein Maß für die Stärke des elektrischen Feldes ist die Auslenkung des Probekörpers.



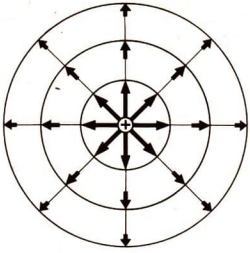
48/1 Ausmessung des Feldes einer Punktladung

Über die Messung der Kräfte sind folgende Abhängigkeiten festzustellen:

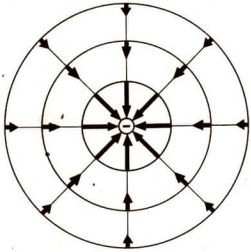
$$E \sim \frac{1}{r^2}$$

$$E \sim Q\,.$$

Die Richtung von $\vec{F}$ und damit von $\vec{E}$ ist die von $\vec{r}$.



49/1 Elektrisches Feld einer positiven Ladung



49/2 Elektrisches Feld einer negativen Ladung

Aus dem Versuch 3 ergibt sich:
Der Betrag der elektrischen Feldstärke an einem Punkt im Feld einer Punktladung ist direkt proportional dieser felderzeugenden Ladung Q und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes r von ihr.

$$E \sim \frac{Q}{r^2}. \tag{46}$$

Wird der Versuch 3 in Luft durchgeführt (Luft hat angenähert die gleiche Dielektrizitätskonstante wie das Vakuum), ergibt sich der Proportionalitätsfaktor $1/4\pi \cdot \varepsilon$. Bei anderen Stoffen kommt noch ε_{rel} dazu ($\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rel} = \varepsilon$). Damit erhält man für eine Punktladung die

elektrische Feldstärke $$E = \frac{Q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot r^2}. \tag{47}$$ ◀

Interpretation dieser Größengleichung:
Sie ist typisch für eine Gleichung, die eine Aussage über die Struktur, die Form des Objektes fällt ($4\pi \cdot r^2$).
Die elektrische Feldstärke hat auf einer Kugelfläche mit dem Erregerzentrum als Mittelpunkt einen konstanten Betrag. Felder dieser Form heißen Radialfelder.

Die Kraft zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern

Auf zwei räumlich getrennte Körper werden zwei beliebige Ladungen Q_1 und Q_2 gebracht, ihr Mittelpunktabstand r wird gemessen und die zwischen beiden Körpern wirkende Kraft F bestimmt. 4 ▼

Welche experimentellen Bedingungen sind gegenüber dem Aufbau nach Versuch 3 zu verändern? ●

Das sich aus dem Versuch 4 ergebende Kraftgesetz läßt sich auch deduktiv aus bekannten Gesetzmäßigkeiten gewinnen.

1. Prämisse: An jedem Raumpunkt des elektrischen Feldes von Q_1 ist die elektrische Feldstärke E definiert, also auch an der Stelle von Q_2. Dort ist

$$E = \frac{F}{Q_2}. \tag{48}$$

2. Prämisse: Für den gleichen Raumpunkt — Q_2 klein gegenüber Q_1 angenommen — gilt im Radialfeld von Q_1

$$E = \frac{Q_1}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot r^2}. \tag{49}$$

Schluß: Bei Gleichheit beider Feldstärken ergibt sich für die

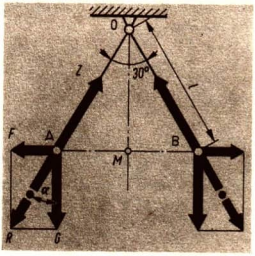
Kraft im elektrischen Feld $$F = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}. \tag{50}$$ ◁

Die Richtung der Kraft, ob bei Anziehung oder Abstoßung, richtet sich nach den Vorzeichen der Ladungen. Dieses Kraftgesetz für Wechselwirkungen im elektrischen Feld wird nach seinem Entdecker Coulombsches Gesetz genannt.

Wenn mehr als zwei geladene Körper im Raum verteilt sind, erfährt jeder Körper von jedem anderen Kraftwirkungen. Die resultierende Kraft, wie auch die resultierende elektrische Feldstärke, ist durch vektorielle Addition zeichnerisch oder rechnerisch zu ermitteln.

Zwei Beispiele sollen eine Vorstellung von der Größenordnung der Ladungen und der zugehörigen Kräfte geben.

■ Zwei sehr kleine Kugeln A und B mit einer Masse von je 0,1 g tragen beide dieselbe Ladung von je Q. Sie hängen in Luft an zwei isolierenden Fäden mit vernachlässigbarer Masse und gleicher Länge l von 10 cm (Bild 50/1). 0 ist der gemeinsame Anhängepunkt. Die Fäden bilden einen Winkel von 30°. Wie groß ist die Ladung Q?



50/1

Problemanalyse:

Eine der Kugeln, z. B. A, befindet sich durch drei Kräfte im Gleichgewicht:

Die Gewichtskraft G,
die Zugkraft des Fadens Z,
die abstoßende Kraft (bezüglich B) F.

Man sieht, daß R, die Resultierende aus G und F, einen Winkel von 15° mit der Senkrechten bildet. Sie ist von gleichem Betrag wie Z, hat die gleiche Richtung, jedoch entgegengesetzten Richtungssinn.

Berechnung der abstoßenden Kraft

Gegeben:

$G = 0{,}1\ \text{p}$
$\quad = 0{,}1 \cdot 9{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$
$\alpha = 15°$

Gesucht:

F

Lösung:

$F = G \cdot \tan 15°$
$F = 0{,}1 \cdot 9{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}27\ \text{N}$
$\underline{\underline{F \approx 2{,}65 \cdot 10^{-4}\ \text{N}}}$

Berechnung des Abstandes der Ladungen

Gegeben:

$l = 10\ \text{cm}$
$\alpha = 15°$
$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12}\ \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$

Gesucht:

r

Lösung:

$r = 2\ \overline{\text{AM}}$
$r = 2 \cdot l \cdot \sin 15°$
$r \approx 5{,}2\ \text{cm}.$
$\underline{\underline{r \approx 5{,}2 \cdot 10^{-2}\ \text{m}}}$

Berechnung der Ladung

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{r^2},$$

$$Q^2 = 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot F \cdot r^2$$

$$\underline{\underline{Q \approx 9 \cdot 10^{-9}\ \text{C}}}$$

Unter bestimmten Bedingungen kann ein Wasserstoffatom eine Ladung von $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C besitzen. Welche Kraft wirkt zwischen ihm und einem gleichartigen Atom bei einem Abstand von 10^{-6} m?

Gegeben:

$Q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

$r = 10^{-6}$ m

$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{F \cdot m^{-1}}$

Gesucht:

F

Lösung:

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{r^2},$$

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1{,}6^2 \cdot 10^{-38}\ \mathrm{C^2}}{10^{-12}\ \mathrm{m^2}},$$

$$\underline{\underline{F \approx 2{,}3 \cdot 10^{-16}\ \mathrm{N}}}$$

Diese Kraft ist offensichtlich sehr schwach. Es ist aber interessant, sie mit der Gewichtskraft des Wasserstoffatoms zu vergleichen.

(1 Grammatom entspricht $6 \cdot 10^{23}$ Atomen)

$$G = \frac{1\ \mathrm{p}}{6 \cdot 10^{23}}, \qquad G \approx \frac{1\ \mathrm{N}}{100 \cdot 6 \cdot 10^{23}}, \qquad \underline{\underline{G \approx 1{,}6 \cdot 10^{-26}\ \mathrm{N}}}$$

Die durch die elektrischen Ladungen bedingte Kraft zwischen den Wasserstoffatomen ist also 10 Milliarden mal so groß wie die Gewichtskraft eines Atoms.

Die Energie des elektrischen Feldes. Die Kraft auf einen ladungstragenden Körper ist wahrnehmbar durch eine Bewegungsänderung, die er ausführt. Wenn sich ein Körper gegen eine Kraft, z. B. die Schwerkraft, längs eines Weges bewegt, wird physikalische Arbeit verrichtet. Sie kann in einem gegebenen homogenen Felde berechnet werden nach

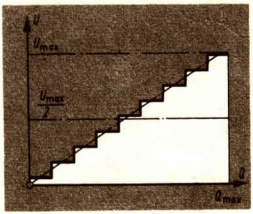
$$W = Q \cdot U. \tag{51}$$

Die Frage ist berechtigt, woher die zu dieser Wechselwirkung nötige Energie stammt.

Zur Beantwortung dieser Frage sei ein Plattenkondensator betrachtet. Er erfüllt die Bedingungen des homogenen elektrischen Feldes. Das Feld sei noch nicht vorhanden, der Kondensator sei also noch nicht geladen. Das Feld muß erst aufgebaut werden. Zu diesem Zwecke muß an ladungstragenden Körpern mechanische Arbeit verrichtet werden.

Ein Kondensator wird dadurch geladen, daß zu wiederholten Malen kleine Ladungen ΔQ von der einen zur anderen Belegung transportiert werden. Jede Verschiebung einer solchen Ladung ΔQ erfordert einen Energieaufwand $\Delta W_i = U_i \cdot \Delta Q$.

51/1 Arbeitsdiagramm vom Aufbau eines elektrischen Feldes im Kondensator



Meßbare Größen beim Laden des Kondensators:

$U \sim Q, \qquad 0 \leqq U \leqq U_{max}.$

Aus der grafischen Darstellung ablesbarer Betrag der zum Laden des Kondensators aufgewandten Arbeit

$$W = \frac{1}{2} U_{max} \cdot Q. \tag{52}$$

Nach dem Energieerhaltungssatz muß diese Arbeit als Energie im Kondensator gespeichert sein.

● *Wie erklärt sich der Unterschied dieser Größengleichung zu* $W = Q \cdot U$*?*

Berechnung der Energie eines geladenen Kondensators (vgl. mit U-Q-Diagramm)

$$\Delta W = U \cdot \Delta Q\,. \tag{53}$$

Mit $U = \frac{Q}{C}$ aus der Definitionsgleichung für C folgt

$$\Delta W = \frac{1}{C} \cdot Q \cdot \Delta Q\,. \tag{54}$$

Der Ladevorgang wird verfolgt von $Q = 0$ bis $Q = Q_{max}$.

$$W = \lim_{\Delta Q \to 0} \sum_{Q=0}^{Q=Q_{max}} \frac{1}{C} Q \cdot \Delta Q$$

$$W = \frac{1}{C} \int_0^{Q_{max}} Q \cdot \mathrm{d}Q$$

$$W = \frac{1}{2\,C} Q_{max}^2 \quad \text{mit} \quad Q = U \cdot C$$

$$W = \frac{1}{2}\, C \cdot U_{max}^2 = \frac{1}{2}\, U_{max} \cdot Q\,. \tag{55}$$

U_{max} ist die Spannung U zwischen den feldbegrenzenden Platten eines geladenen Kondensators.

Substitution der Größen C und U

Aus Gleichung (55) folgt mit $C = \varepsilon \cdot \frac{A}{s}$ und $E = \frac{U}{s}$

$W = \frac{1}{2}\, \varepsilon \cdot E^2 \cdot A \cdot s$ die

▶ **Energie des elektrischen Feldes** $\boldsymbol{W = \frac{1}{2}\, \varepsilon \cdot E^2 \cdot V}$. (56)

▷ **Ein elektrisches Feld ist Träger elektrischer Energie**

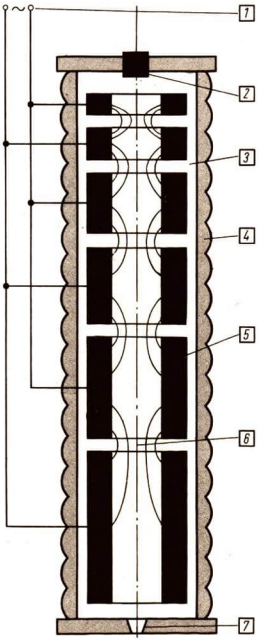
Für einen bestimmten geladenen Kondensator ist die in ihm gespeicherte Feldenergie durch folgende drei Größengleichungen bestimmbar, und die Beträge sind gleich.

$$W = \frac{1}{2}\, C \cdot U^2$$

$$W = \frac{1}{2}\, U \cdot Q$$

$$W = \frac{1}{2}\, \varepsilon \cdot E^2 \cdot V\,.$$

53/1 Linearbeschleuniger
Die Laufstrecke (6) ist vakuumdicht. Die Elektroden (2, 5) sind so angeordnet, daß sie nicht nur beschleunigen, sondern den Teilchenstrom auch bündeln. Das Rohr (4) wird im allgemeinen aus Glas- oder Keramikringen zusammengefügt, an ihnen sitzen innen die Elektroden (5), an welche die Spannung über Spannungsteiler gelegt wird.
1 — Wechselspannungsquelle
2 — Ionenquelle
3 — Vakuumraum
4 — Rohrglieder
5 — Hohlelektrode
6 — Laufstrecke
7 — Austrittsfenster



Die Unterschiede liegen in den Größen, von denen man ausgeht. Einmal muß die typische Geräteeigenschaft Kapazität C bekannt sein, das zweitemal müssen Ladungsmessungen (Q) vorgenommen werden, zur dritten Methode sind Messungen im Feld nötig. Aus der Tatsache, daß die Größe Q nur beim Auf- oder Entladevorgang zu messen ist, ist schon der Prozeßcharakter dieses Verfahrens zu erkennen. Es ist die Energie, die beim Aufbau des elektrischen Feldes zugeführt werden muß, um dann als Feldenergie gespeichert zu sein.

Die Beschleunigung geladener Teilchen im elektrischen Feld. Aus dem zu beobachtenden Tatbestand, daß sich elektrisch geladene Körper anziehen oder abstoßen, ist auf Kräfte zwischen den Körpern geschlossen worden. Der Raum, in dem sich die Körper befinden, ist der Ort, und der Zustand des Raumes, das Feld ist das Mittel der Wechselwirkung. Wenn die Beträge der beteiligten Ladungen bestimmbar sind, läßt sich die Kraft nach dem Coulombschen Gesetz errechnen.
Von großer Bedeutung ist die von NEWTON formulierte Erkenntnis, daß jede an einem Körper angreifende Kraft den Körper **beschleunigt**; vorausgesetzt, daß nicht andere Kräfte die Bewegungsänderung verhindern.

Mit den Kenntnissen über das Gravitationsfeld läßt sich nun ein Vergleich zum elektrischen Feld anstellen:
Im Gravitationsfeld der Erde wirkt auf einen Körper der Masse m die Schwerkraft F_S mit der Beschleunigung g. Die Wirkungslinie von F_S und g verbindet die Schwerezentren von Erde und betrachtetem Körper.
Im elektrischen Feld wirkt (zusätzlich) auf einen Körper mit der Ladung Q die Kraft F und beschleunigt ihn in Abhängigkeit von der Feldstärke E. Die Wirkungslinie von F und E ist die entsprechende Kraftlinie.

Das Prinzip der Beschleunigung in elektrischen Feldern findet in der wissenschaftlichen Forschung eine vielseitige Anwendung. Die großen Erfolge der Forschung auf dem Gebiet der Struktur der Materie und der Atomphysik im engeren Sinne sind zum Beispiel ohne die **Teilchenbeschleuniger** undenkbar.
Im Teilchenbeschleuniger werden Bestandteile des Atoms, also Körper sehr kleiner Masse, beschleunigt, auf sehr hohe Geschwindigkeiten gebracht und dadurch mit sehr hohen kinetischen Energien versehen, welche für die bei den Wechselwirkungen der Teilchen beabsichtigten Effekte notwendig sind. Von den verschiedenen Teilchenbeschleunigern ist der **Linearbeschleuniger** in der Wirkungsweise am einfachsten zu erklären.

● *Warum sind die Elektroden entlang der Beschleunigungsstrecke im Linearbeschleuniger (Bild 53/1) nicht gleichlang?*

Der sogenannte „Van-de-Graaff"-Linearbeschleuniger, eine kleine, nur einige Meter lange Ausführung, mit dem sich Energien von 2...5 MeV erzielen lassen, findet Anwendung bei Bestrahlungen in der Medizin, in der Werkstoffprüfung, bei biologischen und chemischen Arbeiten und zum Einschießen der Teilchen in moderne Riesenbeschleuniger.

● *Verschaffen Sie sich aus vorhandener Literatur einen Überblick über die verschiedenen Arten von Teilchenbeschleunigern! Wie heißen sie, welche physikalischen und technischen Bedingungen müssen sie erfüllen, welche Energien erreichen die bekanntesten Anlagen?*

Der Sachverhalt der Beschleunigung geladener Teilchen im elektrischen Feld läßt sich auch zur Bestimmung des Betrags der Elementarladung ausnützen. Ein Experiment dazu entwickelte EHRENHAFT; MILLIKAN schuf 1909 die geeignete Versuchsanordnung.

5

▼ In einen Kondensator mit waagerechten Platten werden kleine Flüssigkeitströpfchen gesprüht (z. B. Öl). Durch das Sprühen werden sie geladen. Liegt keine Spannung an den Platten, wirkt nur das Gravitationsfeld der Erde auf die Tröpfchen. Sind sie klein genug, sinken sie infolge der Reibung mit konstanter Geschwindigkeit, aus der sich der Radius der Teilchen berechnen läßt. Wenn zusätzlich ein elektrisches Feld im Kondensator aufgebaut ist, bewegen sich die Teilchen entweder noch schneller nach unten oder nach oben. Durch das Regulieren der Spannung kann der Beobachter für ein Teilchen auch den Schwebezustand schaffen. Dann herrscht Gleichgewicht zwischen der Gewichtskraft des Tröpfchens und der Kraft des elektrischen Feldes. Da die kleinen Tröpfchen Kugelform annehmen und die Dichte des Öls bekannt ist, läßt sich die Masse leicht ermitteln.

$$Q \cdot E = m \cdot g \qquad (57)$$

Mit $E = \frac{U}{s}$ wird

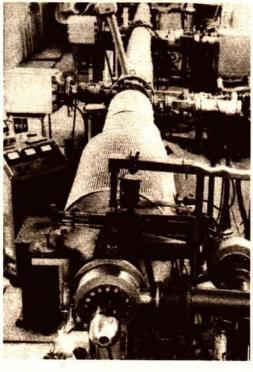
$$Q = \frac{m \cdot g \cdot s}{U}.$$

MILLIKAN fand für Q immer ganzzahlige Vielfache ein- und desselben Wertes, der sich als die Elementarladung erwies.

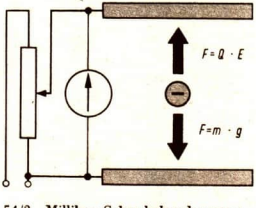
▶ **Die elektrische Elementarladung beträgt $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.**

Die Ladung nennt man eine gequantelte Größe, nicht ganzzahlige Vielfache von e sind experimentell nie nachgewiesen worden.

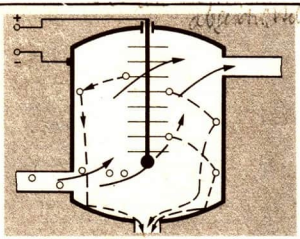
● *Wie kann man das Vorzeichen einer Ladung ermitteln?*



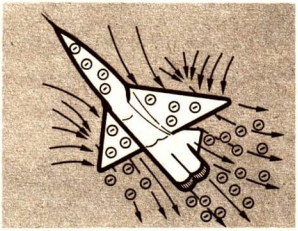
54/1 Linearbeschleuniger in Serpuchow



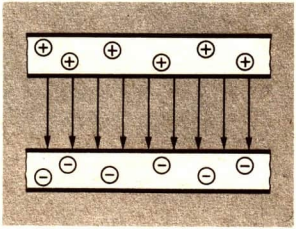
54/2 Millikan-Schwebekondensator



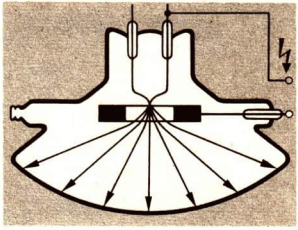
Elektrostatische Gasreinigung. Die Eigenschaft der elektrischen Ladung bewegter Partikel wird technisch genutzt zur Trennung von Stoffen.
Aus einem Gas werden Schmutzteile entfernt, wenn es z. B. durch eine Kammer geleitet wird, in der sich ein elektrisches Feld befindet. Die Teilchen laden sich durch die Bewegung selbst auf. Filter mit elektrostatischen Feldern in den Schornsteinen dienen der Reinhaltung der Luft, verringern die Schmutzbelästigung und dienen der Rückgewinnung von z. B. unverbranntem Kohlenstaub. Diese Methode der Anwendung befriedigt also hygienische und ökonomische Erfordernisse.



Sprühentladung. Eine Vorstufe des Gewitters ist der Abbau eines natürlichen elektrischen Feldes durch Sprühentladung. Sie findet bevorzugt an den Spitzen der begrenzenden Pole statt. Phantastische Geschichten werden von alten Seefahrern über das St.-Elms-Feuer (den Klabautermann) an den Mastspitzen der Segelschiffe erzählt. Eine moderne Variante ist die Sprühentladung an Flugzeugen. Es handelt sich um objektiv reale Erscheinungen, die technisch bewußt gefördert werden, um eine elektrische Aufladung an Flugzeugen weitgehend zu vermeiden, da dies zu Störungen verschiedenster Art führen kann.



Das Feld im Kondensator. Ein elektrostatischer Energiespeicher ist der Kondensator mit seinem elektrischen Feld. Der Stoff, in dem sich das elektrische Feld ausbildet, wird als Dielektrikum bezeichnet. Ein gutes Dielektrikum muß eine gute Isoliereigenschaft besitzen, um eine vorzeitige Entladung zu verhindern. Kondensatoren werden vielfältig in der Elektrotechnik eingesetzt.



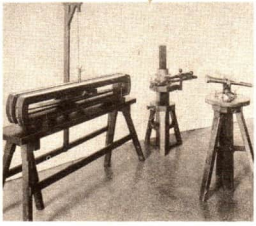
Feldelektronenmikroskop. In einem traditionellen Mikroskop erfolgt die Abbildung durch Photonen (Lichtquanten), die vom Gegenstand ausgehen und deren Weg an den Glaslinsen in bestimmter Weise gebrochen wird. In einem Feldelektronenmikroskop erfolgt die Abbildung durch Elektronen, die vom Objekt ausgehen und durch elektrische Felder in Richtung zur Anode beschleunigt werden. Das Bild kann nur mit einem elektronischen Bildschirm aufgefangen werden. Ein Feldelektronenmikroskop darf nicht verwechselt werden mit einem Elektronenmikroskop, in dem elektrische und magnetische Felder die Funktion der ablenkenden Linsen haben.

Das elektromagnetische Feld

Das Synchrophasotron von Serpuchow ist ein Teilchenbeschleuniger, mit dessen Hilfe Protonen beim vielfachen Durchlaufen der Beschleunigungsstrecken eine Energie von 76 GeV erhalten. Die Beschleunigung findet durch ein elektrisches Feld statt.
Um die Teilchen auf einer kreisähnlichen Umlaufbahn zu halten, wirkt in der Laufstrecke ein elektromagnetisches Feld und lenkt die Teilchen.

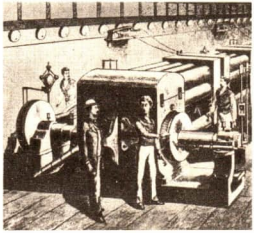
Historische Betrachtung

Anknüpfend an das Werk „De magnete magnetisque corporibus et de magno magnete tellure" von WILLIAM GILBERT (1540 bis 1603) hat der Physiker CHRISTIAN OERSTED (1777 bis 1851) die Beziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus untersucht und die magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme entdeckt. ANDRÉ MARIE AMPÈRE (1775 bis 1836) konnte Gleichungen für die elektromagnetische Induktion aufstellen. Auf Grund der Feldvorstellungen Michael Faradays (1791 bis 1867) entwickelte dann CLERK MAXWELL (1831 bis 1879) die heute noch im Wesen als richtig anerkannte mathematische Fassung der elektromagnetischen Feldtheorie. Der Physiker HEINRICH HERTZ (1857 bis 1894) demonstrierte 1886 die „drahtlose Ausbreitung" elektromagnetischer Wellen.
HERTZ konnte die Wesensgleichheit der von ihm erzeugten elektromagnetischen Wechselfelder mit Licht nachweisen. Im Jahre 1895 entdeckte WILHELM C. RÖNTGEN (1845 bis 1923) die nach ihm benannten, dem Licht verwandten Strahlen.
Und PJOTR N. LEBEDEW (1866 bis 1912) zeigte 1901, daß Licht gleich anderer Materie einen Druck ausüben kann. So war die Theorie des elektromagnetischen Feldes ebenso wie die Atomtheorie zu einer Hauptstütze des modernen materialistischen Naturbildes geworden. Das „Feld" war von der Forschung als eine Form der Materie, als außerhalb und unabhängig vom Bewußtsein existierende objektive Wirklichkeit erkannt worden.
(vgl. W. I. Lenin: Materialismus und Empiriokritizismus)



56/2 Elektromagnetischer Telegraf von Gauß und Weber aus dem Jahre 1833

56/3 Elektrokraftwerk – New York 1881



Quantitative Beschreibung des elektromagnetischen Feldes

Die Entstehung eines elektromagnetischen Feldes. Vor dem tieferen Eindringen in die Gesetzmäßigkeiten des elektromagnetischen Feldes seien folgende bereits behandelte Tatsachen zur Wiederholung aufbereitet:

Ein magnetisches Feld entsteht — ganz allgemein gesprochen — wenn sich ein elektrisches Feld ändert. Elektrischer Strom und magnetisches Feld sind zwei untrennbare Erscheinungen. Daraus erklärt sich die Bezeichnung **elektromagnetisches Feld.** Vereinfachend wird oft **magnetisches** Feld gesagt. Fließt ein konstanter elektrischer Strom, d. h. wird durch ein ständiges Aufrechterhalten des elektrischen Feldes die Voraussetzung dafür geschaffen, dann ist auch das magnetische Feld konstant. Seine Kenngrößen sind im betrachteten Zeitraum invariant.

Sobald sich ein Glied des Systems „elektrisches Feld, Leiter, magnetisches Feld" ändert, ändern sich alle anderen Faktoren mit. Es liegt ein veränderliches elektromagnetisches Feld vor. Das Feld eines Dauermagneten hat auch elektrische Ursachen im Inneren der Atome.[1]

Stromführende Leiter untereinander sowie stromführende Leiter und Dauermagnete, auch Dauermagnete untereinander zeigen Wechselwirkungen. Die Richtung der Kräfte ist u. a. von der Stromrichtung abhängig. Die Änderung des Bewegungszustandes der beteiligten Körper (z. B. Draht, Spule, Stabmagnet) geschieht mittelbar über die sie umgebenden magnetischen Felder. Die Wechselwirkungen im magnetischen Feld unterliegen wie die im Gravitationsfeld dem Erfahrungssatz actio = reactio.

Bestimmte Experimente schaffen eine Vorstellung von der Form und Struktur der elektromagnetischen Felder (z. B. die Ausrichtung von Eisenfeilspänen oder kleinen Magnetnadeln). Die Form der Felder richtet sich nach der Form und Anordnung der Körper, von denen sie ausgehen. Elektromagnetische Felder sind räumliche Objekte. Die durch Eisenfeilspäne in einer Ebene erzeugten Bilder heißen Kraftlinienbilder.

Planen Sie ein einfaches Experiment zum Nachweis des Satzes actio = reactio bei Wechselwirkungen im magnetischen Feld, führen Sie es vor und erklären Sie es!

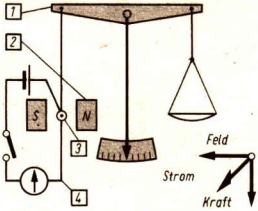
Stellen Sie die Ihnen bis jetzt bekannten gemeinsamen und unterschiedlichen Eigenschaften von elektrischen und magnetischen Feldern zusammen!

[1] Die exakte Beschreibung des so einfach erscheinenden Falles ist schwierig und gehört nicht zum Lehrstoff der Erweiterten Oberschule.

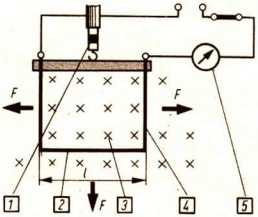
Die Messung des magnetischen Feldes — die magnetische Induktion

Hier wird auch auf früher vermittelten Kenntnissen und Fertigkeiten aufgebaut. Der Abschnitt enthält keine neuen Fakten, der Sinn liegt in der gedanklichen Vorbereitung auf das Folgende.
Bemerkung: In den nächsten Abschnitten des Lehrbuches werden zeitlich unveränderliche elektromagnetische Felder (auch magnetostatische Felder genannt) betrachtet, solange nicht das Gegenteil betont wird. Dadurch erfahren die hier darzustellenden Größen und Sachverhalte keinerlei Einschränkungen.

Bei den Kräften auf stromführende Leiter im Magnetfeld zeigt sich eine Gesetzmäßigkeit. Zu ihr gehören folgende Einzelaussagen:
Die Wechselwirkung ist umso intensiver, je stärker die beteiligten Felder sind (z. B. das des Dauermagneten und das des stromdurchflossenen Leiters).
Der Richtungssinn und der Betrag der Kraft sind abhängig vom Richtungssinn des elektrischen Stromes im Leiter und von der Richtung des Magnetfeldes im Raum. Verlaufen Feldrichtung und Stromrichtung parallel, ist die Kraft gleich Null.
Um Angaben zur Stärke eines elektromagnetischen Feldes machen zu können, ist eine Größe analog zur elektrischen Feldstärke $\vec{E}$ definiert worden.

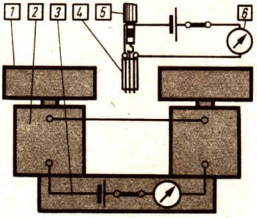


58/1



58/2 1 — Kraftmesser
2 — Leiterstück
3 — magnetisches Feld
4 — Probespule
5 — Strommesser

58/3 1 — Polschuhe
2 — Magnetspulen
3 — Erregerstromkreis
4 — Probespule
5 — Kraftmesser
6 — Strommesser



Versuchsergebnisse:

6 ▼ Versuch 6 mit einfachem Leiterstück
Befindet sich das Leiterstück l im homogenen Teil des magnetischen Feldes rechtwinklig zur Feldrichtung, so erfährt es bei Stromfluß eine Ablenkung rechtwinklig zu beiden vorgegebenen Richtungen. Entsprechend dem elektromotorischen Prinzip kann der Zusammenhang wie in Bild 58/2 mit einer Probespule nach-
7 gewiesen werden (1 Windung).

▼ Versuch 7 mit einer Probespule mit mehreren Windungen
Als Quelle des magnetischen Feldes wird diesmal ein Spulensystem (2) verwendet, bestehend aus geblättertem U-Kern, 2 I-Kernen (1) und 2 Kastenspulen. Das abzulenkende Leiterstück ist ein Vielfaches der Länge l entsprechend der Anzahl der Windungen der Probespule (4). Es ist zu unterscheiden zwischen Felderregerstromkreis (3) und Meßstromkreis (Bild 58/3).

In einem homogenen magnetischen Feld wird

1. für eine bestimmte Stromstärke I in der Meßspule eine bestimmte Kraft F gemessen. Mit I wächst auch F. $(F \sim I)$
2. Die Kraft verändert sich mit der Anzahl der Windungen der Meßspule und damit mit der wirksamen Leiterlänge $l = n \cdot l_0$. $(F \sim l)$

3. Außerhalb des homogenen Teilfeldes ist F bei gleichen I und l kleiner. In einem anderen Feld (z. B. andere Erregerstromstärke I_{err} oder Dauermagnet) treten andere Kräfte F bei gleichen I und l auf.
4. Die Kräfte F_1 und F_2 haben die Resultierende Null.

Aus diesen Beobachtungensergebniss läßt sich für jeden Punkt des magnetischen Feldes eine Größe definieren, die die Stärke des Feldes beschreibt. Als Nebenbedingung muß l klein sein gegenüber der Strecke im Feld, längs der sich F ändert.
Die Definition der Feldgröße folgt aus dem oben dargelegten Erfahrungssatz

$F \sim I \cdot l$

Definition: Für jeden Punkt eines magnetischen Feldes gibt es einen Quotienten $\frac{F}{I \cdot l}$; man bezeichnet ihn als

magnetische Induktion $$B = \frac{F}{I \cdot l}. \qquad (58)$$

Sie charakterisiert die Intensität des Feldes.

Bemerkungen: $\vec{B}$ ist eine vektorielle Größe, ihr Richtungssinn stimmt mit dem der Feldlinien überein.
Es wird vorläufig nur mit den Beträgen von $\vec{B}$ gerechnet.
B ist unabhängig von der Probestromstärke I, wie E unabhängig von der Probeladung Q ist.
Der Nenner des Quotienten, $I \cdot l = Q \cdot v$, läßt sich als „bewegte Ladung" interpretieren (vgl. mit der Definition der elektrischen Feldstärke E).

Einheiten der magnetischen Induktion sind:

$$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}} = \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{Am}^2} = \frac{\mathrm{Ws}}{\mathrm{Am}^2} = \frac{\mathrm{VAs}}{\mathrm{Am}^2} = \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2}.$$

Für Voltsekunde (Vs) wird zu Ehren Wilhelm Webers (1804 bis 1891) auch Weber (Wb) geschrieben. Eine veraltete Einheit für die magnetische Induktion ist das Gauss (kein Kurzzeichen), das Internationale Einheitensystem legt ein Tesla (T) fest (nach NIKOLAUS TESLA 1856 bis 1943).

$$10^4\,\mathrm{Gauss} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}} = 1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2} = 1\,\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2} = 1\,\mathrm{T}.$$

Nach dem gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen den durch elektrische Leiter fließenden Strömen und den auf die Leiter ausgeübten Kräften ist **die gesetzliche Einheit der elektrischen Stromstärke** definiert worden.
Tafel der gesetzlichen Einheiten, Mitteilungsblatt Nr. 149 des Deutschen Amtes für Meßwesen und Warenprüfung der DDR, Berlin, den 8. 10. 1958:

„Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei gradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die einen Abstand von 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ beträgt."

Praktisch ist die Stromstärkemessung mit zwei sehr langen Drähten in hinreichender Genauigkeit gar nicht möglich. Statt dessen wird die Definition angewandt, um die Kraft zwischen zwei kreisförmigen Drahtspulen zu berechnen. Mit einem Gerät, das Stromwaage (Bild 60/2) heißt, kann die Kraft zwischen den Spulen sehr genau gemessen werden. Aus der Kraft ist dann der Betrag der Stromstärke zu bestimmen. Die in Laboratorien und in industriellen Anlagen üblichen Strommesser (Drehspul-, Dreheisengeräte u. a.) werden nach der Stromwaage geeicht.

■ Mit einer selbstgefertigten rechteckigen Probespule von 30 Windungen und einer Seitenlänge von 30 mm wurden gemessen:

Gegeben:

$F = 3\,\mathrm{p}$
$\approx 0{,}03\,\mathrm{N}$
$I = 1{,}7\,\mathrm{A}$
$N = 30$
$s = 0{,}03\,\mathrm{m}$

Gesucht:

l
B

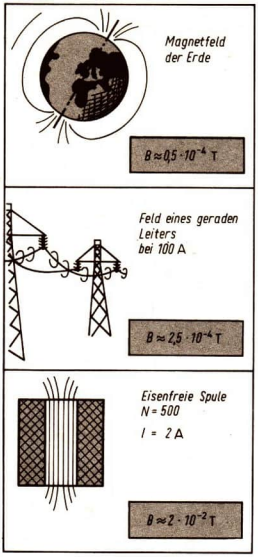
Lösung:

$l = N \cdot s$
$l = 30 \cdot 0{,}03\,\mathrm{m}$
$\underline{\underline{l = 0{,}9\,\mathrm{m}}}$

$B = \dfrac{F}{I \cdot l}$

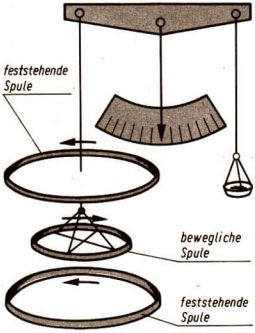
$B = \dfrac{0{,}03\,\mathrm{N}}{1{,}7\,\mathrm{A} \cdot 0{,}9\,\mathrm{m}}$

$\underline{\underline{B = 0{,}02\,T}}$



60/1

60/2



Wenn die Größe „magnetische Induktion" heißt und nicht „magnetische Feldstärke", ist das auf die historische Entwicklung der Elektrodynamik zurückzuführen.

Die Lorentzkraft

Die in magnetischen und elektrischen Feldern und in Schwerefeldern stattfindenden Wechselwirkungen sind wesensverschieden. Sie können aber mit der Größe Kraft hinreichend quantitativ beschrieben werden.

Wenn dennoch Kräfte verschiedene Bezeichnungen erhalten, geschieht es aus Zweckmäßigkeit zur schnellen und eindeutigen Verständigung. Die Kraft auf bewegte Ladungsträger (z. B. in stromdurchflossenen Leitern) im Magnetfeld wird oft Lorentz-Kraft genannt.

Aus der Definitionsgleichung für die magnetische Induktion folgt als Gleichung für die

61/1

61/2 Vergleich der Kräfte in verschiedenartigen physikalischen Feldern

Lorentzkraft $F = I \cdot l \cdot B$. (59) ◀

F steht grundsätzlich rechtwinklig zu B. Ist der stromdurchflossene Leiter auch senkrecht zu B gelagert, genügt diese Gleichung der Beträge. Der vollständige Zusammenhang zwischen den vektoriellen Größen, $\vec{F}$, $\vec{I}$ und $\vec{B}$ wird durch die Vektorgleichung gegeben.

$$\vec{F} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}. \quad (60)$$

I: Strom der positiven Ladungsträger

Zur Berechnung der Lorentzkraft muß der Winkel α zwischen dem stromdurchflossenen Leiter und der Feldrichtung bestimmbar sein. Dann findet die Gleichung oft Verwendung in der Form

$$F = l \cdot I \cdot B \cdot \sin\alpha. \quad (61)$$

Von wissenschaftlichem Interesse ist der Betrag der Kraft auf einen bewegten Ladungsträger, auf ein Elektron. Da $I = Q/t$, ist $I \cdot l = Q \cdot v$ zu schreiben. Wird für Q (positiv) die Elementarladung e eingesetzt, ergibt sich

$$F = -e \cdot v \cdot B. \quad (62)$$

$\vec{F}$ rechtwinklig auf $\vec{v}$ und $\vec{B}$.

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (63)$$

Die spezifische Ladung eines Elektrons

Bisher ist die Wechselwirkung eines elektrisch geladenen Teilchens entweder mit einem elektrischen **oder** mit einem magnetischen Felde betrachtet worden. Nun sei die Ablenkung eines Elektrons bei gleichzeitigem Vorhandensein elektrischer **und** magnetischer Felder untersucht.

Entwerfen Sie für jeden Fall der tabellarisch zusammengestellten Wechselwirkungen eine Skizze! ●

	Kraft zwischen Körper und		
	Gravitationsfeld	elektrischem Feld	magnetischem Feld
Größengleichung	$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$	$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}$
Richtung	$\vec{F} \parallel \vec{g}$ parallel zu den Feldlinien	$\vec{F} \parallel \vec{E}$ parallel zu den Feldlinien	$\vec{F} \perp \vec{B}$ rechtwinklig zu den Feldlinien
charakteristische Eigenschaft des Körpers für die Wechselwirkung mit dem Feld	Masse m	(ruhende) Ladung Q	bewegte Ladung $Q \cdot v$

Synthese der Bahnkurve des Elektrons. Gegeben ist (Bild 62/1) ein homogenes magnetisches Feld mit der magnetischen Induktion $\vec{B}$ (in die Zeichenebene hinein) in einem Glasgefäß mit geringem Gasdruck. Zwischen Katode und Anode liegt ein elektrostatisches Feld. Von der Katode werden Elektronen emittiert und von diesem Feld in Richtung der Anode beschleunigt. Die Bahn der Elektronen ist sichtbar, weil einige Elektronen mit den Gasmolekülen zusammenprallen und sie zum Leuchten anregen. Auf jedes Elektron wirkt auf Grund des Magnetfeldes die Kraft $F = e \cdot v \cdot B$. Sie wirkt stets rechtwinklig zur Geschwindigkeit $\vec{v}$ und rechtwinklig zu $\vec{B}$ als Radialkraft. Bei konstanter Austrittsarbeit und konstantem Gasdruck wird das Elektron auf eine der Stärke des magnetischen Feldes entsprechende Kreisbahn geführt. Der Betrag der Bahngeschwindigkeit bleibt konstant, die Beschleunigung zeigt sich nur in der ständigen Veränderung der Bahnrichtung. Der Bahnradius hängt von der trägen Masse des Elektrons ab und ist meßbar. Wenn alle anderen Größen bekannt sind, ist auf diese Weise die Masse des Elektrons bestimmbar.

Es gilt folgende Energiebilanz:

Die Arbeit am Elektron im elektrischen Feld zwischen Katode und Anode ist gleich der kinetischen Energie des Elektrons (Reibung ist vernachlässigbar klein, und es wird angenommen, das Elektron durchlaufe die gesamte Potentialdifferenz U)

$$U \cdot e = \frac{m}{2} v^2 \qquad (64)$$

Für die Kräfte gilt:

Der Radius der Kreisbahn stellt sich so ein, daß der Betrag der ablenkenden Kraft im Magnetfeld, die als Radialkraft wirkt, gleich dem Betrag der Zentrifugalkraft ist

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}.$$

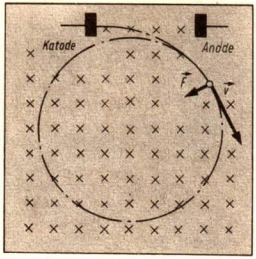
Durch Eliminieren der Unbekannten v bleibt

$$\frac{e}{m} = \frac{2\,U}{B^2 \cdot r^2}. \qquad \text{Der Quotient } \frac{e}{m} \text{ heißt}$$

▶ **spezifische Ladung des Elektrons** $\quad \frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\ \mathrm{C \cdot kg^{-1}}$.

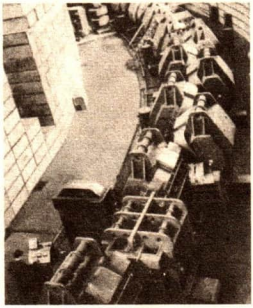
● *Berechnen Sie die Ladung von 1 g Elektronen!*

● *Berechnen Sie mit Hilfe der bekannten Elementarladung die Masse des Elektrons!*

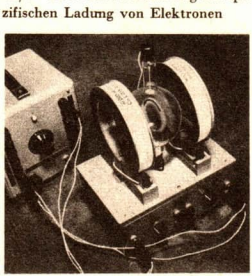


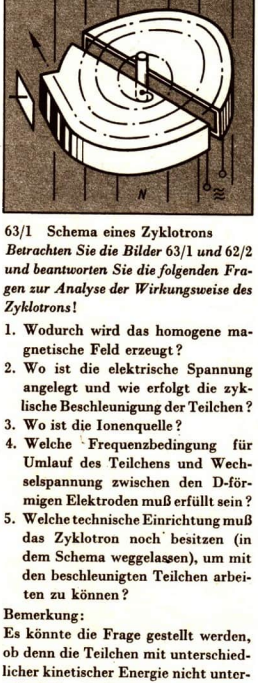
62/1 Ablenkung der Elektronen in der Wehneltröhre

62/2 Zyklotronmagnet



62/3 Gerät zur Bestimmung der spezifischen Ladung von Elektronen





63/1 Schema eines Zyklotrons

Betrachten Sie die Bilder 63/1 und 62/2 und beantworten Sie die folgenden Fragen zur Analyse der Wirkungsweise des Zyklotrons!

1. Wodurch wird das homogene magnetische Feld erzeugt?
2. Wo ist die elektrische Spannung angelegt und wie erfolgt die zyklische Beschleunigung der Teilchen?
3. Wo ist die Ionenquelle?
4. Welche Frequenzbedingung für Umlauf des Teilchens und Wechselspannung zwischen den D-förmigen Elektroden muß erfüllt sein?
5. Welche technische Einrichtung muß das Zyklotron noch besitzen (in dem Schema weggelassen), um mit den beschleunigten Teilchen arbeiten zu können?

Bemerkung:
Es könnte die Frage gestellt werden, ob denn die Teilchen mit unterschiedlicher kinetischer Energie nicht unterschiedliche Umlauffrequenzen haben und somit ein regelmäßig periodisches Beschleunigen unmöglich ist. Das ist nicht der Fall. Auf der spiralförmig nach außen verlaufenden Bahn ist das Verhältnis v/r konstant und somit $f = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r}$ von diesen Größen unabhängig.

Erweitern Sie Ihre selbstangefertigte Aufstellung über wichtige Arten von Teilchenbeschleunigern durch Angaben bzgl. physikalischem Prinzip, Anwendungsbereich, Höchstenergie, Standort.

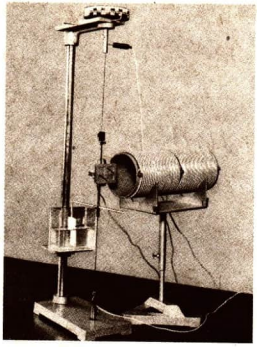
Mehrfach-Teilchenbeschleuniger

In der Anordnung zur Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons ist die Beschleunigungsarbeit des elektrischen Feldes nur einmal genutzt worden. Das magnetische Feld trägt lediglich zur Änderung der Richtung der Bahngeschwindigkeit bei und zwingt das Teilchen auf die Kreisbahn. Wenn es um eine möglichst hohe kinetische Energie der Teilchen geht, muß das elektrische Feld zeitlich nacheinander mehrfach zur Beschleunigung genutzt werden. Diese Einrichtung heißt *Zyklotron* oder *Kreisbeschleuniger*.

Anwendungsgrenzen des Zyklotrons. Es können Teilchen mit positiver oder negativer Ladung beschleunigt werden. Die zu erreichende Endenergie der Teilchen hängt von der Anzahl der Umläufe und damit vom Radius des Aggregates ab. Für 10 MeV ist bei Protonen ein Radius von mindestens 33 cm nötig. Dieser Energiebetrag ist jedoch relativ klein. Bei größeren Radien wachsen aber die Schwierigkeiten mit der Erzeugung eines so großen, exakt bestimmten Magnetfeldes. Noch aus einem anderen Grunde können Zyklotrone mit mehr als 20 MeV Maximalenergie nicht gebaut werden. In Experimenten war beobachtet worden, daß die spezifische Ladung e/m der Elektronen mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. Das liegt an der mit der speziellen Relativitätstheorie nachgewiesenen Zunahme der Masse mit der Geschwindigkeit.

Die relativistische Massenzunahme ist unmerklich klein bei $v \ll c$ (d. h. $v < 10\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$). Bei größeren Geschwindigkeiten ist die Massenzunahme spürbar, dann ist die Frequenz nicht mehr von v und r unabhängig. Die Frequenz der Beschleunigungsspannung muß sich bei hohen Energien verändern. Geräte mit diesen Eigenschaften heißen *Synchrozyklotron* oder *Phasotron*. Physikalische Forschungsstätten, in denen an der Aufdeckung der Struktur der Materie gearbeitet wird, haben heute das Ausmaß riesiger Industrieanlagen. Kleinere Länder können die notwendigen Mittel für derartige Anlagen nicht aufbringen. Die sozialistischen Länder haben in Dubna ein gemeinsames Forschungszentrum. Die Atomphysiker der Sowjetunion, der Deutschen Demokratischen Republik und der anderen beteiligten Staaten geben dort ein Beispiel für internationale sozialistische Gemeinschaftsarbeit.

Durch Verträge ist uns an dieser hervorragenden Forschungsstätte die Aus- und Weiterbildung von Spezialisten garantiert, die wir in unserer Republik brauchen, und wir können stolz darauf sein, dort unseren Beitrag zur weiteren Entwicklung der Wissenschaft an der Seite unserer sowjetischen Freunde leisten zu dürfen.



65/1 Magnetometer

Begründen Sie die Bezeichnung relative Permeabilität!

Drücken Sie die Größengleichung für das homogene elektromagnetische Feld einer Spule in Worten aus!

Ein Teilprodukt aus obiger Gleichung $I_{\text{err}} \cdot \frac{N}{l}$ wird „magnetische Feldstärke $\vec{H}$" genannt, treffender wäre die Bezeichnung „magnetische Erregung". $\vec{H}$ ist auch eine feldbeschreibende vektorielle Größe, sie erfaßt aber nicht den Stoff, in dem das Feld aufgebaut ist.

$$B = \mu \cdot H \tag{66}$$

$\vec{B}$ und $\vec{H}$ sind nicht immer gleichgerichtet.

Homogene elektromagnetische Felder haben eine große praktische Bedeutung. Allerdings ist ihre technische Verwirklichung sehr schwierig, wenn sie große Abmessungen ($d > 1$ m) annehmen sollen.

Nennen Sie außer dem Synchrotron andere technische Anwendungsbeispiele für das homogene elektromagnetische Feld!

Zum Vergleich der magnetischen Induktion eines unbekannten Feldes mit der eines bekannten Feldes wird oft statt einer Meßprobespule mit Dynamometer eine einfache Magnetnadel, an einem Faden leicht drehbar aufgehängt, verwendet (Bild 65/1).

Stoffe im magnetischen Feld

Wenn die Stärke eines Magnetfeldes, gemessen durch die magnetische Induktion B, mit den Größen des Objektes bestimmt werden soll, die das Feld erregen und in dem es erregt wird, so tritt bekanntlich mit der Permeabilität μ eine Stoffgröße auf.

$$B = \mu \cdot I_{\text{err}} \frac{N}{l} \tag{67}$$

Es ist bekannt, daß sich die verschiedenen Stoffe in der Nähe eines Magneten, also in seinem Felde, sehr unterschiedlich verhalten. Nach dem magnetischen Verhalten teilt man die Stoffe in drei Klassen ein:

Ferromagnetische Stoffe. Körper aus ferromagnetischen Stoffen, solange sie keine Permanentmagnete sind, werden in ein Magnetfeld hineingezogen. Beispiele: Eisen, Kobalt, Nickel. Der Betrag der Permeabilität ist nicht konstant, er wächst mit der Stärke des magnetischen Feldes bis zur Größenordnung 10^3. Mit steigender Temperatur verringert sich die Wirkung der ferromagnetischen Stoffe.

Paramagnetische Stoffe. Körper aus paramagnetischen Stoffen werden in das Gebiet eines magnetischen Feldes hineingezogen. Beispiele: Aluminium, Platin, Sauerstoff.

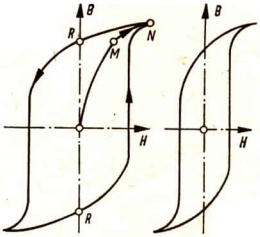
Der Betrag der Permeabilität ist konstant in der Größenordnung 10^0, unabhängig von der Stärke des Feldes. Mit steigender Temperatur sinkt die Permeabilität der paramagnetischen Stoffe.

Diamagnetische Stoffe. Körper aus diamagnetischen Stoffen werden aus einem Magnetfeld herausgedrängt.

Beispiele: Wasser, Kochsalz, Wismut. Die Permeabilität ist konstant, unabhängig von der Stärke des magnetisierenden Feldes und von der Temperatur. Sie liegt in der Größenordnung etwas kleiner als 1.

Die Magnetisierungskurve. Für die technische Verwendung von Stoffen in Anlagen mit magnetischen Feldern muß man deren magnetisches Verhalten genau kennen. Einen Aufschluß erhält man durch das Magnetisieren eines solchen Körpers und das Aufnehmen einer Kurve, die den Zusammenhang zwischen magnetischer Induktion B und magnetischer Feldstärke H zeigt. Man bezeichnet die Kurve als *Hystereseschleife.*

$$B = \mu \cdot H = \mu \cdot I_{err} \cdot \frac{N}{l}.$$



66/1 Magnetisierungskurven von Stahl (links) und magnetisch weichem Eisen (rechts)

Physikalisch-technische Auswertung des Zusammenhangs zwischen magnetischer Induktion B und magnetischer Feldstärke H:

1. Was bedeutet der steile Anstieg des Kurvenabschnitts OM? (Permeabilität!)
2. Was ist aus dem langsamen Anstieg gegen N zu schließen? (Sättigung!)
3. Welcher Sachverhalt entspricht dem Abschnitt NR? (Restmagnetismus!)
4. Was sagt ein voller Umlauf in Richtung der Pfeile? (Umpolung)
5. Welche sachliche Aussage steckt in der wechselnden Richtung der Kurve? (Permeabilität — Vorbehandlung des Werkstückes!)
6. Für welche technischen Zwecke sind Stoffe mit den beiden Magnetisierungskurven am geeignetsten?

Moderne magnetische Werkstoffe

Im 20. Jahrhundert haben die Werkstoffe für Dauermagnete eine sehr interessante Entwicklung erfahren. 1917 gaben die japanischen Physiker HONDA und TAKEI Kobalt zu Wolframstahl und erhielten sehr starke Magnete. Ein anderer Japaner erfand 1932 noch stärkere Magnete in Legierungen von Eisen, Nickel und Aluminium. Heute werden solche künstlichen Magnete noch hergestellt, bei uns z. B. im Chemiekombinat Bitterfeld. Besondere Bedeutung haben aber die keramischen Werkstoffe mit

magnetischen Eigenschaften erlangt. Sie haben das Gefüge eines Sinterkörpers.

Die chemische Zusammensetzung ist aus der Summenformel zu erkennen, z. B. $BaO \cdot 6\,Fe_2O_3$, und nach ihr richten sich die spezifischen Merkmale der Stoffe.

Der VEB Keramische Werke Hermsdorf in Thüringen hat durch seine hochwertigen Neuentwicklungen einen guten Ruf in der Welt. Es werden dort Bauelemente der Nachrichten-, Meß- und Datenverarbeitungstechnik gefertigt.

Ein Fertigungsprodukt sind **weichmagnetische Ferrite** (Manifer). Der Stoff hat eine Dichte von $(3{,}8 \cdots 5)\ g \cdot cm^{-3}$ und einen spezifischen Gleichstromwiderstand von (0,1 bis 10^{10}) $\Omega \cdot cm$. Aus der sehr schlanken Hysteresekurve ist zu erkennen, daß Manifer die magnetischen Eigenschaften sehr schnell verliert. Es ist für Spulenkerne gut geeignet.

Ein weiteres Fertigungsprodukt wird Rechteckferrite genannt, weil die Hystereseschleife fast rechteckige Form hat. Physikalisch sagt das aus, daß sich in diesen Stoffen bei Umkehr der Erregerstromrichtung die magnetische Induktion schnell ändert. Ordnet man den beiden mittleren B_-- und B_+-Werten zwei Informationen zu (1; 0), sind diese Stoffe hervorragend geeignet für Kerne in Schalt- und Speicheranlagen der Datenverarbeitungsmaschinen.

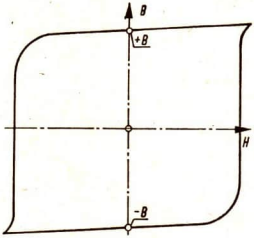
Der spezifische Widerstand der Rechteckferrite ist größer als $10^7\ \Omega cm$.

Am bekanntesten sind die **hartmagnetischen Ferrite** (Maniperm). Sie behalten ihre magnetischen Eigenschaften unbegrenzt, nur bei falscher Behandlung, z. B. starker Abkühlung, erfolgt irreversible Entmagnetisierung. Maniperm ist ein Bariumferrit $BaO \cdot 6\,Fe_2O_3$.

Die Dichte ist ähnlich wie die der anderen Ferrite ($\approx 5\ g \cdot cm^{-3}$), der spezifische Widerstand liegt zwischen ($10^3 \ldots 10^8$) $\Omega \cdot cm$.

Hartmagnetisch ist auch das sogenannte Manigum, es ist biegsamer Magnetplattengummi.

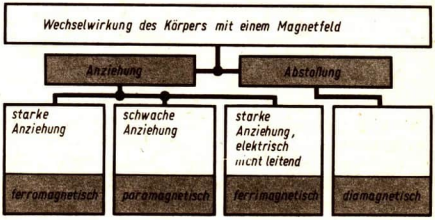
Hartmagnetische Werkstoffe werden in verschiedenen technischen Geräten verwendet (Tabelle 67/2).

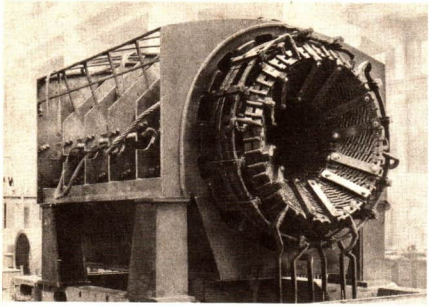


67/1 Charakteristik eines Rechteckferrits

67/2

Physikalisches Prinzip	Beispiel
Erzeugung einer mechanischen Kraft	Kompaß, Trennmagnet, Kupplung, Bremse, Türverschluß, Dämpfer
Umwandlung mechanischer in elektrische Energie	Fahrraddynamo, Mikrofon, Kleinstgenerator, Tonabnehmer, Tachometer
Umwandlung elektrischer in mechanische Energie	Lautsprecher, Telefon, Kleinstmotor, elektrische Uhr





Die elektromagnetische Induktion

Das physikalisch Wesentliche der großen Energiewandler, die heute in den meisten Kraftwerken die elektrische Energie für alle Bereiche unseres gesellschaftlichen Lebens liefern, entdeckte MICHAEL FARADAY (1791 bis 1867). Seine Entdeckung kann man der von CHRISTIAN OERSTED gegenüberstellen und damit zugleich den Zusammenhang zwischen einem Elektromotor und einem Elektrogenerator sichtbar machen.

Induktionserscheinungen

Zur Wiederholung der wichtigsten Erkenntnisse werden folgende Versuche durchgeführt:

9 ▼ Ein Gleichstrommotor aus Aufbauteilen wird durch das Anlegen einer Spannung in Betrieb gesetzt.

Physikalische Gesetzmäßigkeit: Auf einen stromdurchflossenen Leiter wirken in einem magnetischen Feld Kräfte. (Elektromotorisches Prinzip)

10 ▼ Der drehbare Anker der gleichen Versuchsanordnung wird diesmal mechanisch angetrieben. An Stelle der Spannungsquelle ist eine kleine Glühlampe in den Stromkreis geschaltet.

Physikalische Gesetzmäßigkeit: Wird durch äußere Einwirkung erreicht, daß das eine Leiterschleife durchsetzende Magnetfeld sich ändert, wird in ihr eine elektrische Spannung induziert. (Generatorprinzip)

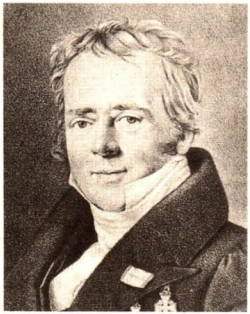
11 ▼ Ein Fahrraddynamo wird zuerst als Spannungsquelle betrieben, anschließend läßt man ihn durch Anlegen einer Wechselspannung als Motor laufen.

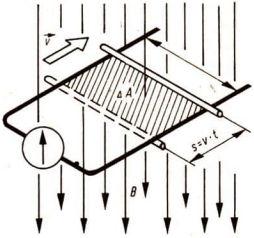
Allgemeine Erkenntnis:

▷ **Motor- und Generatorprinzip sind umkehrbar. Es findet eine Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie statt und umgekehrt. Das magnetische Feld ist in jedem Fall der Mittler.**

Der Vorgang der elektromagnetischen Induktion ist nicht auf den Fall der Umwandlung mechanischer in elektrische

68/2 HANS CHRISTIAN OERSTED geboren am 14. 8. 1777 in Rudkjöbing verstorben am 9. 3. 1851 in Kopenhagen; untersuchte seit 1812 die Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus und entdeckte 1820 den Elektromagnetismus; stellte erstmals Chloraluminium dar; gründete im Jahre 1829 Dänemarks Technische Hochschule und die Polytechnische Hochschule.





69/1 Zur Ableitung des Induktionsgesetzes für einen einfachen bewegten Leiter

Energie beschränkt. Die notwendige zeitliche Änderung des vermittelnden Magnetfeldes kann auch durch Verwendung von Wechselstrom in der felderregenden Spule erreicht werden. Die Umwandlung elektrischer Energie aus einem Leiterkreis über das zugehörige elektromagnetische Feld in elektrische Energie in einem zweiten Leiterkreis ist auch elektromagnetische Induktion.

Nennen Sie technische Aggregate, in denen die eine oder die andere Form der elektromagnetischen Induktion vorliegt!
Beschreiben Sie ausführlich die Symmetrie in Oersteds und Faradays Entdeckungen!

(OERSTED: *bewegte elektrische Ladungen → Kräfte*
FARADAY: *Kräfte → bewegte elektrische Ladungen.*)

Induktion im bewegten und im ruhenden Leiter

Das Entstehen einer Spannung in einem Leiter, der sich in einem Raum mit veränderlichem Magnetfeld befindet, wiederholt sich unter gleichen Bedingungen beständig. Das spiegelt einen notwendigen, allgemeinen und wesentlichen Zusammenhang wider. Mit diesen Eigenschaften ist die elektromagnetische Induktion im philosophischen Sinne eine Gesetzmäßigkeit. Die Formulierung des Gesetzes als physikalische Größengleichung wird nun von einem Ansatz hergeleitet, der vor allem die energetischen Zusammenhänge betont.

Der beschrittene Weg ist eine logische Deduktion.

Die bekannten Aussagen, von denen auf die neue Aussage geschlossen wird, sind:

mechanische Arbeit $W_m = F \cdot s$ (68)

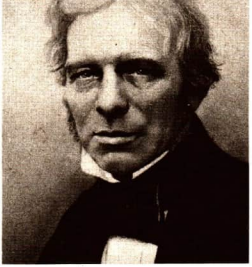
elektrische Arbeit $W_{el} = U \cdot I \cdot t$ (69)

Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

$$F = I \cdot l \cdot B\,. \qquad (70)$$

1. Am Leiterstück (Bild 69/1) der Länge l wird die mechanische Arbeit $W = F_1 \cdot s$ verrichtet.
2. Als Folge davon entsteht an den Leiterenden eine Induktionsspannung U, und es fließt ein Strom mit der Stärke I, solange der Leiter bewegt wird. In dem bewegten Leiter wird also die elektrische Arbeit $W_{el} = U \cdot I \cdot t$ verrichtet.
3. Der vom Induktionsstrom durchflossene Leiter l erfährt die Lorentzkraft $F_2 = I \cdot l \cdot B$. Ihr Betrag ist wegen der Umkehrbarkeit des Motor-Generator-Prinzips gleich dem Betrag der Kraft F_1, die zum Bewegen des Leiterstücks durch das Magnetfeld aufzuwenden ist.

69/2 MICHAEL FARADAY
geboren am 22. 9. 1791 in Newington Butts bei London, verstorben am 25. 8. 1867 in Hampton Court. Er begründete die Lehre von den elektrischen und magnetischen Feldern, schuf die Modellvorstellung von den Feldlinien und entdeckte 1831 die elektromagnetische Induktion; 1833 beschrieb er die Gesetze der Elektrolyse



4. Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie ist die aufgewandte mechanische Energie gleich der daraus erzeugten elektrischen Energie.

$$U \cdot I \cdot t = F \cdot s \qquad (71)$$

$$F = I \cdot l \cdot B \qquad (72)$$

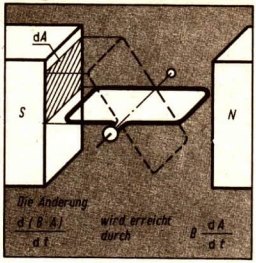
$$s = v \cdot t \qquad (73)$$

$$U \cdot I \cdot t = I \cdot l \cdot B \cdot v \cdot t \qquad (74)$$

Auf beiden Seiten der Gleichung handelt es sich um die gleiche Stromstärke und die gleiche Zeit.
Somit ergibt sich für die

▶ **Induktionsspannung** $U = B \cdot l \cdot v$. (75)

Die Induktionsspannung U tritt zwischen den Enden eines Leiters der Länge l auf, wenn er mit der Geschwindigkeit v rechtwinklig zur Richtung eines homogenen magnetischen Feldes der magnetischen Induktion B bewegt wird.
Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn der Leiter ruht und ein Magnetfeld rechtwinklig zum Leiter bewegt wird.



70/1 Generator

Das Induktionsgesetz in allgemeingültiger Form

Von der fundamentalen Erscheinung der elektromagnetischen Induktion in einem bewegten Leiterstück erfolgt nun der schrittweise Übergang zum allgemeinen Fall.
Zunächst sei die ganze Leiterschleife betrachtet (Bild 69/1). Mit der Ortsveränderung des Leiterstückes l, ob nach links oder nach rechts, ändert sich die vom magnetischen Feld durchsetzte Fläche A.

Aus $U = B \cdot l \cdot v$ wird mit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

$U = B \cdot l \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}$ und mit $l \cdot \Delta s = \Delta A$

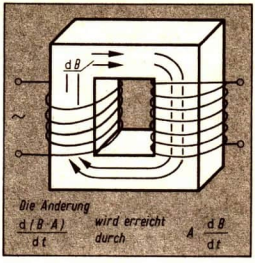
$$U = \frac{\Delta B \cdot A}{\Delta t} \qquad (76)$$

Wenn die Induktion nicht nur in einer **Leiterschleife**, sondern in mehreren Leiterschleifen, also in einer **Spule** mit N Windungen erfolgt, ist die Induktionsspannung N-mal so groß.

$$U = N \cdot \frac{\Delta B \cdot A}{\Delta t} \qquad (77)$$

Für das Produkt $B \cdot A$ ist die Bezeichnung „magnetischer Fluß Φ" üblich. Das physikalisch Wesentliche wird aber durch die einzelnen Faktoren der Gleichung (77) besser aufgedeckt. Durch Bilden des Grenzwertes erhält man die Momentangröße der

▶ **induzierten Spannung** $U = N \frac{dB \cdot A}{dt}$. (78)



71/1 Transformator

Das Erzeugen einer Induktionsspannung läßt sich im Laboratoriumsexperiment durch mannigfaltige Maßnahmen verwirklichen.

Leiterschleife in den Raum mit konstantem homogenen Feld hineinschieben oder herausziehen (ΔA),
Leiterschleife in den Raum mit konstantem, inhomogenen Feld hineinschieben oder herausziehen (ΔA und ΔB),
Erregerstrom für magnetisches Feld ein- und ausschalten bzw. ändern (ΔB),
schmale Leiterschleife in einem Raum mit konstantem Feld aufbiegen (ΔA),
Leiterschleife in Raum mit konstantem Feld drehen (ΔA),
Stoff im felderfüllten Raum auswechseln (ΔB),

aber:

Leiterschleife in einem Raum mit konstantem homogenen Feld verschieben, ohne zu drehen (B und A konstant), ergibt keine Induktionsspannung.

Von technischer Bedeutung sind nur zwei Fälle, sie sind in den Bildern 70/1 und 71/1 skizzenhaft dargestellt.

Das Lenzsche Gesetz

Einleitend soll die Frage zu einem im allgemeinen schon bekannten Sachverhalt systematisch beantwortet werden: Ist es möglich, einen Generator und einen Elektromotor so zusammenzuschalten, daß der Generator nach kurzem Anstoß den Motor treibt, der Motor den Generator in Betrieb hält, damit er selbst ständig weiterläuft und noch Energie nach außen abgibt (Bild 71/2)?

Analyse des Problems

1. Der Induktionsstrom mit der Stärke I ist einerseits die Folge der auf den Leiter l im Magnetfeld B ausgeübten Kraft F_1 ($F_1 - B - I$-Vektordreibein).
2. Der Induktionsstrom mit der Stärke I ist andererseits die Ursache der Kraft F_2 auf den Leiter l ($I - B - F_2$-Vektordreibein).
3. F_2 und F_1 haben entgegengesetzten Richtungssinn. F_2 wirkt der Kraft F_1, die I erzeugt, entgegen.
4. Energiebilanz

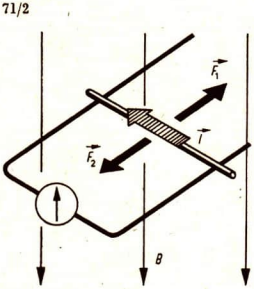
   Zugeführte Energie: $W_1 = F \cdot s = I \cdot l \cdot B \cdot v \cdot t$
   mit $F = I \cdot l \cdot B$ und $s = v \cdot t$

   Entnommene Energie: $W_2 = I \cdot U \cdot t = I \cdot l \cdot B \cdot v \cdot t$
   mit $U = B \cdot l \cdot v$ (Induktionsspannung in einem Leiterstück)

   $W_1 = W_2$ (von Reibungsverlusten abgesehen)

   Erkenntnis: Der elektrische Generator gibt den gleichen Betrag Energie ab, der ihm in anderer Form zugeführt

71/2



wird. Eine zusätzliche Entnahme von Energie an Generator oder Motor ist nicht möglich.

Zur Prüfung der Richtigkeit dieses Schlusses werde das Gegenteil postuliert.

Annahme: Ein Strom mit der Stärke I (in Bild 71/2) fließe im Leiter nach rechts. Es ergäbe sich folgende Kette unmittelbarer Schlüsse:
F_2 und F_1 hätten gleichen Richtungssinn.
Leiter l werde nach hinten beschleunigt.
I würde vergrößert.
Die resultierende Kraft würde größer.
Die Beschleunigung von l würde noch größer werden usw.

Erkenntnis: Die Annahme führt zu einem *perpetuum mobile*. Dieses widerspricht der Erfahrung, die im Satz von der Erhaltung der Energie gesetzmäßig erfaßt wird.

- *Nennen Sie Beispiele aus Ihrem Erfahrungsbereich, die den Energieerhaltungssatz bei der elektromagnetischen Induktion bestätigen!*

Eine Aussage über die Richtung des Induktionsstromes liefert das Lenzsche Gesetz:

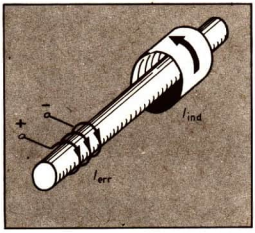
▶ **Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß das durch ihn erzeugte Magnetfeld der Ursache des Induktionsvorganges entgegenwirkt.**

Da Stromstärke und Spannung vektorielle Größen mit gleichem Richtungssinn sind, ist die Vereinigung des Induktionsgesetzes mit dem Lenzschen Gesetz so zu schreiben:

▶ $$U = -N \cdot \frac{d(B \cdot A)}{dt}. \qquad (79)$$

Die Richtung des Erregerfeldes und des induzierten Feldes und ihre Wechselwirkung demonstriert der Thomsonsche Ringversuch (Bild 72/1) sehr schön:

- *Ergänzen Sie Bild 72/1 an der Tafel durch die Richtungen von B_{err}, B_{ind} und F!*
- *Warum gelingt der Versuch auch mit Wechselspannung?*



72/1 Thomsonscher Ringversuch

Die Selbstinduktion

Aus dem Physikunterricht in Kl. 9 ist bekannt:
Der Induktionsvorgang durch ein sich änderndes Magnetfeld im Leiter des Erregerstroms heißt *Selbstinduktion*.
Aus dem Wesen dieser Erscheinung (Wechselwirkung des Leiters über das eigene Magnetfeld mit sich selbst) folgt, daß sie nur von Größen abhängen kann, die den Leiter

selbst charakterisieren. Grundsätzlich ist der Vorgang eine Induktion, also gilt

$$U = -N \cdot \frac{\mathrm{d}(B \cdot A)}{\mathrm{d}t}. \tag{80}$$

Die magnetische Induktion B wird ersetzt durch Größen des felderzeugenden Leiters (der Spule)

$$B = \mu \cdot I_{\mathrm{err}} \cdot \frac{N}{l}, \tag{81}$$

$$U = -N \frac{\mathrm{d}\left(\mu \cdot I_{\mathrm{err}} \cdot \frac{N}{l} \cdot A\right)}{\mathrm{d}t}. \tag{82}$$

Da sich in dem Leiter (der Spule) nur die Stromstärke ändert, können alle konstanten Größen vor den Differentialquotienten gesetzt werden.

$$U = -\frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l} \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}. \tag{83}$$

Diese konstanten Größen kennzeichnen nur die Spule einschließlich den Stoff, in dem sie sich befindet.
So wurde die Größe definiert als

Induktivität $L = \dfrac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}$. (84) ◀

Schreiben Sie die Gleichung für die Selbstinduktionsspannung unter Einbeziehung der Induktivität L auf! ●

Deuten Sie das Minuszeichen! ●

Formulieren Sie eine genetische Definition für die Einheit Henry! ●

Achtung: Spulen mit hoher Induktivität erzeugen bei schnellem Ausschalten hohe Selbstinduktionsspannungen und Funken am Schalter.

Welche unangenehmen Begleiterscheinungen treten durch die Funken auf? Wie sind sie zu verhindern? ●

Die elektromagnetische Induktion und Selbstinduktion sind ein anschauliches Beispiel dafür, daß den natürlichen Vorgängen Widersprüche in dialektischer Einheit eigen sind, wenn Induktion und Selbstinduktion als widersprüchlich erkannt werden.

Die Energie des magnetischen Feldes

Die Versuche zur Selbstinduktion sollen jetzt in energetischer Hinsicht ausgewertet werden.

12

▼ Der Schalter S wird abwechselnd geschlossen und geöffnet, einmal ohne, einmal mit Eisenkern in der Spule R_2.

Beobachtungen zum Versuch (12): Ohne Kern steigt die Stromstärke momentan auf den Höchstwert und fällt beim Ausschalten sofort auf Null. Mit Kern steigt die Stromstärke allmählich auf den gleichen Höchstwert. Nach dem Ausschalten fließt noch eine Weile ein langsam verschwindender Strom (Bild 74/1).

Deutung des Versuchsergebnisses: Wenn nach dem Abschalten noch ein Strom fließt, der in den Widerständen Wärme erzeugt, muß Energie vorhanden sein. Sie kann nur aus dem Magnetfeld der Spule R_2 kommen, das beim Einschalten durch Energieentzug (langsam steigende Stromstärke) aufgebaut worden war.

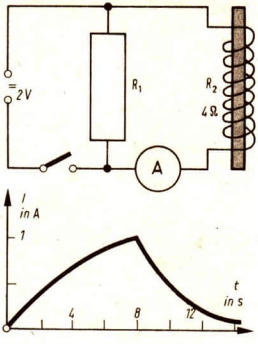
Es wird die Energiebilanz für die Spule R_2 nach Bild 74/1 aufgestellt. Dabei wird das Zeitintervall Δt so klein gewählt, daß sich die Stromstärke I indessen nicht wesentlich ändert. In die Energiebilanz gehen ein

1. die von der Spannungsquelle abgegebene Energie
$$\Delta W = U \cdot I \cdot \Delta t\,,$$
2. die an dem Widerstand R_2 umgewandelte Wärmeenergie
$$\Delta W_1 = I^2 \cdot R_2 \cdot \Delta t\,,$$
3. die an R_2 umgewandelte Energie des Magnetfeldes
$$\Delta W_2 = I \cdot U_{\text{ind}} \cdot \Delta t = I \cdot L \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot \Delta t\,,$$
$$U \cdot I \cdot \Delta t = I^2 \cdot R_2 \cdot \Delta t + I \cdot L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot \Delta t\,.$$

Der zweite Anteil (die Feldenergie) wird der Spannungsquelle nur entnommen, solange der Selbstinduktionsvorgang stattfindet, d. h. solange sich die Stromstärke ändert. Es ist die Arbeit, die in dem Zeitintervall Δt gegen die Selbstinduktionsspannung $L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ verrichtet werden muß.

Ihr Grenzwert ist
$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = L \cdot I \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\,. \qquad (85)$$

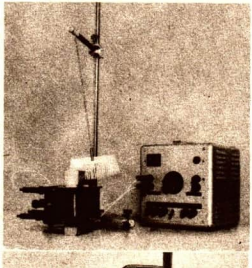
Ist das Zeitintervall vom Augenblick des Einschaltens ($t = 0$) bis zum Zeitpunkt t gerechnet, in dem I konstant wird, ergibt sich das Integral
$$W(t) = L \int_0^t I(t) \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \cdot \mathrm{d}t\,, \qquad (86)$$
$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2\,. \qquad (87)$$

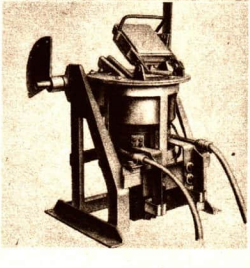


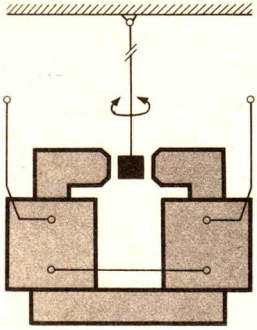
74/1

74/2 Waltenhofensches Pendel zur Demonstration der Wirbelstromerscheinungen

74/3 Induktionsschmelzofen







75/1

Das ist die beim Aufbau des Magnetfeldes verrichtete Arbeit. Die den Prozeß der Energieumwandlung beschreibenden Größen L und I lassen sich substituieren durch Feldgrößen.

Mit $L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}$ und $I = \frac{B \cdot l}{\mu \cdot N}$ erhält man

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \cdot B^2 \cdot V. \qquad (88)$$

Das ist die im Raum $V = A \cdot l$ der Spule gespeicherte Energie des magnetischen Feldes, das in einem Stoff mit der Permeabilität μ aufgebaut ist und das die magnetische Induktion B besitzt.

Beachten und diskutieren Sie die Ähnlichkeit der hier gefundenen Gleichungen für die Energie des magnetischen Feldes mit der Gleichung für die kinetische Energie eines Körpers!

Wirbelströme

Die elektromagnetische Induktion tritt gesetzmäßig auf, wenn die Bedingungen gegeben sind (zeitliche Änderung des einen Leiter durchsetzenden Magnetfeldes). Soll dieser objektiv ablaufende Vorgang technisch genutzt werden, richtet man sich mit der Konstruktion (Form, Richtung und Lagerung des Leiters) nach dem Richtungszusammenhang, der mit dem Induktionsgesetz verbunden ist. In technischen Aggregaten liegt also eine vom Menschen gesteuerte Induktion vor, das trifft für die Richtung und den Betrag der Ströme bzw. Kräfte zu.

Was der Induktionsvorgang ungesteuert bewirken würde, zeigen uns zwei Versuche:

13 Entsprechend Bild 75/1 führt ein massives Stück Kupfer zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten eine Torsionsbewegung aus, solange kein Feld da ist. Sobald der Strom eingeschaltet ist, wird die Bewegung gebremst.

14 Läßt man Wechselstrom durch eine Spule fließen, die auf einem Kern aus massivem Eisen, nicht auf einem geblätterten Eisenkern sitzt, wird dieser Kern in kurzer Zeit sehr heiß.

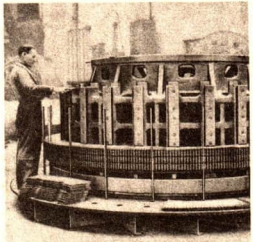
Die Ursache beider beobachteter Erscheinungen ist die elektromagnetische Induktion. Die Induktionsströme sind nicht lokalisiert, sie treffen auf sehr geringen elektrischen Widerstand und nehmen deshalb beachtliche Beträge an. Sie heißen **Wirbelströme.**

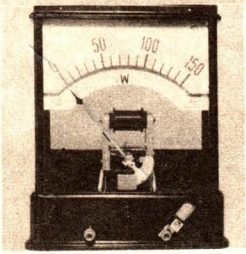
Erläutern Sie mit den experimentellen Beobachtungen, daß für Wirbelströme auch das Lenzsche Gesetz gilt.

Erläutern Sie die in den Bildern 74/2, 74/3 und 75/2, 75/3 dargestellten Beispiele in Bezug auf die Wirbelströme!

75/2 Geblättertes Generatorengehäuse

75/3 Wirbelstromdämpfer am Meßgerät





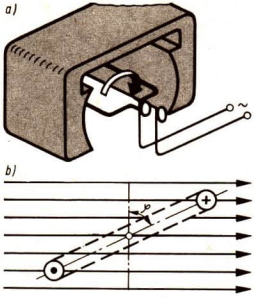
Anwendung des Induktionsgesetzes

Der Wechselstromgenerator. Wechselstromgeneratoren werden in vielen Ausführungen gebaut, als Innen- oder Außenpolmaschinen, als Ein- oder Mehrphasengeneratoren usw. Das Grundprinzip ist in Bild 76/1 a zu erkennen. Wie schon im Abschnitt Induktionsgesetz (↗ S. 70) dargestellt, ist der zeitlich veränderliche Parameter hier die Fläche A. Entsprechend Bild 76/1 b variiert die vom Feld durchsetzte Fläche mit $\cos\varphi = \cos\omega \cdot t$ zwischen dem vollen Betrag und Null. Das Induktionsgesetz erhält die spezielle Form

$$U = -N \cdot B \cdot A \frac{\mathrm{d}(\cos\omega \cdot t)}{\mathrm{d}t}. \qquad (89)$$

Die Ableitung gibt die Momentanspannung

$$U = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin\omega \cdot t. \qquad (90)$$



76/1 a) Wechselstromgenerator
b) vom Feld durchsetzte Fläche

Der magnetohydrodynamische Generator. FARADAY hatte nach seiner Entdeckung des Induktionsgesetzes folgende Schlußfolgerung gezogen:

1. Prämisse: Zur Erzeugung einer Induktionsspannung werden ein magnetisches Feld und bewegte elektrische Ladungsträger benötigt. Die Bewegung muß möglichst senkrecht zur Feldrichtung erfolgen.

2. Prämisse: Die Erde hat ein Magnetfeld, Ladungsträger fließen mit dem Salzwasser der Nordsee bei Flut in die Themsemündung ein. Deren Bewegung erfolgt nahezu senkrecht zu den magnetischen Feldlinien der Erde.

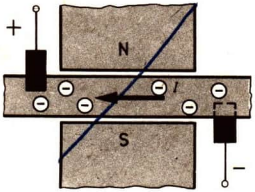
Schluß: Wenn man an den gegenüberliegenden Ufern der Themse zwei Elektroden anbringt, müßte in dem genannten Zeitintervall eine elektrische Spannung abzunehmen sein.

Der praktische Versuch zur Bestätigung der Hypothese brachte kein positives Ergebnis. Doch der Grund für das Mißlingen lag nicht in der Theorie, sondern in den ungenügend empfindlichen Meßgeräten. Als THOMSON später den Versuch mit besseren Geräten wiederholte, hatte er Erfolg, er wies eine induzierte Spannung nach.

Dieses Verfahren zur Gewinnung elektrischer Energie wurde damals nicht volkswirtschaftlich genutzt, weil die Leistung eines solchen natürlichen Generators relativ gering ist. Effektiv wird der sog. MHD-Generator, wenn die Ladungsträger bei sehr hoher Temperatur mit hoher Geschwindigkeit durch ein starkes Feld bewegt werden (Bild 76/2).

Die Versuche laufen heute nicht mehr mit Wasser, sondern mit ionisierten Gasen. Darum ist die Bezeichnung magnetogasdynamischer Generator (MGD) berechtigt (↗ Bild 109/1).

76/2 Magnetogasdynamischer Generator



Quellen	
Gravitationsfeld	Masse der Körper
elektrisches Feld	ruhende elektrische Ladungen
magnetisches Feld	bewegte elektrische Ladungen
Feldgrößen für Intensität der Wechselwirkung	
Gravitationsfeld	$g = F/m$
elektrisches Feld	$E = F/Q$
magnetisches Feld	$B = F/I \cdot l$
Richtung der Kräfte auf Probekörper	
Gravitationsfeld	$\vec{F} \parallel \vec{g}$
elektrisches Feld	$\vec{F} \parallel \vec{E}$
magnetisches Feld	$\vec{F} \perp \vec{B} \perp \vec{I}$
Richtung der Feldgrößen	
Gravitationsfeld elektrisches Feld magnetisches Feld	tangential zu den Kraftlinien
relative Intensität der Wechselwirkung	
Gravitationsfeld	10^{-40}
elektrisches Feld	1
magnetisches Feld	1
Feldkonstante	
Gravitationsfeld	$\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,m^3/kgs^2$
elektrisches Feld	$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,As/Vm$
magnetisches Feld	$\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6}\,Vs/Am$
Einfluß auf Stoff im Feld	
Gravitationsfeld elektrisches Feld magnetisches Feld	nicht feststellbar Influenz Magnetisierung
stoffspezifische Feldgröße	
Gravitationsfeld	–
elektrisches Feld	ε_r
magnetisches Feld	μ_r

Der Vergleich physikalischer Felder

Zum Abschluß sei eine Zusammenfassung der Kenntnisse über physikalische Felder vorgenommen. Dazu werden nacheinander einige wesentliche Gesichtspunkte ausgewählt:

Klassifizieren der Felder. Im Verlauf des Physiklehrgangs der allgemeinbildenden Schule wurden Gravitationsfelder und elektromagnetische Felder behandelt. Auf Kernfelder wurde hingewiesen. Die feldtheoretische Betrachtung von Temperaturen, Geschwindigkeiten, Höhenlagen, Drucken usw. im Raum wurde als möglich erkannt, aber nicht ausführlich behandelt. Die größte Aufmerksamkeit erfuhren die elektromagnetischen Felder. Sie lassen sich klassifizieren und zugleich systematisieren wie folgt:

elektrostatische und magnetostatische Felder $I = 0$
Felder der stationären Ströme $I \neq 0$ (konstant)
Felder der quasistationären Ströme $I \neq 0$ (langsam veränderlich)
allgemeine elektromagnetische Felder $I \neq 0$ (beliebig veränderlich)

Ordnen Sie jeder Klasse von Feldern konkrete Beispiele zu! ●

Physikalische Theorie der Felder und philosophischer Materiebegriff. Die genannten Felder existieren objektiv real außerhalb und unabhängig von unserem Bewußtsein. Sie sind neben dem Stoff eine physikalische Strukturform der Materie. Stoffe und Felder existieren im Raum und in der Zeit.

Der Stoff ist immer als abgeschlossener Körper mit endlichem Volumen zu erfassen, die Begrenzung eines Feldes ist dagegen nie exakt anzugeben. Ein stofflicher Körper ist stets **diskret** lokalisierbar, ein Feld erfüllt den Raum **kontinuierlich.** Beide Strukturformen der Materie sind ineinander umwandelbar, Stoff und Feld sind eine dialektische Einheit. Bei der mikroskopischen Betrachtung der Materie gelangt der Mensch an eine Grenze, an der das Objekt, z. B. das Elektron, sowohl als Partikel (stofflicher Körper) als auch als Feld registriert werden kann. Der Inhalt des Begriffes Elementar**teilchen** erfaßt nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand der Wissenschaft **beide** Strukturformen. Stoffe und Felder besitzen eine Masse, nur ist die Dichte eines Feldes unmeßbar klein. Beide sind Träger von Energie. Es sind enorme Beträge von Energie, die bei Kernprozessen frei werden. Umgekehrt sind sehr hohe Energien notwendig, um Kernumwandlungen künstlich in Gang zu setzen.

Unterscheiden Sie Gesetze und Definitionen an Beispielen aus der Feldtheorie! ●

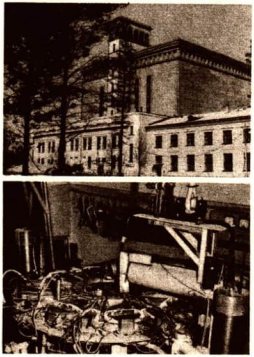
Gesetze	Definitionen
$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$	$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$
$F = m \cdot g$	$m = \frac{F}{a}$
$F = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$U = \frac{\Delta W}{\Delta Q}$ usw.

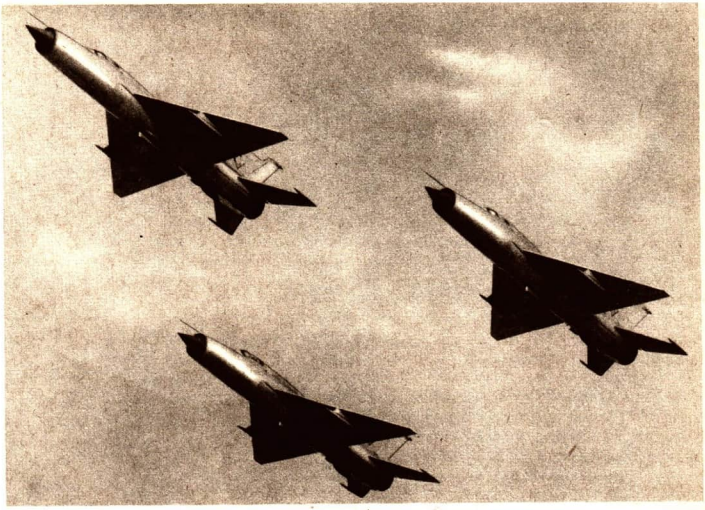
Gemeinsame Merkmale der Gravitationsfelder und der elektromagnetischen Felder. Sie sind materielle Objekte.
Sie sind relativistische Objekte, d. h. Wechselwirkungen breiten sich in ihnen mit Lichtgeschwindigkeit aus.
Sie sind selbständige Objekte und Träger von Energie, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Felder endlich ($v = c$) ist.
Sie sind mit gleichen mathematischen Verfahren zu beschreiben.
Die **unterschiedlichen** Merkmale resultieren aus den verschiedenen Quellen der einzelnen Felder.

● *Nennen Sie unterschiedliche Merkmale (Tabelle 77/1)!*

Die gemeinsamen Merkmale der Theorie des Gravitationsfeldes und der Theorie des elektromagnetischen Feldes sowie die Einsicht in den großen erkenntnistheoretischen Nutzen dieser Theorien waren Anregung für einige hervorragende Physiker, nach einer einheitlichen Feldtheorie zu suchen. Besonders zu nennen sind ALBERT EINSTEIN und WERNER HEISENBERG. Dieses wissenschaftliche Ziel ist noch nicht erreicht. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in der noch ungenügenden Kenntnis der Elementarteilchen.
Die Arbeit an einer einheitlichen physikalischen Theorie der materiellen Welt ist heute das Werk großer Kollektive von experimentellen und theoretischen Physikern und Mathematikern. Sie brauchen dazu gewaltige Anlagen und viele befähigte Techniker. Die größten Forschungszentren der Erde befinden sich zur Zeit in Dubna, Genf und Berkeley. Leider verhindern die Macht- und Profitinteressen der imperialistischen Staaten eine vorbehaltlose Zusammenarbeit aller Länder. Das Wirken der sozialistischen Staaten und der Weltfriedensbewegung sind auf das hohe humanistische Ziel gerichtet, daß der große Fleiß der Menschen und die vielen für die Atomforschung zur Verfügung gestellten Mittel ausschließlich friedlichen Zwecken und dem gesellschaftlichen Fortschritt der ganzen Menschheit dienen.

78/1 Internationales Kernforschungszentrum der sozialistischen Staaten in Dubna, Hauptgebäude darunter: Ringphasotron in Dubna



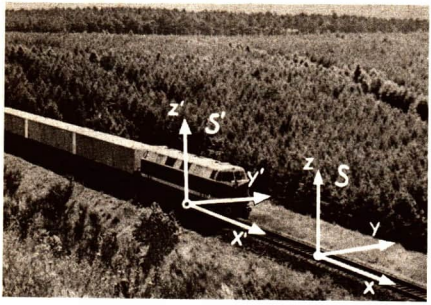


Spezielle Relativitätstheorie

Drei Flugzeuge fliegen in einem Verband, physikalisch als ein System, mit gleicher Geschwindigkeit nebeneinander. Wenn sich die Lage der Flugzeuge zueinander ändert, kann keiner der Piloten auf Grund der Lageveränderung sagen, ob sein Flugzeug z. B. langsamer oder das des anderen Piloten schneller fliegt als zuvor.

Kann man durch physikalische Messungen innerhalb eines Systems den Bewegungszustand desselben feststellen? Die Untersuchung dieses Problems mit sehr sinnreichen und genauen Experimenten ergab 1881 ein ganz unerwartetes Ergebnis, das mit der bisherigen Theorie nicht zu erklären war. Die Widersprüche löste Albert Einstein. Er formulierte das spezielle Relativitätsprinzip und schuf mit der Untersuchung der Folgerungen aus diesem Prinzip die „Spezielle Relativitätstheorie". Diese führte zu neuen Erkenntnissen über die Grundbegriffe Raum, Zeit und Masse.

Diese Ergebnisse der speziellen Relativitätstheorie sind heute experimentell bestätigt und finden besonders in der Elektronik und Atomphysik Anwendung.



Bewegte Bezugssysteme

Wird ein Bewegungsvorgang vom Bahndamm und vom fahrenden Zug aus beobachtet, so sind die Beobachtungsergebnisse unterschiedlich. Zwischen ihnen besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang, bei dem die Relativbewegung zwischen beiden Systemen eine Rolle spielt.

Bezugssysteme

Will man Angaben über die Lage oder den Ort eines Körpers machen, so sind drei voneinander unabhängige Messungen, z. B. Längenmessungen erforderlich. Zusammen mit den Meßwerten muß aber auch bekannt sein, von welchen Körpern oder Markierungen aus gemessen wurde. Deshalb sind *Ortsangaben relativ.*

Für die Beschreibung von Bewegungen sind Zeitangaben erforderlich. Man benutzt zur Zeitmessung meist periodische Vorgänge, wie z. B. die Drehung der Erde in bezug auf die Sonne. Man muß aber festlegen, von welchem Augenblick an die Zeitzählung beginnen soll. Damit sind auch Angaben für einen *Zeitpunkt relativ.*

Selbstverständlich ist stets die Festlegung der Einheiten. Man benötigt für Orts- und Zeitmessungen ein Bezugssystem.

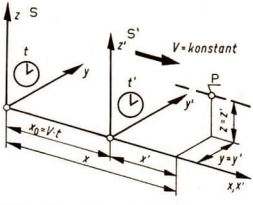
▶ **Ein Bezugssystem ist eine starre Anordnung von Körpern zur Ortsmessung zusammen mit einer Uhr zur Zeitmessung.**

In dieses materielle Bezugssystem wird in geeigneter Weise ein — meist kartesisches — Koordinatensystem gelegt.

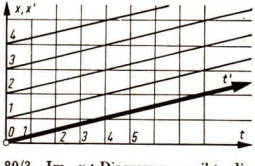
● *Nennen Sie Beispiele für Orts- und Zeitangaben und geben Sie das jeweils benutzte Bezugssystem an!*

Die Beschreibung der Vorgänge wird durch den Begriff **Ereignis** vereinfacht, unter dem man die Gesamtheit der Meßwerte einer Orts- und Zeitmessung (x, y, z, t) versteht.

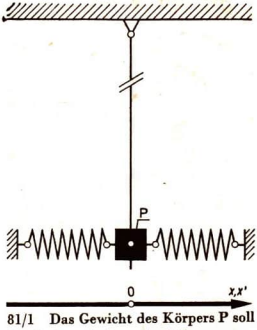
● *Beschreiben Sie Bezugssystem und Ereignisse beim 100-m-Lauf!*



80/2 Darstellung der beiden Koordinatensysteme. Der Körper P soll nur Bewegungen parallel zur x-Achse ausführen.



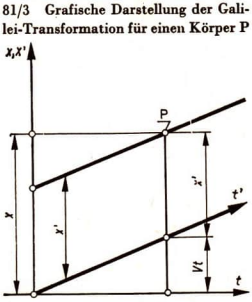
80/3 Im x-t-Diagramm ergibt die Bewegung des Punktes 0′ eine Gerade durch den Punkt 0, deren Anstieg von der Geschwindigkeit abhängig ist. Durch die parallel dazu verlaufenden Kurven für $x' = 1$, $x' = 2$ usw. entsteht ein schiefwinkliges Koordinatensystem, in dem die Gerade für 0′ zur Abszisse des gestrichenen Systems wird. Auf ihr wird die Zeit t' ($t = t'$) aufgetragen.



81/1 Das Gewicht des Körpers P soll durch eine sehr lange Aufhängung ausgeglichen werden

81/2 Abteil in einem stehenden Zug, also in S ruhend. Der Reisende wirft einen Ball vertikal nach oben

81/3 Grafische Darstellung der Galilei-Transformation für einen Körper P



Für die Betrachtungen zur speziellen Relativitätstheorie benutzt man folgende Bezugssysteme (Bild 80/2):

1. Das System S ist durch einen geraden, beliebig langen **Bahndamm** zusammen mit einer in einem Punkte 0 des Dammes ruhenden Uhr gegeben. Ein kartesisches Koordinatensystem wird so in dieses Bahndammsystem gelegt, daß die x-Achse mit einer Schiene zusammenfällt.

2. Das System S′ ist ein in positiver x-Richtung fahrender **Zug.** Den Punkt 0′ des „gestrichenen" Systems (Zugsystem) legt man in die Mitte des Zuges. Dort befindet sich eine Uhr gleicher Beschaffenheit wie die in 0. Beide x-Achsen fallen zusammen. Die y- und z-Achsen sind parallel zueinander.

Für alle folgenden Betrachtungen sollen im Augenblick des Zusammenfallens beider Nullpunkte, $0 = 0'$, beide Uhren die Zeit $t = t' = 0$ zeigen (Bild 80/3).
Zur Feststellung des Bewegungszustandes soll sich in jedem System eine abgeschlossene Kabine mit einem Physiker darin befinden, der mechanische Meßanordnungen benutzt. Eine solche kann aus einem Körper P mit der Masse m bestehen, der durch Federkraftmesser in einem Nullpunkt im Gleichgewicht gehalten wird (Bild 81/1).
Ist die Relativgeschwindigkeit der Kabinen gegeneinander Null, so stimmen die Messungen beider Physiker überein. Die Erfahrungen der Reisenden in einem Zugabteil werden mit den Meßergebnissen verglichen.
Der Physiker, dessen Kabine sich in S befindet, wird keinen Ausschlag des Körpers P und damit keine Kraft in x-Richtung messen. Er wird mit Recht behaupten, daß seine Kabine in Ruhe sei (Bild 81/2).

Gleichförmig bewegte Systeme — Galilei-Transformation

Der Zug S′ soll sich mit **konstanter Geschwindigkeit** V geradlinig gleichförmig gegenüber S bewegen.
Man untersucht den Zusammenhang zwischen den Koordinaten, aus dem sich wichtige Erkenntnisse herleiten lassen. Der Punkt 0′ hat zur Zeit $t > 0$ im System S die Strecke $x_0 = V \cdot t$ zurückgelegt. Für einen Körper P (Bild 80/2) findet man folgenden Zusammenhang zwischen den Koordinaten, er wird bezeichnet als

Galilei-Transformation

$$x = x' + V \cdot t \qquad z = z'$$
$$y = y' \qquad t = t' \qquad (91)$$
$$(V = \text{konstant}).$$

Eine Transformation ist in der Physik eine Umrechnungsbeziehung zwischen den Raum- und Zeitkoordinaten zweier zueinander bewegter Systeme.

Die Gleichheit von t und t' scheint selbstverständlich, und es gab bis zur Jahrhundertwende keinen Anlaß, daran zu zweifeln.
Zur Untersuchung der Bewegungsgesetze des Körpers P bildet man die erste Ableitung des Weges nach der Zeit, und man erhält den Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}. \tag{92}$$

Diese Beziehung ist als Gesetz von der Überlagerung der Geschwindigkeiten bekannt.
Man kann sich vorstellen, daß sich ein Fahrgast mit der Geschwindigkeit $\vec{v}'$ in Bezug auf S′ bewegt, dann hat er gegenüber S die Geschwindigkeit $\vec{v}$. Damit wird deutlich, daß *Geschwindigkeiten relativ* sind.

● *Nennen Sie Beispiele für die Relativität der Geschwindigkeit!*

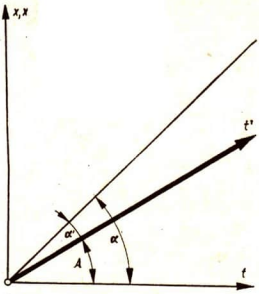
Durch Differentiation des Überlagerungsgesetzes der Geschwindigkeiten nach der Zeit erhalten wir den Zusammenhang zwischen den Beschleunigungen.

$$a = a' \quad (\text{Wegen } V = \text{konstant}) \tag{93}$$

Das bedeutet, daß eine Beschleunigung des Körpers gegenüber S′ vom System S aus genauso gemessen wird. Das gilt besonders auch für $a = a' = 0$. Multipliziert man diese Gleichung mit der Masse m, so ist wegen $F = m \cdot a$

$$F = F'. \tag{94}$$

Wirkt im Zug keine Kraft auf den Körper, $F' = 0$, so stellt man auch von S aus $F = 0$ fest.
Der Physiker in der Kabine S′ stellt keinen Ausschlag des Körpers P fest, und ein Reisender in einem ideal erschütterungsfrei fahrenden Zug empfindet keinen Unterschied gegenüber dem ruhenden Abteil.
Damit ergibt sich die Tatsache, daß der Physiker im gleichförmig bewegten System S′ seine Geschwindigkeit bezüglich S durch eine Messung im System selbst nicht feststellen kann. Die Systeme S und S′ können durch Messung der in ihnen auftretenden Trägheitskräfte nicht voneinander unterschieden werden.

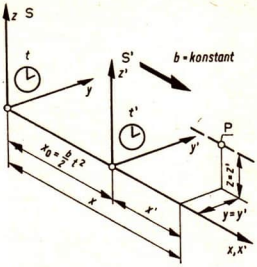


82/1 Grafische Darstellung der Überlagerung der Geschwindigkeiten für einen Körper in S′, der zur Zeit $t = t' = 0$ mit einer gleichförmigen Bewegung in x'-Richtung im Punkte 0′ beginnt. Es gilt: $A \sim V$; $a' \sim v'$; $a \sim v$

82/2 Abteil in einem Zug mit konstanter Geschwindigkeit V

Beschleunigte Systeme

Jetzt soll ein Zug betrachtet werden, der mit **konstanter Beschleunigung** b bezüglich S fährt.
Man nennt das beschleunigte Zugsystem S'_b.
Nach Bild 83/1 erhält man mit $x_0 = \frac{b}{2} \cdot t^2$ folgenden Zusammenhang zwischen den Koordinaten:



83/1

$$x = x' + \frac{b}{2} \cdot t^2 ; \quad y = y' ; \quad z = z' ; \quad t = t . \tag{95}$$

Wie im vorigen Abschnitt untersucht man die Bewegungsgesetze des Körpers P in der Kabine des Physikers durch Bilden der Ableitungen nach der Zeit.

$$v = v' + b \cdot t \tag{96}$$

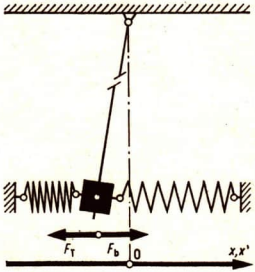
$$a = a' + b \tag{97}$$

Multiplizieren mit m ergibt

$$F = F' + F'_b . \tag{98}$$

Wird ein im Zug bisher festgehaltener Körper plötzlich losgelassen, so bewegt er sich gegenüber S nur noch gleichförmig weiter. Es ist dann $a = 0$ und damit $F = 0$. Es folgt $F' = - F'_b$. Der Physiker in der Kabine stellt eine Kraft in negativer x'-Richtung fest, wie man sie selbst in beschleunigten Fahrzeugen empfindet.

Welche Erscheinungen wird man in dem in Bild 82/2 dargestellten, aber jetzt beschleunigten Abteil beobachten?



83/2 Meßanordnung von Bild 81/1 in einem beschleunigten System

Wird der Körper im Zug festgehalten, so ist $a' = 0$, und auf den Körper P wirkt die Kraft $F = F'_b$, die von den Federn ausgeübt wird (Bild 83/2). Sie ergibt mit der gleichgroßen entgegengesetzt gerichteten Trägheitskraft $- F_T$ Gleichgewicht des Körpers. Die beiden gegeneinander beschleunigten Systeme S und S'_b lassen sich nach den in ihnen gemessenen Trägheitskräften unterscheiden.

Aus dem Abschnitt „Bezugssysteme" (↗ S. 13) ist bekannt, daß nur in dem mit gleicher Winkelgeschwindigkeit mitrotierendem System die als Fliehkraft bezeichnete Trägheitskraft auftritt und nicht in einem gegen die Kreisbewegung ruhenden System.

Inertialsysteme

Eine Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse ergibt:

1. Im **Bahndammsystem** S zeigt die Versuchsanordnung (Bild 81/1) keine Kräfte an. Mechanische Experimente verlaufen wie in jedem feststehenden Labor. Das **Trägheitsgesetz gilt** in diesem System.
2. Im **gleichförmig bewegten System** S′ gibt es keinen Unterschied zum System S, das **Trägheitsgesetz gilt** auch hier.
3. **Im gleichmäßig beschleunigten System** S'_b zeigt die Versuchsanordnung Trägheitskräfte an, die auch auf jeden Körper in diesem System wirken.

   Das **Trägheitsgesetz gilt nicht.**

Die Systeme S und S′ sind gleichartig. In beiden gilt das Trägheitsgesetz.
Solche Systeme nennt man **Inertialsysteme**[1].

▷ **Ein Bezugssystem heißt Inertialsystem, wenn in ihm ein kräftefreier Körper ruht oder sich gleichförmig geradlinig bewegt.**

Damit ist der Begriff des Inertialsystems durch eine physikalische Eigenschaft festgelegt.

Für viele Bewegungen von Körpern auf der Erdoberfläche darf man ein mit der Erde starr verbundenes System als Inertialsystem ansehen.
Bei einem solchen System wird die Wirkung der Erdrotation vernachlässigt.

Relativitätsprinzip der Mechanik

Das Bahndammsystem S und das gleichförmig bewegte Zugsystem S′ sind Inertialsysteme.
Jedes System, das sich gegenüber einem Inertialsystem gleichförmig bewegt — mit ihm also durch eine Galilei-Transformation verknüpft werden kann — ist wieder ein Inertialsystem. Inertialsysteme sind im Hinblick auf die Gültigkeit des Trägheitsgesetzes gleichwertig. Außerdem laufen alle mechanischen Vorgänge in Inertialsystemen völlig gleich ab.
Daraus folgt das **Relativitätsprinzip der Mechanik.**

▶ **Die Gesetze der Mechanik haben in jedem Inertialsystem die gleiche Form.**

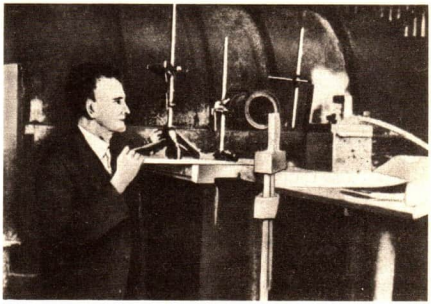
Inertialsysteme sind durch mechanische Experimente nicht unterscheidbar.

Jeder Beobachter in einem Inertialsystem hat also das Recht, sein System als ruhend anzusehen.
Eine Folge davon ist, daß der Begriff *Ruhe* nicht absolut, sondern nur *relativ* — bezogen auf ein willkürlich gewähltes Bezugssystem — festgelegt werden kann.
Ein Reisender im Abteil sieht zum Beispiel auf dem Nebengleis einen Zug langsam anfahren. Er ist einen Augenblick im Zweifel darüber, welcher Zug fährt.
Ähnliches empfindet man bei der Betrachtung strömenden Wassers von einer Brücke oder des Mondes hinter bewegten Wolken.
Das Streben nach Verallgemeinerung der Erkenntnis gab den Anlaß, eine Unterscheidung von Inertialsystemen durch nichtmechanische Vorgänge zu versuchen.

[1] inertia (lat.) = Trägheit

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Aus der historischen Entwicklung der Lichttheorie ist bekannt, welche Bedeutung die Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit hat. Messungen der Lichtgeschwindigkeit entschieden wichtige physikalische Probleme und brachten wesentliche neue Erkenntnisse. Die Entwicklung, die zur speziellen Relativitätstheorie führte, nahm ihren Anfang in einem Versuch, den der Physiker ALBERT ABRAHAM MICHELSON (1852 bis 1931) zuerst ausführte.



Der Michelson-Versuch

Ein Gedankenexperiment macht das Grundproblem deutlich.

Ein Zug S′ fährt geradlinig mit einer Geschwindigkeit von 15 ▼
$V = 100\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

Parallel zu ihm fliegt eine Rakete mit der Geschwindigkeit $v = 150\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ in der gleichen Richtung und ein anderes Mal in entgegengesetzter Richtung.

Als Geschwindigkeit der Rakete vom Zug S′ aus berechnet man $v' = 50\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ und $v' = -\ 250\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

Um mit anderen als mit mechanischen Mitteln zu experimentieren, 16 ▼
ersetzt man die Rakete durch einen Lichtblitz, der sich mit der Geschwindigkeit c in Fahrtrichtung des Zuges ausbreiten soll.

Wenn das aus der Galilei-Transformation folgende Überlagerungsgesetz auch für Lichtsignale zuträfe, dann müßte ein Experimentator im System S′ die kleinere Geschwindigkeit $c' = c - V < c$ als Lichtgeschwindigkeit messen.

Würde sich das Lichtsignal entgegengesetzt zur Fahrtrichtung des Zuges ausbreiten, dann wäre

$c' = c + V > c$

die Geschwindigkeit des Lichtblitzes in bezug auf S′.

Berechnen Sie für diese Beispiele die in S′ zu erwartenden Geschwindigkeiten des Lichtes! ●

Diese Überlegungen gingen von der Annahme aus, daß

1. die Überlagerung von Geschwindigkeiten allgemeingültig sei und
2. ein Relativitätsprinzip wie in der Mechanik für elektromagnetische Erscheinungen nicht gelte.

Danach sollte auf der Erde, die sich gegen ein mit den

anderen Sternen (Sonne) verbundenes Inertialsystem mit einer Geschwindigkeit von 30 km · s^{-1} auf ihrer Bahn bewegt, in Bahnrichtung eine kleinere und entgegengesetzt dazu eine größere Geschwindigkeit des Lichtes gemessen werden können.

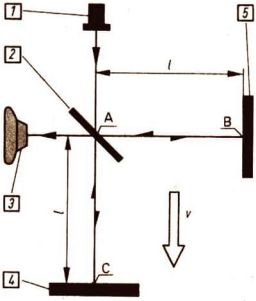
Eine solche Messung sollte die Unterscheidung eines ruhenden Inertialsystems (Fixsternsystem) von einem bewegten Inertialsystem (Erde) ermöglichen.

MICHELSON führte 1881 in Potsdam und mit größerer Genauigkeit 1887 zusammen mit MORLAY in Cleveland (USA) einen entsprechenden Versuch durch.

Die Versuchsanordnung (Bild 86/1) besteht aus einer halbdurchlässigen Platte (2), die einen Teil des Lichtes der Lichtquelle (1) durchläßt und einen anderen Teil reflektiert, und zwei Spiegeln (4 und 5). Mit dem Fernrohr oder der Kamera (3) werden die Interferenzen der beiden Teilbündel registriert.

Die Verbindungslinie $\overline{AC}$ soll in die Richtung der Erdbahn fallen, $\overline{AB}$ steht senkrecht dazu.

Bei gleicher Länge l der beiden Lichtwege berechnet man etwas verschiedene Laufzeiten für das Lichtsignal.



86/1 Schema des Michelson-Versuches

1 — Lichtquelle
2 — halbdurchlässige Platte
3 — Fotoapparat
4 — Spiegel
5 — Spiegel

Die Laufzeit t_1 für die Strecke $\overline{AC}$ setzt sich aus der Zeit für Hin- (t_{1h}) und Rückweg (t_{1r}) zusammen.

$$t_1 = t_{1h} + t_{1r}$$

$$t_1 = \frac{l}{c-V} + \frac{l}{c+V}$$

$$t_1 = \frac{l \cdot c + l \cdot V + l \cdot c - l \cdot V}{c^2 - V^2}$$

$$t_1 = \frac{2\,l \cdot c}{c^2 - V^2}$$

$$t_1 = \frac{2\,l}{c} \cdot \frac{1}{1 - V^2/c^2}$$

$$t_1 = \frac{2\,l}{c}\left(1 + \frac{V^2}{c^2} + \cdots\right) \qquad (99)$$

Für $\overline{AB}$ und zurück ergibt sich wegen der Vorwärtsbewegung der Apparatur (Bild 86/2):

$$t_2 = t_{2h} + t_{2r}$$

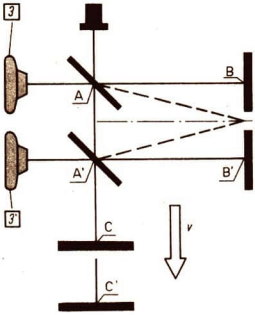
$$t_2 = \frac{l}{\sqrt{c^2 - V^2}} + \frac{l}{\sqrt{c^2 - V^2}}$$

$$t_2 = \frac{2\,l}{\sqrt{c^2 - V^2}}$$

$$t_2 = \frac{2\,l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

$$t_2 = \frac{2\,l}{c}\left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{V^2}{c^2} + \cdots\right) \qquad (100)$$

86/2 Bewegung der Apparatur
Ungestrichene Symbole: Lichtsignale verlassen A
Gestrichene Symbole: Lichtsignale treffen bei A ein.



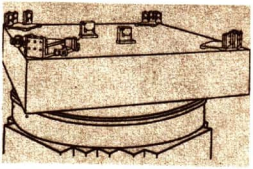
$$\Delta t = t_1 - t_2$$

$$\Delta t = \frac{2\,l \cdot V^2}{c^3} - \frac{l \cdot V^2}{c^3}$$

$$\Delta t = \frac{l \cdot V^2}{c^3}. \qquad (101)$$

Der Laufzeitunterschied Δt wird für $V = 30\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ und $l = 30\ \mathrm{m}$: $\Delta t = 10^{-15}\ \mathrm{s}$.

Der sehr kleine Laufzeitunterschied ist nicht direkt meßbar. Durch eine Drehung der Apparatur ist jedoch eine meßbare Verschiebung der Interferenzstreifen zu erwarten.



87/1 Versuchsanordnung Michelsons. Die optische Anordnung steht auf einem Sandsteinblock, der auf Quecksilber schwimmt

87/2 Registrierung von Interferenzstreifen während einer Rotation des Michelson-Apparates

Bei einer Drehung um 45° bilden beide Lichtwege mit der Bewegungsrichtung den gleichen Winkel, deshalb muß der Laufzeitunterschied des Lichtsignals $\Delta t = 0$ werden.
Bei einer Drehung um 90° haben beide Lichtwege ihre Lage vertauscht (Bild 87/1), und der Laufzeitunterschied hat das umgekehrte Vorzeichen.

Das ergibt:

$$2\,\Delta t = \frac{2\,l}{c} \cdot \frac{V^2}{c^2}\,. \tag{102}$$

Die Verschiebung d der Interferenzstreifen zur Streifenbreite b beträgt

$$\frac{d}{b} = \frac{2\,\Delta t}{T} \tag{103}$$

mit T als Schwingungsdauer des Lichtes.
Daraus folgt wegen

$$T \cdot c = \lambda \quad \left(\text{aus } c = \lambda \cdot f, \text{ mit } f = \frac{1}{T}\right)$$

$$\frac{d}{b} = \frac{2\,l}{\lambda} \cdot \frac{V^2}{c^2}\,. \tag{104}$$

Berechnen Sie das Verhältnis von $\frac{d}{b}$ für gelbes Licht mit $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ m und $l = 30$ m! ●

Das vorausberechnete Ergebnis trat nicht ein, der Versuch ergab **keine Verschiebung der Interferenzstreifen.**
Dieses Ergebnis war unerwartet und überraschend.
Es war mit der bisherigen Theorie nicht zu erklären. Man versuchte, die Theorie zu verbessern, geriet aber in neue Widersprüche.
Andererseits bezweifelte man die Exaktheit des Experimentes und wiederholte es sehr oft mit immer besseren Hilfsmitteln und Methoden.

Lag bei Michelsons Experiment von 1887 noch eine mögliche Bewegung der Erde gegenüber dem angenommenen ruhenden Inertialsystem von $V = 5000\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ in den Grenzen der Meßgenauigkeit, so ergab eine 1963 mit modernsten Mitteln durchgeführte Messung $V = (1{,}6 \pm 2{,}8)\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Als experimentell gewonnene und gesicherte Erfahrung ergibt sich die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.**

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist in allen Inertialsystemen unabhängig von der Ausbreitungsrichtung und der Bewegung des Bezugssystems stets gleich und hat den Wert $c = (299\,793 \pm 1)\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. ◀

Das spezielle Relativitätsprinzip

Der Michelson-Versuch ergibt, daß eine Unterscheidung der Inertialsysteme auch mit optischen Mitteln nicht möglich ist. Damit wird das Relativitätsprinzip in umfassenderer Bedeutung bestätigt. Zwischen dem Überlagerungsgesetz der Geschwindigkeit und der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit besteht ein Widerspruch. Den Ansatz zu einer widerspruchsfreien Lösung des Problems gab ALBERT EINSTEIN, indem er **das spezielle Relativitätsprinzip** formulierte:

▶ **Alle Gesetze der Physik haben in jedem Inertialsystem die gleiche Form. Inertialsysteme sind nicht unterscheidbar. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist die obere Grenze aller Geschwindigkeiten für die Übertragung von Signalen oder die Bewegung von Körpern.**

Dieses Prinzip ist aus der Erfahrung gewonnen.
Seine Richtigkeit wird dadurch geprüft, daß man auf deduktivem Wege Folgerungen ableitet und die so gewonnenen physikalischen Erkenntnisse wieder experimentell überprüft.
Damit ist auch klar geworden, daß das Überlagerungsgesetz für Geschwindigkeiten nicht allgemeingültig ist; es gilt nur für kleine Relativgeschwindigkeiten.

Die Gleichzeitigkeit von Ereignissen

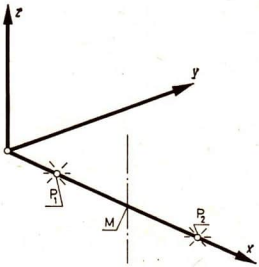
Man war bis 1905 überzeugt, daß es eine absolute, für alle Systeme gleichmäßig ablaufende Zeit gibt.
EINSTEIN unterzog den Zeitbegriff einer kritischen Betrachtung. Dazu muß zuvor erklärt werden, was man unter Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse verstehen soll.

● *Ein Beobachter auf der Erde sieht zufällig zwei Novae gleichzeitig heller werden. Unter welcher Bedingung kann er behaupten, daß beide „Explosionen" gleichzeitig stattgefunden haben?*

■ Im System S befindet sich an den Punkten P_1 und P_2 je eine Blitzlichtlampe. Als Ereignis E_1 und E_2 bezeichnet man das Aufleuchten der Lampen (Bild 88/1).

Die **Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse** wird durch folgende Meßvorschrift definiert:

▶ **Die in zwei verschiedenen Punkten P_1 und P_2 eines Inertial-Systems stattfindenden Ereignisse heißen gleichzeitig, wenn die von P_1 und P_2 ausgehenden Lichtsignale gleichzeitig im Mittelpunkt zwischen P_1 und P_2 eintreffen.**



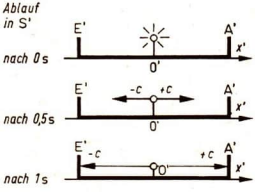
88/1 Meßvorschrift für die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse in P_1 und P_2

Wichtig ist die Anwendung dieser Definition zum Synchronisieren von Uhren. Die Zeigerstellung von Uhren in P_1 und P_2 kann von Fernsehkameras aufgenommen werden. Empfänger in M lassen nach Korrektur einen exakten Vergleich zu.

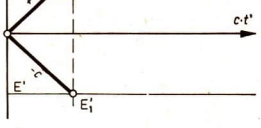
Wie muß man verfahren, um eine dritte Uhr in P_3 zu synchronisieren?

Ebenso können im System S′ Uhren synchronisiert werden. Damit ist festgelegt, wie in jedem System der Zeitablauf oder kurz die Zeit gemessen werden kann.

Als Uhr kann man in der Physik jeden Vorgang benutzen, der sich mit großer Gleichmäßigkeit wiederholt. Geeignet sind mechanische Schwingungen von Körpern oder auch Quarzkristallen (Quarzuhr), Schwingungen von Atomen (Atomuhr), die Schwingungsdauer elektromagnetischer Wellen, die Halbwertzeit von Zerfallsprozessen oder die Laufzeit von Lichtsignalen, die eine bestimmte Strecke hin und zurück durchlaufen. Die Übertragung auf ein Zeigerwerk oder Zählwerk hat sekundäre Bedeutung.



89/1 Ein Lichtstrahl, von 0′ ausgesandt, trifft für Beobachter in S′ gleichzeitig in A′ und E′ ein.



89/2 Das Eintreffen des von $x' = 0$ ausgesandten Lichtsignals ist mit A_1' und E_1' bezeichnet. Beide Ereignisse haben die gleiche Zeitkoordinate $c \cdot t'$, deshalb ist die Verbindungslinie $A_1' E_1'$ parallel zur x'-Achse

Die Relativität der Gleichzeitigkeit

Es wurde festgelegt, was man unter Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse in einem Inertialsystem versteht. Jetzt soll untersucht werden, wie zwei Ereignisse, die in S′ gleichzeitig stattfinden, von S aus beurteilt werden. Man benutzt ein Gedankenexperiment.

Ein Zug sei — gemessen in seinem eigenen System S′ — 600 000 km lang (fast Durchmesser der Mondbahn). 17
Er fahre bezüglich S mit einer Geschwindigkeit von $V = 180\,000\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ in positiver x-Richtung.
Im Augenblick des Zusammenfallens der Punkte 0 und 0′ werde zur Zeit $t = t' = 0$ von 0′ aus (Zugmitte) ein Lichtsignal ausgesandt.

Ergebnis des Versuchs 17:

1. in S′: Die Lichtgeschwindigkeit ist $c \approx 300\,000\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1}$. Die Signale treffen nach 1 s am Zuganfang A′ und am Zugende E′ ein. Das kann durch Beobachtungen mit synchronisierten Uhren oder durch einen Mechanismus registriert werden (Bild 89/1).

Der Vorgang des Gedankenexperimentes kann grafisch dargestellt werden. Auf der Zeitachse wird der Lichtweg $c \cdot t'$ in t' Sekunden als Zeitmaß benutzt, dann sind die Kurven für die Lichtsignale Geraden unter einem Winkel von 45° zur x'- und $c \cdot t'$-Achse (Bild 89/2).

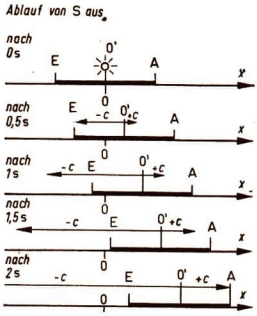
2. in S: Beobachter mit synchronisierten Uhren befinden sich in 0 und an anderen geeigneten Stellen des Bahndamms. Sie registrieren die Geschwindigkeit c des Lichtes und die Geschwindigkeit V des Zuges.

Das Zugende eilt dem Lichtblitz entgegen. Er trifft nach weniger als 1 Sekunde in E ein. Der Zuganfang eilt dem Lichtblitz voraus. Er trifft nach einer Zeit in A ein, die größer als 1 Sekunde ist (Bilder 90/1 und 90/2).

Das Eintreffen der Lichtsignale in E und A erfolgt für Beobachter in S zu verschiedenen Zeiten, ist in S also nicht gleichzeitig.
Daraus folgt die **Relativität der Gleichzeitigkeit:**

▶ **Ereignisse, die in einem Inertialsystem gleichzeitig stattfinden, sind in einem anderen relativ dazu bewegten Inertialsystem nicht gleichzeitig.**

● *Was wird in S und S′ beobachtet, wenn der Aussendungsort des Signals weiter an den Zuganfang verschoben wird?*



90/1 Das von $0 = 0'$ ausgesandte Lichtsignal und die Bewegung des Zuges werden von S aus beobachtet. Das Lichtsignal trifft zuerst in E und später in A ein

Die Lorentz-Transformation

Das Ergebnis des Michelson-Versuches zeigt, daß der durch die Galilei-Transformation gegebene Zusammenhang und das daraus abgeleitete Überlagerungsgesetz für Geschwindigkeiten bei großen Geschwindigkeiten zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt.
Wegen der Relativität der Gleichzeitigkeit muß auch die Zeit beim Übergang zu einem anderen System transformiert werden.

Das Relativitätsprinzip führt auf eine Transformation zwischen S und S′ hin, die als **Lorentz-Transformation** bezeichnet wird und in der nachfolgend angegebenen Form für das bisher benutzte Modell von Inertialsystemen gilt.

● *Welche Festlegungen sind das für S, S′ und die Zeitzählung?*

▶ $$x = \frac{x' + V \cdot t'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (105) \qquad x' = \frac{x - V \cdot t}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (106)$$

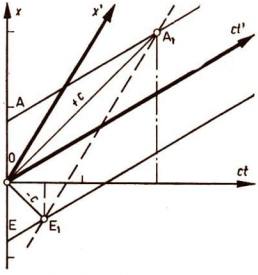
$$y = y' \qquad y' = y$$

$$z = z' \qquad z' = z$$

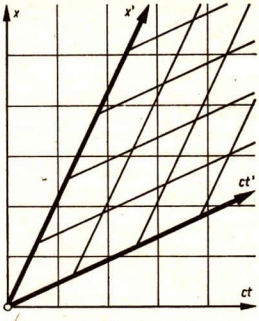
▶ $$t = \frac{t' + x' \cdot V/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (107) \qquad t' = \frac{t - x \cdot V/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (108)$$

Der Übergang von den ungestrichenen zu den gestrichenen Größen kann durch mathematische Umformung oder einfach dadurch erfolgen, daß man V durch $-V$ ersetzt und gestrichene und ungestrichene Größen vertauscht (relativistische Vertauschung).

Der Wurzelausdruck führt zur Veränderung der Einheiten im System S′, wenn sie von S aus gemessen werden.



90/2 Mit E_1 und A_1 ist das Eintreffen der Lichtsignale in E und A bezeichnet, wie es der Beobachter in S wahrnimmt. Für den Zugbeobachter sind E_1 und A_1 gleichzeitig und haben in S′ die gleiche Zeitkoordinate, die durch die Verbindungslinie $E_1 A_1$ gegeben ist. Parallel dazu muß die x'-Achse liegen. Damit wird auch die Zeit transformiert



91/1 Koordinatensystem S und transformiertes Koordinatensystem S'

Aus der Lorentztransformation liest man ab:

Für $V > c$ wird der Radikand negativ. Er hat nur eine imaginäre Lösung und damit keine physikalische Bedeutung, denn physikalische Meßgrößen sind immer reell.

Für $V = c$ wird die Wurzel Null. Dividieren durch Null ist nicht erklärt.

Für $V < c$ ergibt die Wurzel reelle Werte und man erkennt, daß stets gilt $\sqrt{1 - V^2/c^2} < 1$.

Für $V \ll c$ werden alle Brüche mit dem Nenner c^2 vernachlässigbar klein.

Es ergibt sich: die Galilei-Transformation ist ein Sonderfall der Lorentz-Transformation für kleine Geschwindigkeiten.

Der Vorgang zur Relativität der Gleichzeitigkeit soll als Zahlenbeispiel durchgerechnet werden (↗ S. 89)!

Wann erreicht das Lichtsignal von S aus betrachtet das Zugende E?

Gegeben:

$V = 180\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

$x'_E = -\ 300\,000\ \mathrm{km}$

$t'_E = 1\ \mathrm{s}$

Gesucht:

t_E

Lösung:

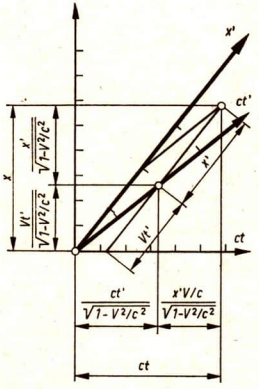
$$t_E = \frac{t'_E + x'_E \cdot V/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

$$t_E = \frac{1\ \mathrm{s} - \dfrac{3 \cdot 10^8\ \mathrm{m} \cdot 1{,}8 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{(3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}})^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{(1{,}8 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}})^2}{(3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}})^2}}}$$

$$t_E = \frac{1\ \mathrm{s} - \dfrac{6}{10}\ \mathrm{s}}{\sqrt{1 - \dfrac{36}{100}}}$$

$$t_E = \frac{\dfrac{4}{10}\ \mathrm{s}}{\dfrac{8}{10}}$$

$$\underline{\underline{t_E = 0{,}5\ \mathrm{s}}}.$$



91/2 Grafische Darstellung der Lorentz-Transformation

Der Vergleich mit der Galilei-Transformation, Bild 81/3, zeigt für x ähnliche Abschnitte. Für $c \cdot t$ erkennt man die Bedeutung der beiden Abschnitte

Wann erreicht das Lichtsignal von S aus betrachtet den Zuganfang A?

Gegeben:

$V = 180\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

$x'_A = 300\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

$t'_A = 1\ \mathrm{s}$

Gesucht:

t_A

Lösung:

$$t_A = \frac{t'_A + x'_A \cdot V/c^2}{\sqrt{1 - \dfrac{V^2}{c^2}}}$$

$$\underline{\underline{t_A = 2\ \mathrm{s}}}$$

Ergebnisse der speziellen Relativitätstheorie

LEOPOLD INFELD (1898 bis 1968), langjähriger Mitarbeiter Einsteins und Vizepräsident des Weltfriedensrates, charakterisierte die wissenschaftliche Leistung Einsteins folgendermaßen: „EINSTEIN geht von dem Prinzip aus, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant und vom Koordinatensystem unabhängig ist. Aus dieser einfachen Tatsache leitete er ein Ergebnis ab, das vierzig Jahre später über der Welt buchstäblich explodierte."

Die Zeitdilatation

Ein Vorgang, der gemessen im bewegten System S′ eine bestimmte Zeit dauert, soll vom ruhenden System S aus hinsichtlich seiner Dauer beurteilt werden.

Zur Herleitung der Zusammenhänge benutzt man folgende gedachte Anordnung mit drei Uhren gleicher Beschaffenheit. Eine Uhr A befindet sich im System S′ im Punkt 0′. Zwei Uhren B und C befinden sich im System S in den Punkten 0 und x_2 und sind synchronisiert.

Ereignis E_1 findet statt, wenn die Uhr A an der Uhr B vorbeikommt. Die Zeiger beider Uhren sollen dann Null zeigen. Die Koordinaten sind:

in S′: $x' = x'_1 = 0 \qquad t' = t'_1 = 0$

in S: $x = x_1 = 0 \qquad t = t_1 = 0$.

Ereignis E_2 erfolgt, wenn die Uhr A an der Uhr C vorbeikommt. E_2 ist gegeben durch die Werte

in S′: $x' = x'_2 = 0 \qquad t' = t'_2$

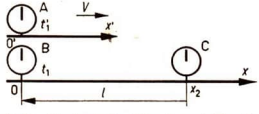
in S: $x = x_2 = l \qquad t = t_2$.

Die Uhr A ruht im System S′ und zeigt für einen Beobachter in S′ die Ruhezeit oder **Eigenzeit** t'_0 des Systems S′ an. Die Dauer eines Vorganges wird durch die Differenz der zugehörigen Zeitkoordinaten bestimmt.

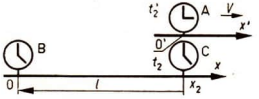
$\Delta t'_0 = t'_2 - t'_1$ und $\Delta t = t_2 - t_1$

Die Messung von System S aus ergibt unter Anwendung der Lorentz-Transformation für die Zeit

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}. \qquad (109)$$

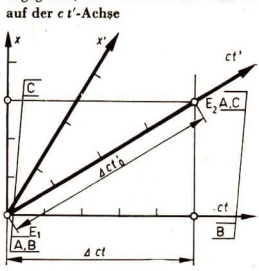


92/2 Ereignis E_1, Uhr A und Uhr B am gleichen Ort $x_1 = 0$



92/3 Ereignis E_2, Uhr A und Uhr C am gleichen Ort $x_2 = l$

92/4 Die Zeit für die in S ruhenden Uhren B und C ist auf der $c\,t$-Achse angegeben, die Zeit für die Uhr A auf der $c\,t'$-Achse



Führen Sie die Herleitung durch. Was ergibt sich, wenn die Uhr an einem anderen Punkt in S′ ruht?

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (110) \qquad \Delta t > \Delta t_0'$$

Man bezeichnet das Ergebnis als **Zeitdilatation (-dehnung).**

Besteht zwischen dem Ort, an dem sich ein Vorgang abspielt, und einem Beobachter eine Relativbewegung, so mißt der Beobachter für den Vorgang eine um den Faktor $1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ längere Zeit.

Ein Vorgang, der in einem Punkt im System S′ abläuft und dort $\Delta t_0' = 4$ s dauert, wird vom System S aus gemessen. $V = 180\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Welche Dauer Δt ergibt die Messung?

Gegeben:

$V = 180\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$
$c = 300\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$
$\Delta t_0' = 4\ \mathrm{s}$

Gesucht:

Δt

Lösung:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

$$\Delta t = \frac{4\ \mathrm{s}}{\sqrt{1 - \frac{36}{100}}}$$

$$\underline{\underline{\Delta t = 5\ \mathrm{s}}}$$

Wie wirkt sich die Zeitdilatation aus für $V \ll c$ und $V \to c$?

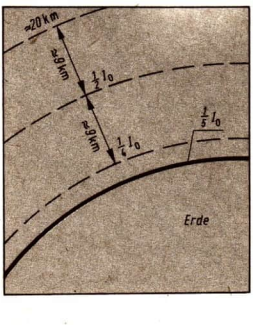
Wegen der Gleichberechtigung beider Systeme gilt auch die Umkehrung. Läuft an einer Stelle im System S ein Vorgang mit der Eigenzeit $\Delta t_0 = 4$ s ab (eine Uhr) und wird er vom bewegten System S′ aus gemessen (zwei Uhren, z. B. in der Mitte und am Ende des Zuges), so wird wegen der Relativbewegung für den Vorgang die Dauer in S′ mit $\Delta t' = 5$ s gemessen.

Die gemessene Dauer eines Vorganges hängt also von der Relativbewegung des Beobachters ab und ist somit selbst relativ.

Die Zeitdilatation ist durch drei verschiedenartige Beobachtungen und Experimente sehr genau bestätigt. Eine Beobachtung soll erläutert werden.

Durch energiereiche Protonen entstehen in etwa 20 km Höhe Myonen[1]. Die Halbwertzeit ihres Zerfalls ist in Laboratorien mit $t_h \approx 2 \cdot 10^{-6}$ s gemessen. Sie bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit und müßten nach 600 m zur Hälfte zerfallen sein. Bei entsprechender Fortsetzung des Zerfalls muß die Intensität der Myonen auf der Erdoberfläche fast Null werden. Man mißt aber in Meereshöhe noch ein Fünftel der Intensität, die in 20 km Höhe vorhanden ist (Bild 93/1).

93/1 Myonenintensität in der Lufthülle
I_0 ist die Intensität in 20 km Höhe



[1] Elementarteilchen, die dem Elektron ähnlich sind, aber mit einer endlichen Halbwertzeit zerfallen. Ihre Masse ist etwa 200mal größer als die des Elektrons.

Das läßt sich nur so erklären, daß die Halbwertzeit im bewegten System des Myons $\Delta t'_0 = t'_h \approx 2 \cdot 10^{-6}$ s ist. Von dem als ruhend anzusehenden System Erde aus wird aber eine längere Zeit $\Delta t = t_h \approx 3 \cdot 10^{-5}$ s gemessen. Der Dilatationsfaktor ist dann etwa

$$\frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \approx 15 .$$

● *Berechnen Sie daraus V!*

Die Längenkontraktion

In dem mit der Geschwindigkeit V bewegten System S′ ruht ein Meßstab parallel zur x'-Achse.
Er hat in S′ die **Ruhlänge** $l'_0 = x'_2 - x'_1$.
Ein gleichartiger Meßstab ruht im System S parallel zur x-Achse. Während des Vorbeifahrens von S′ sollen an zwei Stellen x_1 und x_2 im System S die gerade gegenüberstehenden Marken der Meßstäbe verglichen werden. Selbstverständlich muß die Messung zu gleicher Zeit $t_1 = t_2$ durchgeführt werden. Sie ergibt die Marken x'_1 und x'_2 (Bild 94/1).
Mit der Lorentz-Transformation für die x'-Koordinaten leitet man her

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} .$$

Mit $l = x_2 - x_1$ erhält man die in S gemessene Länge

$$l = l'_0 \sqrt{1 - V^2/c^2}, \qquad \text{wobei} \qquad l < l'_0 .$$

● *Diskutieren Sie die Formel für sehr kleine und sehr große Geschwindigkeiten V!*

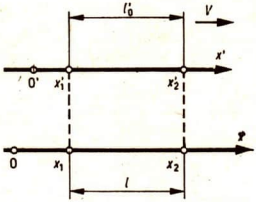
Damit ergibt sich die **Längenkontraktion (-zusammenziehung).**

▶ **Besteht zwischen einem Körper und einem Beobachter eine Relativbewegung, so mißt der Beobachter alle in Bewegungsrichtung liegenden Längen des Körpers um den Faktor $\sqrt{1 - V^2/c^2}$ verkürzt.**

● *Lesen Sie aus Bild 94/2 ab, was ein Beobachter in S′ über die zeitliche Aufeinanderfolge der Messungen an den Stabenden feststellt!*

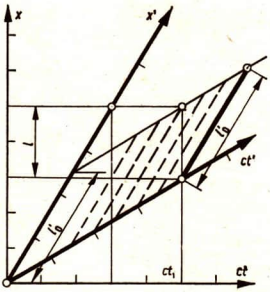
Auch hier kann man die Systeme vertauschen.

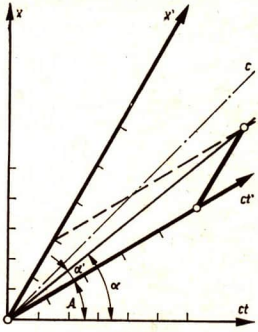
Wird ein in S ruhender Meßstab der Länge l_0 von S′ aus gemessen, so muß der Vergleich an beiden Enden in S′ gleichzeitig erfolgen. Die Beobachter in S′ messen eine kürzere Länge.



94/1 Schema des gedachten Meßvorganges

94/2 Der Stab l'_0 ruht in S′. Im Laufe der Zeit nimmt er die gestrichelten Lagen ein, überstreicht also diesen Streifen. Die Messung der Länge von S aus erfolgt an beiden Enden zur Zeit t_1





95/1 Grafische Darstellung des Additionsgesetzes für Geschwindigkeiten: $6/10\,c + 4/10\,c \approx 8/10\,c$, für einen Körper, der in S′ zur Zeit $t' = 0$ seine Bewegung in $x' = 0$ beginnt

Die Längenkontraktion läßt sich experimentell nicht überprüfen, sie ist aber mit der Zeitdilatation verbunden.
Ein mit dem Myon mitbewegter Beobachter mißt die Halbwertszeit $t_h \approx 2 \cdot 10^{-6}$ s und seine Geschwindigkeit $V \approx c$. Er bestimmt von seinem System aus die Strecke, auf der die Hälfte der Myonen zerfallen ist, zu 600 m. Diese Strecke ist im Erdsystem gemessen etwa 9 km (Bild 93/1).

Addition von Geschwindigkeiten

Ein Körper bewegt sich im System S′ mit konstanter Geschwindigkeit v' in Fahrtrichtung des Zuges. In S′ gilt $v' = x'/t'$. Ist V die Relativgeschwindigkeit des Zuges S′ gegenüber dem Bahndamm S, so folgt aus der Lorentz-Transformation für die Geschwindigkeit des Körpers in S

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

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v' \cdot V}{c^2}}. \qquad (111)$$

Leiten Sie Gleichung (111) her mit (105) und (107)!

In Übereinstimmung mit dem speziellen Relativitätsprinzip zeigt dieses Gesetz, daß die Addition von Geschwindigkeiten v' oder $V \leqq c$ höchstens die Vakuumlichtgeschwindigkeit ergibt.
Wenn v für $v' \ll c$ und $V \ll c$ berechnet wird, so ergibt sich das **Überlagerungsgesetz für Geschwindigkeiten** als **Sonderfall für kleine Geschwindigkeiten.**
Additionsgesetz und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sind durch neueste Messungen (1966) genau bestätigt.

Elementarteilchen, die π^0-Mesonen genannt werden, können in zwei Gammaquanten zerfallen, die in entgegengesetzte Richtungen mit Lichtgeschwindigkeit emittiert werden.
Man erzeugt schnell fliegende π^0-Mesonen ($V = 0{,}999\,75\,c$). Aus den in Flugrichtung der π^0-Mesonen emittierten Gammaquanten wird ein Bündel ausgeblendet. Die Messung der Geschwindigkeit dieser Gammaquanten ergab mit einer Genauigkeit von 0,01% die Lichtgeschwindigkeit c.

Massenänderung

Wirkt auf einen Körper mit der Masse m eine konstante Kraft, so nimmt seine Geschwindigkeit in einem Inertialsystem linear zu. Wirkt die Kraft lange genug, dann müßte die Geschwindigkeit des Körpers die Lichtgeschwindigkeit überschreiten, falls $F = m \cdot a$ allgemeingültig sein soll.

Das steht in Widerspruch zum speziellen Relativitätsprinzip und zu Erfahrungen mit Teilchenbeschleunigern. Man kann geladene Teilchen (z. B. Elektronen) durch kein noch so starkes elektrisches Feld über die Lichtgeschwindigkeit c hinaus beschleunigen. Also muß die Kurve in Bild 96/1 etwa den gestrichelten Verlauf nehmen.
Aus Klasse 11 ist bekannt, daß nach dem Grundgesetz der Mechanik die Kraft als zeitliche Änderung des Impulses dargestellt werden kann.

$$F = \frac{\mathrm{d}\,(m \cdot v)}{\mathrm{d}t}\,.$$

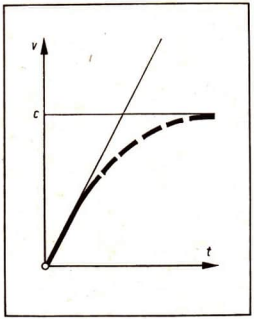
Früher wurde angenommen, m sei konstant, dann erhält man

$$F = m \cdot a\,.$$

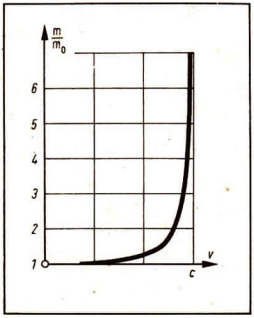
Bei der Behandlung der experimentellen Bestimmung der spezifischen Ladung der Elektronen wurde mitgeteilt, daß die Masse nicht konstant ist, sondern bei großer Geschwindigkeit zunimmt.
Hierbei ist zu beachten, daß die Masse als Maß der Trägheitseigenschaft zu verstehen ist, die sich bei Änderungen des Bewegungszustandes bemerkbar macht (träge Masse). Man kann sie auch als Widerstand gegen Beschleunigung auffassen. Im Ruhezustand ist die Masse der Stoffmenge proportional, man nennt sie die **Ruhemasse** m_0. Bei großer Geschwindigkeit wird dieser Beschleunigungswiderstand größer, ohne daß die Stoffmenge größer wird.
Das Newtonsche Grundgesetz erfüllt das Relativitätsprinzip, wenn man für bewegte Körper die geschwindigkeitsabhängige **Impulsmasse** m einführt.

▶ **Impulsmasse** $$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\,. \qquad (112)$$

Hierin ist v die Relativgeschwindigkeit des Körpers gegen das Inertialsystem, von dem aus die Geschwindigkeit gemessen wird.



96/1 v-t-Diagramm eines Körpers für
———— konstante Beschleunigung
– – – – konstante Kraft



96/2 Massenzunahme in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

$\frac{m}{m_0}$	v in km · s^{-1}	$c - v$ in km · s^{-1}
2	258 272	41 521
10	298 294	1 499
100	299 778	15
1 000	299 793	0,15
10 000	299 793	0,0015

$\frac{\Delta m}{m_0}$	v in km · s^{-1}
10^{-12}	0,425
10^{-11}	1,34
10^{-10}	4,25
10^{-9}	13,4
10^{-8}	42,5
10^{-7}	134

$\frac{\Delta m}{m_0}$	v in km · s^{-1}
10^{-6}	425
10^{-5}	1 340
10^{-4}	4 250
10^{-3}	13 400
10^{-2}	42 100
10^{-1}	125 000

Untersuchen Sie dieses Gesetz für $v = 0$, $v \ll c$ und $v \to c$! ●

Die Impulsmasse eines Körpers ist von der Relativgeschwindigkeit abhängig. Sie nimmt mit wachsender Relativgeschwindigkeit zu und wächst für $v \to c$ gegen unendlich. ◀

Damit erweist sich die Vakuumlichtgeschwindigkeit c als obere Grenzgeschwindigkeit für die Bewegung von Körpern. Das Gesetz ist an beschleunigten geladenen Teilchen und durch indirekte Messungen sehr genau bestätigt.

Ein Raumschiff mit einer Masse von 5 t erfährt bei der zweiten kosmischen Geschwindigkeit eine Massenzunahme von etwa 10^{-6} kg = 1 mg. ■

Im Elektronensynchrotron kommen Elektronen bis auf 1,5 m · s^{-1} an die Lichtgeschwindigkeit heran und erreichen dabei etwa die 10 000fache Masse. ■

Masse-Energie-Beziehung

Die relativistische Massenzunahme steht im Widerspruch zum Gesetz von der Erhaltung der Masse, wie es zuerst von LOMONOSSOW (1756) und LAVOISIER (1774) entdeckt und formuliert wurde. Die Impulsmasse m ist um einen Betrag Δm größer als die Ruhemasse m_0. Ein Körper mit der Impulsmasse m besitzt infolge der an ihm geleisteten Arbeit die kinetische Energie

$$W_{\text{kin}} = \frac{m_0}{2} \cdot v^2 \quad (\text{für } v \ll c) . \tag{113}$$

Es ist ein Zusammenhang zwischen der Massenzunahme Δm und der kinetischen Energie zu erwarten.

Man setzt $m = m_0 + \Delta m$. (114)

Den Ausdruck (112) für die Impulsmasse entwickelt man nach der binomischen Formel in eine Reihe

$$m = m_0 + \frac{1}{2} m_0 \cdot \frac{v^2}{c^2} + \cdots . \tag{115}$$

Bei Geschwindigkeiten $v \ll c$ sind die weiteren Glieder vernachlässigbar klein.

Werden beide Ausdrücke für m gleichgesetzt, so erhält man nach Vereinfachung

$$\Delta m = \frac{W_{\text{kin}}}{c^2} \qquad \text{oder} \qquad W_{\text{kin}} = \Delta m \cdot c^2 . \tag{116}$$

Die kinetische Energie ist der Massenzunahme proportional. ◀

Werden die Ausdrücke für m mit dem Proportionalitätsfaktor c^2 multipliziert, so erhält man in beiden Fällen

$$m \cdot c^2 = m_0 \cdot c^2 + \Delta m \cdot c^2 . \tag{117}$$

Prüfen Sie, ob $m \cdot c^2$ die Größenart einer Energie besitzt! ●

W_{kin} kann kontinuierlich zu- oder abnehmen. Für $v = 0$ wird $W_{kin} = 0$.
Es bleibt ein Ausdruck für die Energie eines ruhenden Teilchens, man bezeichnet sie als die

▶ **Ruheenergie** $W_0 = m_0 \cdot c^2$. (118)

Die Ruheenergie ist der Ruhemasse proportional.

Die Summe aus Ruheenergie und kinetischer Energie ist die **Gesamtenergie** W eines Teilchens

$W = W_0 + W_{kin}$.

Dieser von ALBERT EINSTEIN hergeleitete und erkannte Zusammenhang ist die

▶ **Masse-Energie-Beziehung** $W = m \cdot c^2$ (119)

Die Energie eines Körpers ist seiner Masse proportional.

Diese Beziehung ist von fundamentaler Bedeutung und bei Kernreaktionen quantitativ genau bestätigt.

● *Untersuchen Sie die Energie W für $v \to c$!*
Vergleichen Sie mit dem speziellen Relativitätsprinzip!

Die Masse-Energie-Beziehung ist allgemeingültig. Demnach muß durch die Energieabgabe bei chemischen Reaktionen ebenfalls eine Massenänderung eintreten.

■ Bei der Bildung eines Mols MgO (40,3 g) wird eine Wärmemenge $W = 144$ kcal frei. 1 kcal = 4190 Ws.
Berechnen Sie die Massenänderung Δm!

Gegeben:

$W = 144 \cdot 4190\ \mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}}$

$c = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Gesucht:

Δm

Lösung:

$$\Delta m = \frac{W}{c^2}$$

$$\Delta m = \frac{144 \cdot 4190\ \mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}}}{9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}}$$

$$\Delta m \approx 10^{-11}\ \mathrm{kg}$$

$$\underline{\underline{\Delta m \approx 10^{-5}\ \mathrm{mg}}}$$

Das Ergebnis zeigt, daß Massenänderungen bei chemischen Reaktionen praktisch nicht wägbar sind.

● *Was folgt aus der Masse-Energie-Beziehung für die Erwärmung eines Körpers oder für die Masse eines geladenen und eines entladenen Akkumulators (andere Massenänderungen ausgeschlossen)?*

Die spezielle Relativitätstheorie als grundlegende Gesetzmäßigkeit. Die spezielle Relativitätstheorie ist eine experimentell gesicherte Grundlage der gesamten modernen Physik, die wie jede physikalische Theorie ihren Aussagen genügt.
Die bereits 1864 von JAMES CLERK MAXWELL aufgestellte

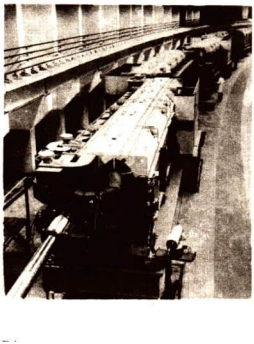
Theorie der elektromagnetischen Felder erfüllte erstaunlicherweise die Forderungen der speziellen Relativitätstheorie. Sie enthält z. B. die Konstante c als Funktion zweier elektrischer Konstanten.

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = c \qquad (120)$$

Prüfen Sie die Größenart des linken Ausdruckes!
Rechnen Sie den Zahlenwert nach!

Die 1928 von DIRAC vorgenommene relativistische Formulierung der Quantentheorie des Elektrons ergab eine bessere Übereinstimmung mit den Meßergebnissen und führte zur Voraussage des Positrons, das 1932 entdeckt wurde. Zum Abschluß soll noch eine Berechnung der Impulsmasse und Geschwindigkeit von Teilchen in Beschleunigern durchgeführt werden.

99/1 In der Sowjetunion wird seit 1963 an der Entwicklung eines neuen kybernetischen Beschleunigers für eine Energie bis 1000 GeV gearbeitet. Ein Modell dieses Beschleunigertyps mit Energien bis 1 GeV ist seit 1968 in der Erprobung. Der Ringbeschleuniger wird einen Durchmesser von 5435 m haben. Beim Bau solcher Beschleuniger werden höchste Anforderungen an Wissenschaft und Technik (Präzision, Regeltechnik) gestellt.
Hier zeigt sich besonders deutlich die Verschmelzung von Wissenschaft und Technik, wie sie sich in anderen Bereichen der Produktion, wie zum Beispiel im Reaktorbau, ebenfalls entwickelt



Mit der Masse-Energie-Beziehung berechnet man die Ruheenergie eines Elektrons in MeV. Die Ruhemasse eines Elektrons ist $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg; 1 Nm = $6{,}24 \cdot 10^{12}$ MeV.

Gegeben:
$m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
$c = 3 \cdot 10^8$ m · s^{-1}

Lösung:
$W_0 = m_0 \cdot c^2$
$W_0 = 81{,}9 \cdot 10^{-15}$ kg m^2 · s^{-2}
$W_0 = 81{,}9 \cdot 10^{-15} \cdot 6{,}24 \cdot 10^{12}$ MeV
$W_0 = 0{,}51$ MeV

Eine entsprechende Rechnung liefert für ein Proton eine Ruheenergie von 938 MeV.

Da mit Protonen höhere Energien als mit Elektronen erreichbar sind, besitzen Protonenbeschleuniger für die Erforschung der Elementarteilchen entscheidende Bedeutung.

Seit Anfang des Jahres 1969 arbeitet in Serpuchow bei Moskau das größte Protonen-Synchroton der Welt, in dem Protonen mit einer Energie von 76 GeV erzeugt werden. Für diese Energie soll berechnet werden:

1. Wieviel mal so groß ist die Impulsmasse wie die Ruhemasse?
2. Wie groß ist die Geschwindigkeit der Protonen?

Multipliziert man die Impulsmasse mit c^2, so erhält man die Gesamtenergie $W = 76$ GeV. Statt der Ruhemasse benutzt man die Ruheenergie $W_0 = 938$ MeV.

Gegeben:
$W = 76 \cdot 10^9$ eV
$W_0 = 938 \cdot 10^6$ eV

Gesucht:
n

Lösung:
$$n = \frac{W}{W_0} = \frac{m}{m_0}$$
$$n = \frac{76 \cdot 10^9 \text{ eV}}{938 \cdot 10^6 \text{ eV}}$$
$$n = 81$$

Man benutzt $n = \frac{W}{W_0} = \frac{m}{m_0}$ und formt

die Gleichung $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$ um.

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{n^2}, \quad c^2 - v^2 = \frac{c^2}{n^2}, \quad (c - v) \cdot (c + v) = \frac{c^2}{n^2}$$

Näherungsweise setzt man $c + v \approx 2c$

und erhält $c - v \approx \frac{c}{2n^2}$

Gegeben: *Lösung:*

$n = 81$ $c - v \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \cdot 81^2}$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $c - v \approx 23 \text{ km s}^{-1}$, $\underline{\underline{v \approx 299\,770 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}}$

Philosophisch-weltanschauliche Folgerungen aus der speziellen Relativitätstheorie

Die Begriffe Raum, Zeit, Masse und Energie sind Grundbegriffe, gewissermaßen Werkzeuge zum Erfassen und Erforschen der materiellen Welt. Insbesondere die Begriffe Raum und Zeit werden seit sehr langen Zeiten von den Philosophen untersucht und interpretiert. Die neuen Erkenntnisse hatten weitreichende Folgen für die Philosophie.

Raum und Zeit. Der dialektische Materialismus geht bei der Bildung dieser Kategorien von exakten wissenschaftlichen Grundlagen der Mathematik und Naturwissenschaft aus.

Der Begriff des Raumes entwickelte sich aus der Landvermessung, der Schiffahrt und anderen Messungen. Er ist stets an ein Bezugssystem geknüpft, das aus Körpern gebildet wird. In diesem Bezugssystem können Ortsmessungen vorgenommen und kann der Abstand zweier Punkte als Länge ermittelt werden. Die Zahl der Körper, die das Bezugssystem bilden, kann man gedanklich bis zu einer gewissen Grenze reduzieren, so daß der an Ortsmessungen geknüpfte Begriff des Raumes sinnvoll ist. Sind keine Körper mehr vorhanden, so verliert der Begriff des Raumes seinen Sinn.

Der Zeitbegriff ist nur in bezug auf sich bewegende Materie sinnvoll. Gemessen wird die Zeit durch Vergleich mit materiellen Vorgängen von konstanter Dauer, z. B. periodischen Bewegungen. Bestünde die Welt nur aus Körpern, die sich selbst und ihren Ort nicht verändern, so gäbe es den Begriff der Zeit nicht.

In der klassischen Physik Newtons wurde die Existenz eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit behauptet.

„Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich. Die absolute, wahre Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand."

Die idealistische Philosophie Kants sah Raum und Zeit als bloße Anschauungsformen, als subjektive Formen der Erkenntnis an, die nicht aus den Verhältnissen der äußeren Erscheinungen abgeleitet sind.

Die Aussagen der speziellen Relativitätstheorie bestätigen die Erkenntnis des dialektischen Materialismus, daß Raum und Zeit als Existenzformen der Materie untrennbar mit der Materie und der Bewegung als ihrer Daseinsweise verbunden sind und unabhängig von unserem Bewußtsein objektiv real existieren. Die Länge eines Körpers und die Dauer eines Vorganges kann nur von einem materiellen Bezugssystem aus gemessen werden und ist von der Relativbewegung der Bezugssysteme abhängig.

Masse und Energie. Masse und Energie wurden in der klassischen Physik als voneinander unabhängige Größen angesehen, die zwei verschiedene Eigenschaften der Strukturformen der Materie repräsentieren. Für beide gab es getrennte Erhaltungssätze (↗ S. 128).
Beide Sätze waren nur unter bestimmten Bedingungen gültig. Der Satz von der Erhaltung der Masse galt in sehr guter Näherung bei chemischen Vorgängen, aber nicht mehr bei Kernprozessen.

In der Relativitätstheorie verschmelzen die beiden Erhaltungssätze zu einem Erhaltungssatz mit einem viel umfassenderen Gültigkeitsbereich. Man kann Energien in Massen umrechnen oder — wie es in der Physik der Elementarteilchen üblich ist — statt der Ruhmasse die Ruhenergie eines Teilchens angeben.
Masse und Energie bilden als Eigenschaften der Strukturformen der Materie eine dialektische Einheit. Sie sind untrennbar miteinander und mit der Materie verbunden. Es sind zwei Seiten derselben Sache, und es hängt von der Art unserer Messung ab, ob wir Masse oder Energie messen.
Gibt ein System z. B. durch eine Kernreaktion Energie ab, so nimmt auch seine Masse entsprechend der Einsteinschen Beziehung ab (Massendefekt). Wird diese Energie von einem anderen System (z. B. einem bestimmten Teil der Umwelt) aufgenommen, so ist damit eine entsprechende Massenzunahme dieses Systems verbunden.
Aus der Masse-Energie-Beziehung folgt auch, daß ein Feld als Träger von Energie eine Masse besitzt.

Beziehungen zwischen klassischer und moderner Physik

Die klassische Mechanik entstand auf der Grundlage von Messungen und experimentellen Erfahrungen im Bereich kleiner Geschwindigkeiten. Sie gibt die physikalischen Er-

scheinungen in diesem Bereich mit genügender Genauigkeit richtig wider.

Wesentliche Grundlage dieser Theorie ist die Annahme, daß bei einer Messung von jedem Bezugssystem aus Länge, Zeit und Masse den gleichen Wert besitzen, also absolute Größen sind. Auf der Grundlage dieser Theorie wurde der Michelson-Versuch geplant und durchgeführt. Der Widerspruch zwischen Theorie und Versuchsergebnis zwang zur Überprüfung der Grundvoraussetzungen.

ALBERT EINSTEIN gelang es, die entscheidende Erkenntnis über die Relativität der Gleichzeitigkeit zu finden. Den aus der täglichen Erfahrung stammenden ungenauen Begriff der Gleichzeitigkeit präzisierte er durch eine Meßvorschrift. Auf dieser Grundlage konnte er die Relativität von Länge, Zeit und Masse logisch und in Übereinstimmung mit den neuen Erfahrungen im Bereich großer Geschwindigkeiten begründen.

Die spezielle Relativitätstheorie bringt für einen größeren Bereich der Naturerscheinungen eine Erklärung. Die Gesetze der klassischen Mechanik sind als Sonderfall $V \ll c$ darin enthalten.

Diese Entwicklung ist ein deutliches Beispiel für die Dialektik des Erkenntnisprozesses. Die neue Erkenntnis stand auf höherer Stufe. Sie enthielt Voraussagen für die Praxis (Energiegewinnung), die bei weiterer Vervollkommnung der technischen Möglichkeiten realisiert wurden (Atomenergie, Bild 102/1).

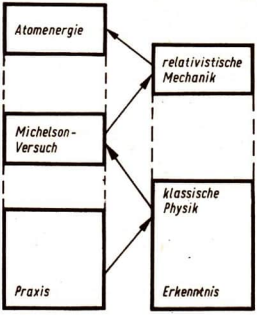
Die moderne Physik hat auch in anderen Bereichen die Grundlagen der Theorie präzisiert und damit unsere Erkenntnis bereichert.

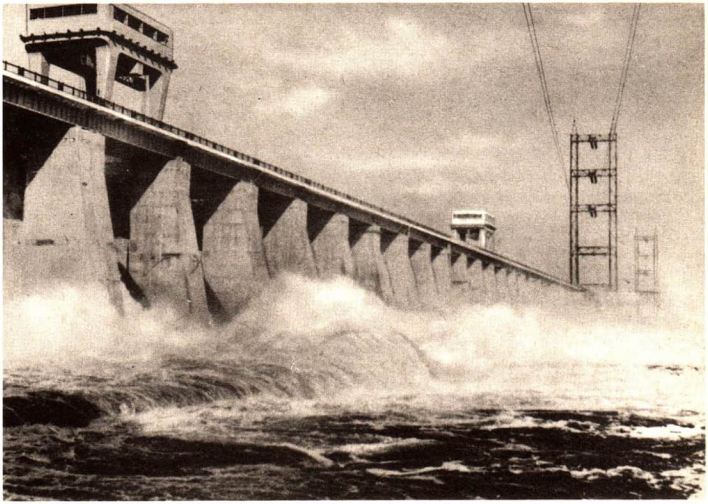
So kann sich die Energie eines Systems nicht immer kontinuierlich ändern, wie früher allgemein angenommen wurde. Unter bestimmten Bedingungen, wie z. B. bei dem im Atom gebundenen Elektron, kann sich die Energie des Systems nur sprunghaft um bestimmte Beträge ändern, die durch das Plancksche Wirkungsquantum h gegeben sind. Diese Erkenntnis ist eine wesentliche Grundlage der Quantenphysik. Bestimmte Bereiche des Naturgeschehens werden mit statistischen Gesetzen und Wahrscheinlichkeitsaussagen beschrieben.

In der Wärmelehre erfolgt das, weil es unmöglich ist, von allen Teilchen in einem Augenblick Ort und Impuls zu messen, um das weitere Geschehen berechnen zu können. Außerdem übersteigen derartige Berechnungen unsere Möglichkeiten.

In der Atomphysik kann man für das Elektron im Atom nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen, weil Ort und Impuls des Elektrons nicht gleichzeitig meßbar sind.

102/1 Höherentwicklung von Praxis und Erkenntnis durch den Erkenntnisprozeß





Der Energieerhaltungssatz

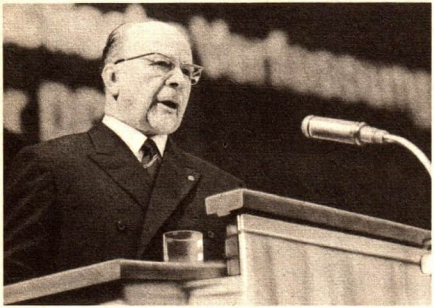
Die Menge der für die Menschheit verfügbaren Energie ist außerordentlich groß, aber der größere Teil davon ist noch nicht erschlossen.

Damit den Menschen in der sozialistischen Gesellschaft ein hoher Lebensstandard gewährleistet werden kann, müssen die noch ungenutzten Energiequellen erschlossen werden.

Man schätzt, daß sich im letzten Drittel unseres Jahrhunderts die Zahl der Menschen verdoppelt und daß gleichzeitig der Energiebedarf in diesem Zeitraum annähernd auf das Sechsfache ansteigt.

In allen sozialistischen Staaten werden deshalb für die Erschließung neuer Energiequellen und für die Erweiterung der Energieversorgung umfangreiche Mittel zur Verfügung gestellt.

Die Energieprogramme dieser Staaten, angefangen beim GOELRO-Plan des jungen Sowjetstaates, sind ein Ausdruck der verantwortungsbewußten Planung und Entwicklung zum Nutzen der sozialistischen Staatengemeinschaft.



Energieumwandlung

„Die technische Revolution ist mit einem sehr schnellen Ansteigen des Energiebedarfs verbunden. Das erfordert den rationellen Einsatz der Energie, die Suche nach Verfahrenszügen, die die Energie mit optimalem Wirkungsgrad anwenden, die Erschließung neuer Energiequellen und die Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Energieerzeugung und Energieübertragung."
(W. ULBRICHT)

Die Energie und ihre Erscheinungsformen

Im Bereich der Volkswirtschaft ebenso wie in den Naturwissenschaften begegnet man immer wieder dem Energiebegriff. In allen Gebieten der Physik erweist sich dieser Begriff als eine fundamentale Größe zur Erfassung und Beschreibung grundlegender physikalischer Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten.
Auf Seite 105 sind noch einmal die wichtigsten Energieformen tabellarisch zusammengestellt.
Unter *Energie* versteht man die Fähigkeit der Materie, Arbeit zu verrichten.
Wird von einem System auf ein anderes Energie übertragen, dann ist die *Arbeit* oder auch die *Wärmemenge* ein Maß für die übertragene Energie.
Die Erfahrung zeigt, daß ein sich selbst überlassener physikalischer Körper oder ein physikalisches System dem Zustand zustrebt, bei dem seine potentielle Energie einen möglichst kleinen Wert annimmt.
Natürliche chemische Prozesse wie z. B. die Korrosion verlaufen so, daß dabei die chemische Energie des Endproduktes einen kleineren Wert erreicht als die der miteinander reagierenden Stoffe.
Natürliche thermische Prozesse verlaufen in weiten Bereichen unserer Erfahrung in Richtung auf einen Ausgleich der räumlichen Verteilung der Wärmeenergie in einem abgeschlossenen System.

Energieform	Symbol	Größengleichung
Mechanische Energie	W_m	
Potentielle Energie	W_{pot}	
Lageenergie	W_H	$W_H = m \cdot g \cdot h$
Spannenergie (elast. Energie)	W_F	$W_F = \frac{1}{2} F_E \cdot s$
Kinetische Energie	W_{kin}	
Kinetische Energie der Translationsbewegung	$W_{kin\rightarrow}$	$W_{kin\rightarrow} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
Kinetische Energie der Rotationsbewegung	$W_{kin\circ}$	$W_{kin\circ} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$
Arbeit (übertragene mechanische Energie)	W_m	$W_m = \int_0^s \vec{F} \cdot \vec{ds}$
Energie-Erhaltungssatz (mechanische Energie)		$W_{kin} + W_{pot} =$ konstant
Elektrische und magnetische Energie		
Energie des elektrischen Feldes (Kondensator)	W_{el}	$W_{el} = \frac{1}{2} Q \cdot U = \frac{1}{2} C \cdot U^2$
Arbeit des elektrischen Stromes (Gleichstrom)	W_{el}	$W_{el} = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t$
Energie des magnetischen Feldes (einer Spule)	W_{magn}	$W_{magn} = \frac{1}{2} L \cdot I^2$
Bindungsenergie		
Chemische Energie (Bindungsenergie im Molekülverband)	W_{chem}	exotherm: $W_{chem\,1} = W_{chem\,2} + W_W$ endotherm: $W_{chem\,1} + W_W = W_{chem\,2}$
Kernbindungsenergie	W_B	$W_B = [(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_K] \cdot c^2$
Strahlungsenergie (eines Quants)	W_{Str}	$W_{Str} = h \cdot f$
Thermische Energie	W_{therm}	
Innere Energie (ideales Gas)	W_i	$W_i = \frac{3}{2} m \cdot R \cdot T$
(zweiatomiges Gas)	W_i	$W_i = \frac{5}{2} m \cdot R \cdot T$
Übertragene Wärmemenge	W_W	$W_W = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$
1. Hauptsatz der Wärmelehre		$W_W = \Delta W_i + W_m$

Umwandlung der Energie

Zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen der Energie existieren vielfältige Wechselbeziehungen.
Unterschiedliche Energieformen wandeln sich gesetzmäßig ineinander um. Dabei bleibt die Summe der auftretenden Energien erhalten (Satz von der Erhaltung der Energie).

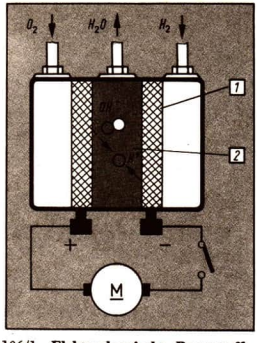
Noch vor etwa 120 Jahren suchten die Physiker die wirkenden Ursachen aller Naturvorgänge in voneinander unabhängigen „Kräften", für die sie je nach Bereich und Erscheinungsform spezifische Bezeichnungen bildeten und voneinander unabhängige Einheiten festlegten. Man sprach von „lebendiger Kraft", „Schwungkraft", „Fallkraft", „Spannkraft", „chemischer Kraft", „elektrischer Kraft" („elektromotorischer Kraft"), „Wärmekraft" usw. Die Bezeichnungen „Wärmekraftwerk", „Wasserkraftwerk" usw. sowie die für verschiedene Bereiche gebrauchten scheinbar voneinander unabhängigen Energieeinheiten erinnern noch daran.

Zahlreiche Beobachtungen, insbesondere die Erfahrung, daß gegeneinander bewegte Körper durch Reibung abgebremst werden und daß dabei Wärme auftritt, deutete J. R. MAYER so, daß „auch die Wärme eine besondere Form der Kraft" ist. Sie ist das Äquivalent der verlorenen mechanischen Arbeit. In seiner 1842 veröffentlichten Schrift „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur" bezog er schon die Wärme mit in den von ihm formulierten Satz von der „Erhaltung der lebendigen Kraft" ein. 1845 gelangte MAYER in seinen Untersuchungen zu der viel umfassenderen Erkenntnis: „Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt eine gegebene Kraft eine konstante Größe... Es gibt in Wahrheit nur die einzige Kraft. Im ewigen Wechsel kreist dieselbe in der toten wie in der lebendigen Natur. Dort und hier kein Vorgang ohne Formänderung der Kraft." — „Die quantitative Unveränderlichkeit des Gegebenen ist oberstes Naturgesetz, das sich auf gleiche Weise über Kraft und Materie erstreckt."

Ersetzt man das Wort Kraft durch Energie, dann drücken diese Sätze bereits den Satz von der Erhaltung der Energie aus.
Die Einführung des Energiebegriffes im heutigen Sinne verdanken wir dem schottischen Ingenieur RANKINE.

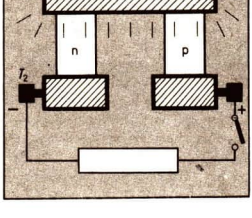
Aufbauend auf den Erkenntnissen von MAYER, JOULE und HELMHOLTZ, legten KRÖNIG, CLAUSIUS, MAXWELL und BOLTZMANN die wissenschaftlichen Grundlagen für eine kinetische Theorie der Wärme. Sie führten die Wärmeenergie auf die Bewegungsenergie der Moleküle zurück.

Bei rein mechanischen Vorgängen, z. B. bei Hubarbeit im Schwerefeld der Erde, wurde die *Arbeit*, bei rein thermischen Vorgängen die *Wärme* als „Erhaltungsgröße" angesehen. Bei den praktisch vorkommenden physikalischen Prozessen sind diese Größen einzeln keine Erhaltungsgrößen. Dafür gilt nun der umfassende „1. Hauptsatz der Wärmelehre".



106/1 **Elektrochemische Brennstoffzellen** wandeln die chemische Energie von Brennstoffen unmittelbar in elektrische Energie um.
Molekularer Wasserstoff und Sauerstoff werden über getrennte Kanäle durch zwei poröse Metallwände (1) aus Speziallegierungen (Ag, Pt, Ni) in eine Kammer mit einem Elektrolyten (2) gepreßt.
Beim Durchtritt durch die Poren der Metallwände werden die Moleküle katalytisch in Atome gespalten. Die Wasserstoffatome geben Elektronen an die Trennwand ab (Oxydation) und bilden H^+-Ionen. Die Sauerstoffionen nehmen aus der anderen Trennwand Elektronen auf (Reduktion) und bilden OH^--Ionen. Im Elektrolyten vereinigen sich H^+ und OH^- zu Wasser.
Die Trennwände sind die Pole der Spannungsquelle.
Es gibt heute bereits Batterien von Brennstoffzellen mit einer Leistung von etwa 5 kW, die einen Strom von 240 Ampere liefern können. Ihre Vorteile bestehen in einer relativ hohen Volumenleistung (Leistung/Volumen), in geringer Wärmeentwicklung, im Fehlen beweglicher Teile und in der Geräuschlosigkeit des Arbeitens. Der Wirkungsgrad liegt je nach Konstruktion und Brennstoff zwischen 30% und 75%.

107/1 **Halbleiter-Thermoelemente** können als thermoelektrische Generatoren zur direkten Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie mit einem günstigen Wirkungsgrad eingesetzt werden. Sie bestehen aus zwei hochdotierten n- und p-Leitern aus Mischkristallen von Silizium und Germanium, die über einen Metallbügel (1) an einem Ende miteinander verbunden sind. Beim Erwärmen (Energiezufuhr) des Metallbügels nimmt in den n- und p-Leitern die Konzentration von Elektronen und „Löchern" zu, und es findet eine Diffusion von Elektronen bzw. „Löchern" vom Ort hoher Temperatur zum Ort niedriger Temperatur statt. Die kalten Enden der Halbleiter, die mit Metallelektroden versehen sind, werden dadurch zu den Polen des thermoelektrischen Generators.
Man hat bereits Thermoelemente gebaut, die in Gruppenschaltungen Leistungen zwischen 100 Watt und einigen Kilowatt aufbringen. Wenn auch z.Z. bei flammenbeheizten thermoelektrischen Generatoren der Wirkungsgrad erst bei etwa 2%, bei Radionuklid-Batterien als Wärmequellen bei etwa 5% liegt, so rechnet man doch mit einer wesentlichen Verbesserung des Wirkungsgrades, wenn die komplizierten Werkstofffragen besser gelöst sind (hohe Temperaturen erfordern hitzebeständige Halbleiter mit geringer Wärmeleitfähigkeit).



Bei der elektromagnetischen Induktion wird mechanische Energie in elektrische Energie umgeformt. Seit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips beruht auf diesen Erkenntnissen die technische Großerzeugung von elektrischer Energie in einem komplexen Umwandlungsprozeß. Energetisch betrachtet, ist jedes elektrische Gerät ein Energiewandler. Elektrische Energie läßt sich nicht nur leichter übertragen, sondern auf einfachere Art und mit geringeren Verlusten in jede beliebige Energieform umwandeln als irgendeine andere Energie.

Als Erfahrungssatz hat sich in allen Bereichen der klassischen und der modernen Physik immer wieder bestätigt, daß bei den Vorgängen der Energieübertragung und der Energieumwandlung innerhalb eines von der Umwelt abgeschlossenen Systems stets die Summe der dabei auftretenden Energien erhalten bleibt. In den von uns betrachteten Beispielen hatte die Energiebilanz meist die Form

$$W_1 = W_2 + W_3 . \qquad (121)$$

Ganz allgemein gilt

$$\Sigma W = \text{konstant}. \qquad (122)$$

PLANCK ergänzte diese Aussage durch den Satz: „Die Energie eines materiellen Systems ist die Summe der einzelnen, in dem System vorhandenen, voneinander unabhängigen Energiearten, und jede äußere Wirkung verändert nur die Energieart, die ihr gerade entspricht." (Prinzip der Superposition).
In der Gleichung (122) ist die Aussage eingeschlossen, daß es keine Vorrichtung gibt, die mechanische Arbeit verrichtet, ohne daß dafür ein gleichwertiger Betrag irgendeiner anderen Energie aufgebracht wird. PLANCK weist darauf hin, daß zur Gewinnung dieser Erfahrung die Menschheit viele Jahrhunderte gebraucht hat, daß es ungezählte Menschen gab, „die sich nicht scheuten, Gut und Leben daranzusetzen, um durch Erschaffung von Arbeitswert aus dem Nichts die Behauptung des Satzes zu widerlegen. Wenn man daher überhaupt einen durch Erfahrung gewonnenen indirekten Beweis gelten lassen will, so hat man es in diesem Falle zu tun und wird dann auch den Preis, um welchen die für die ganze Menschheit so wertvolle Wahrheit erkauft wurde, nicht allzu kostspielig finden."

Versucht man, das Gemeinsame und Wesentliche aus allen Erscheinungsformen der Energie zu finden, dann gelangt man zu der Erkenntnis, daß sich jede Energieform auf direktem Wege oder auf einem Umwege über andere Formen in mechanische Arbeit umwandeln läßt.
Man gelangt so zu der Definition:

Die Energie ist eine Zustandsgröße, die das in einem materiellen System (Körper, Feld, Strahlung) enthaltene Arbeitsvermögen kennzeichnet.

Im Hinblick auf die vielfältigen Formen, in denen uns die Energie begegnet, muß man den Energiebegriff als eine der treffsichersten Formulierungen bezeichnen, die die Naturforscher gefunden haben, um das Gemeinsame, das Wesentliche und Charakteristische in den mannigfaltigen Naturerscheinungen zu erfassen und quantitativ zu bestimmen. Mit Hilfe dieses Begriffes lassen sich tatsächlich alle Naturvorgänge unter einem einheitlichen Gesichtspunkt qualitativ beschreiben, und ihre Gesetzmäßigkeiten lassen sich quantitativ formulieren. Alle natürlichen und technischen Prozesse sind Vorgänge der Energieumwandlung und Energieübertragung.

Erläutern Sie die Energiegleichungen auf Seite 105, kennzeichnen Sie ihren Gültigkeitsbereich und nennen Sie Beispiele für jede Gleichung!

Bedeutung des Energieprinzips

Eine Hauptaufgabe der *Physik* besteht darin, die verschiedenen Formen der Energie und die Gesetzmäßigkeiten ihrer Umwandlung und Übertragung zu erforschen. Chemische Veränderungen und biologische Prozesse sind dabei nicht Untersuchungsgegenstand.

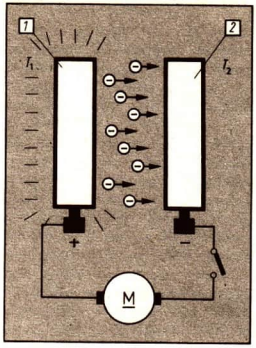
Die physikalische *Chemie* beschäftigt sich dagegen speziell mit der Wechselwirkung zwischen stofflichen und energetischen Prozessen bei chemischen Reaktionen. Hier spielen der Energiebegriff und das Energieprinzip eine ebenso große Rolle wie der Stoffbegriff und das klassische Prinzip von der Erhaltung der Masse.

Die *Biologie* lehrt, daß alle Lebensvorgänge mit energetischen Prozessen verbunden sind. In den Pflanzen werden unter der Einwirkung der Sonnenstrahlung bei der Fotosynthese energiereichere organische Verbindungen aus energiearmen anorganischen Stoffen gebildet. Im Tierkörper werden energiereiche Nahrungsstoffe unter Freisetzung von überwiegend thermischer und mechanischer Energie zu energieärmeren Stoffen abgebaut.

Alle Lebewesen sind nicht nur Energieträger. Sie wirken auch ständig als Energiewandler.

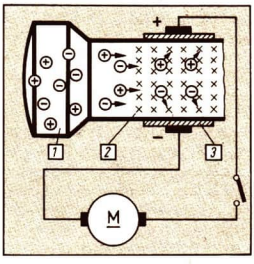
Die *Physiologie* als ein wichtiges Gebiet der Biologie erforscht die Prozesse der Energieumwandlung in Lebewesen. Jede Wahrnehmung oder Empfindung ist mit einer Energieübertragung von der objektiv vorhandenen Außenwelt auf die Sinnesorgane eines Lebewesens verbunden. Der Energiestrom (Schall, Licht, Wärme ...) ist der materielle Träger von *Informationen*.

Außerhalb der Naturwissenschaften spielt der Energiebegriff gleichfalls eine überragende Rolle:



108/1 **Der thermionische Konverter** arbeitet auf der Grundlage der Glühemission: Er besteht aus einer heißen Katode (Emitter), die Elektronen abgibt (1), und einer kalten Anode (2), die diese Elektronen aufnimmt (Kollektor). Er ähnelt damit vom physikalischen Prinzip her einer Röhrendiode. Im Gegensatz zu dieser wird aber keine Anodenspannung angelegt, sondern es wird durch die aus dem heißen Emitter austretenden Elektronen eine Spannungsdifferenz zwischen Emitter und Kollektor erzeugt.
Über einen äußeren Stromkreis können die Elektronen wieder zu dem geheizten Emitter zurückfließen und dabei Arbeit verrichten.
Der Konverter wirkt also als „Elektronenpumpe", die Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umformt. Bisher konnte man einen Wirkungsgrad von etwa 12% erreichen bei einer Emittertemperatur von 1500 °C und einer Kollektortemperatur von etwa 600 °C. An der Verbesserung der thermionischen Konverter wird intensiv gearbeitet. Sie zeichnen sich durch hohe Leistungen bei kleinem Volumen und durch geräuschloses Arbeiten aus. Ein besonderer Vorzug besteht darin, daß man mit dem Konverter die Abwärme von Kernreaktoren verwerten kann.

109/1 **Der magneto-hydrodynamische Generator** (↗ Abschnitt Felder, S. 76). Durch Verbrennung wird in einer Brennkammer (1) ein hocherhitztes, ionisiertes Gas (Plasma) erzeugt, das dann mit großer Geschwindigkeit durch ein Magnetfeld (2) strömt. Infolge der Lorentzkraft, die senkrecht zur Strömungsrichtung und senkrecht zur Richtung der Kraftlinien auf die Ionen und Elektronen des Plasmas wirkt, werden die Ladungsträger aus ihrer Richtung abgelenkt und entsprechend ihrer Ladung getrennt auf zwei Sammelelektroden (3) gerichtet. Dadurch entsteht zwischen diesen Elektroden eine Potentialdifferenz.
Für die Effektivität dieses Verfahrens ist es wichtig, daß das erhitzte Gas reich an Ladungsträgern (Ionen, Elektronen) ist. Dazu muß es Temperaturen von über 2500 °C erreichen. Außerdem erhöht man die Zahl der Ladungsträger in den Flammengasen noch durch Zusatz leicht ionisierbarer Stoffe (z. B. Alkalisalze).
Bei zu niedrigen Temperaturen der Verbrennungsgase rekombinieren die Ladungsträger, und der MHD-Generator arbeitet nicht mehr wirtschaftlich.
Man steigert den Wirkungsgrad der MHD-Generatoren, indem man die heißen Abgase nach dem Durchströmen des Magnetfeldes zusätzlich zum Antrieb von Turbinen einsetzt. Auf diese Weise will man einen Wirkungsgrad der gesamten Anlage von 55% erreichen.



Im Bereich der technischen Wissenschaften hat die *Energetik* speziell die Aufgabe, solche Maschinen und Anlagen zu entwerfen und zu erproben, die optimale Verfahren der Energieumwandlung („Gewinnung"), der Energiefortleitung und des Energieeinsatzes („Verbrauch") gewährleisten.

Der Entwicklungsstand der *Volkswirtschaft* eines Landes hängt in hohem Maße davon ab, über welche Energiequellen es verfügt und wie diese ökonomisch erschlossen und effektiv eingesetzt werden.

Umrechnung der Energieeinheiten

Für die Energie als Zustandsgröße, die das Arbeitsvermögen eines materiellen Systems bestimmt, werden die gleichen Einheiten wie für die Arbeit gebraucht. Vor allem aus historischen Gründen verwendet man in den Naturwissenschaften und in der Technik je nach der Erscheinungsform noch mehrere Energieeinheiten nebeneinander. Alle Einheiten unterscheiden sich aber nur durch Zahlenfaktoren voneinander.
Als kohärente Energieeinheit wurde gesetzlich festgelegt:

$$1\ \text{Wattsekunde} = 1\ \text{Joule} = 1\ \text{Newtonmeter} = 1\ \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Diese Beziehungen verdeutlichen die Gleichwertigkeit der Energie verschiedener Erscheinungsformen oder Herkunft. Insbesondere wurde durch die Festlegung 1 Nm = 1 Ws ein unmittelbarer Anschluß der elektrischen Einheiten an das System der mechanischen Einheiten hergestellt.
Man kann grundsätzlich jede Energieform in jeder gesetzlich zulässigen Einheit messen. „Zulässig" sind alle Energieeinheiten, die entweder als Produkt aus einer erlaubten Krafteinheit und einer zulässigen Längeneinheit (kpm, pcm) oder als Produkt aus einer zulässigen Leistungseinheit und einer gesetzlichen Zeiteinheit gebildet werden (Wh, kWh). Außerdem darf die klassische Wärmeeinheit Kalorie (kcal, cal) noch verwendet werden, obwohl es oft zweckmäßig ist, auch Wärmemengen in Joule oder Wattsekunde anzugeben.

Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung

Die Prozesse der Energieübertragung und Energieumwandlung werden durch den Satz von der Erhaltung der Energie widergespiegelt, der sich in einfachen Fällen durch die Energiebilanz $W_1 = W_2 + W_3$ ausdrücken läßt. W_1 ist die einem System (Energiewandler) zugeführte Energie, W_2 der Wert der erwünschten bzw. nutzbaren Energie und W_3 der Anteil

der Energie, der in einer nicht verwertbaren Form auftritt. Vom Standpunkt der technischen bzw. ökonomischen Verwertung der aufgewendeten Energie kann W_3 als „Verlust" betrachtet werden, obwohl physikalisch gesehen natürlich niemals Energie verloren geht.

Für die Beurteilung der Effektivität einer Energieübertragung bzw. -umformung ist der Wirkungsgrad η entscheidend:

$$\triangleright\ \eta = \frac{W_2}{W_1} \quad \text{oder}$$

$$\eta = 1 - \frac{W_3}{W_1}.$$

W_3 tritt meist als Wärmeenergie auf, die sich zerstreut. Sie kann nicht wieder in nutzbare Energieformen umgewandelt werden (irreversibler Vorgang). Ursachen sind die Erwärmung durch Reibung, die Stromwärme bei der Übertragung elektrischer Energie, die Erwärmung durch Wirbelströme in Transformatoren und anderen elektrischen Geräten usw.

Die Erzeugung von *Licht* verläuft bei den klassischen Verfahren immer über die Wärmeenergie. Das ist stets mit unerwünschter Wärmeentwicklung verbunden.

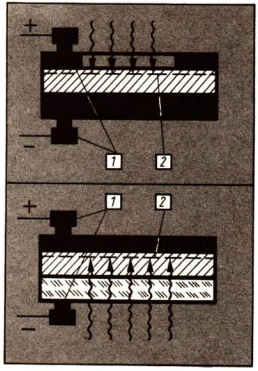
Der Energieanteil W_2 der sichtbaren Strahlung ist gegenüber der entstehenden Wärmeenergie W_3 sehr gering. Er läßt sich allerdings durch Erhöhung der Temperatur des leuchtenden Körpers steigern. Dieses Verfahren wird bei den modernen Glühlampen angewendet, es findet aber seine Grenze unterhalb der Schmelztemperatur des Glühfadens.

Der Wirkungsgrad bzw. die „Lichtausbeute" einer modernen Glühlampe beträgt nur etwa 5%, d. h. etwa 95% der aufgewandten elektrischen Energie W_1 erscheint als Wärme. Die Glühlampe wirkt also überwiegend als „Ofen". Bei Petroleum- oder Gaslampen beträgt die Lichtausbeute sogar nur 0,2%. Bei den modernen Gasentladungsröhren (Leuchtröhren, Leuchtstofflampen) wird Licht auf kaltem Wege, d. h. mit einem geringen Wärmeanfall erzeugt. In Leuchtstofflampen werden etwa 22% der aufgewendeten elektrischen Energie in Strahlungsenergie umgeformt.

● *Welche energetischen Prozesse verlaufen in einer Leuchtstofflampe? Wodurch entsteht der Verlustanteil W_3 von 78% bei dieser Lichtquelle?*

Von größter Bedeutung für unsere Volkswirtschaft ist die wirtschaftliche Erschließung der in den primären Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas...) vorhandenen latenten chemischen Energie. Sie erfolgt in Wärmekraftwerken überwiegend über eine Kette von Energieumformungen.

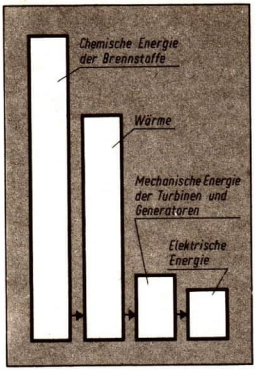
Während chemische Energie in Wärme und mechanische



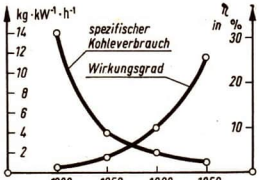
110/1 **Halbleiter-Fotoelemente.** Ein bereits in der Praxis, besonders in der Raumfahrt, erprobtes Verfahren zur direkten Umwandlung der von der Sonne gelieferten Strahlungsenergie in elektrische Energie beruht auf dem inneren lichtelektrischen Effekt.

Durch Verwendung von Silizium und neuerdings von Kadmium-Silizium, Kadmium-Tellur oder Gallium-Arsen als pn-Halbleiter in äußerst dünnen Schichten und durch zweckmäßige Schaltung vieler Zellen lassen sich größere Stromstärken und ein Wirkungsgrad bis zu 15% erzielen.

Bei Bestrahlen der Grenzschicht (2) im pn-Übergang werden dort Ladungsträger freigesetzt. Als Folge bestimmter Diffusionsvorgänge in diesem fotoelektrischen Bereich entsteht zwischen den äußeren Metallelektroden (1) eine Potentialdifferenz (Fotospannung). Werden die Elektroden leitend verbunden, so fließt im äußeren Leiter ein Elektronenstrom von der n-Elektrode zur p-Elektrode. Wenn die Strahlung, die die zum Freisetzen einzelner Elektronen erforderliche Energie ($W = h \cdot f_{Gr}$) liefert, eine bestimmte Grenzfrequenz f_{Gr} besitzt, so steigt die Stromstärke mit der Beleuchtungsstärke.



111/1 Wirkungsgrad der Energieumformungen



111/2 Entwicklung von Kohleverbrauch und Wirkungsgrad für Dampfmaschinen und Dampfturbinen

Energie in elektrische Energie mit einem hohen Wirkungsgrad umgewandelt werden, kann die Wärmeenergie nach dem 2. Hauptsatz der Wärmelehre nur zu einem begrenzten Teil in mechanische Energie umgeformt werden (Bild 111/1). Für eine Wärmekraftmaschine ist der

Wirkungsgrad $$\eta = \frac{W_{W1} - W_{W2}}{W_{W1}}. \qquad (123)$$

W_{W2} ist der Anteil der aufgewendeten Wärmeenergie, der nicht in mechanische Arbeit umgewandelt wird, sondern in das Reservoir von niederer Temperatur übergeht.

Aus den Gesetzen der Thermodynamik läßt sich ableiten, daß der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine höchstens η_{th} sein kann:

thermischer Wirkungsgrad $$\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (124)$$

Das heißt, auch bei einer idealen Maschine, bei der weder Reibung noch Wärmeverluste auftreten, kann nur ein Bruchteil der Wärmeenergie in mechanische Arbeit umgeformt werden. Der *wirtschaftliche Wirkungsgrad* η_{wi} ist stets geringer als der thermische Wirkungsgrad. Durch Vergrößerung der Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ und durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Turbinen statt Kolbenmaschinen) gelang es, den wirtschaftlichen Wirkungsgrad von Wärmeenergiemaschinen in dem Zeitraum von 1830 bis 1969 von etwa 1% auf etwa 40% zu steigern.

Mit den klassischen Verfahren der Energieumformung, die stets die Umformung von Wärmeenergie in mechanische Energie mit einschließen, ist eine wesentliche Steigerung des Wirkungsgrades nicht mehr zu erwarten.

Diese Erkenntnis ist um so schwerwiegender, als auch die Nutzung der Kernenergie zur Zeit über die Wärmeenergie und mechanische Energie zur elektrischen Energie führt. Auch hier tritt durch den thermischen Wirkungsgrad eine prinzipielle Begrenzung der Effektivität auf.

Fossile Brennstoffe sind aber nicht nur Träger chemischer Energie, sondern zugleich Rohstoffe für die chemische Industrie. Deshalb müssen sie rationell eingesetzt werden.

Wissenschaftler und Ingenieure arbeiten daher intensiv an der Entwicklung solcher Verfahren, durch die chemische Energie oder Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umgeformt werden kann. Außerdem vervollkommnen sie Verfahren der direkten Umformung von Strahlungsenergie in elektrische Energie.

Diese Verfahren haben nicht nur wegen der zu erwartenden Verbesserung des Wirkungsgrades eine große Bedeutung, sondern sie befriedigen auch spezielle Bedürfnisse der Wissenschaft und Technik besser als die großen stationären

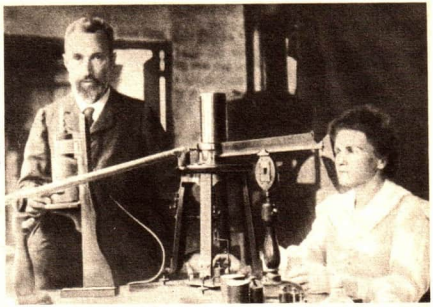
Wärme- und Wasserkraftwerke. Sie haben auch nicht die Nachteile der transportablen Verbrennungsmotoren: hoher Wärmeanfall, Abgas- und Lärmentwicklung und Erschütterungen (Bilder 106/1 bis 110/1).
Zusammenfassend kann man sagen, daß beim derzeitigen Stand der Entwicklung von Forschung und Technik die direkte Energieumformung zwar noch nicht ihr Ziel einer wesentlichen Verbesserung des Wirkungsgrades erreicht hat, daß aber die Wege dazu schon erkennbar sind. Bis heute sind jedoch bereits zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten untersucht, bei denen die genannten Verfahren vorteilhafter eingesetzt werden können als die klassischen Methoden der Energieumformung.

Übersicht über Verfahren direkter Energieumwandlung

Art der Energieumformung	Verfahren, physikalisches Prinzip	Vorzüge und spezielle Einsatzbereiche
Chemische Energie ↓ Elektrische Energie	Elektro-chemische Brennstoffzellen Umkehrung der Elektrolyse	Geräuschlos, keine Verschmutzung der Umgebung, geringe Wärmeentwicklung, ortsfeste und transportable Spannungsquelle auf der Erde und in der Raumfahrt
Wärmeenergie ↓ Elektrische Energie	Halbleiter-Thermoelement, thermoelektrischer Effekt, Seebeck-Effekt	Geräuschlos, langlebig, glatter Gleichstrom, Kombination mit Radionuklid-Batterien in der Raumfahrt
Wärmeenergie ↓ Elektrische Energie	Thermionischer Konverter, glühelektrischer Effekt	Große Leistung bei kleinem Volumen, glatter Gleichstrom, mit Reaktor-Abwärme zu betreiben, Raumfahrt
Wärmeenergie ↓ Elektrische Energie	MHD-Generator, Lorentzkraft wirkt auf bewegte Ladungen im Plasma	Glatter Gleichstrom, hoher Wirkungsgrad bei Vereinigung mit Turbine (Vorstufe)
Strahlungsenergie ↓ Elektrische Energie	Halbleiter-Fotoelement, innerer lichtelektrischer Effekt	Geräuschlos, wartungsfrei, arbeitet bei niedrigen Temperaturen, Satelliten.

Energiebilanz bei Kernreaktionen

Seit der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität und ihrer Erforschung durch MARIE und PIERRE CURIE steht fest, daß auch der Atomkern nicht unteilbar ist. Die aus radioaktiven Kernen herausgeschleuderten Alpha-Strahlen (Heliumkerne) besitzen Geschwindigkeiten bis zu 20000 km · s^{-1} bzw. Energien bis etwa 8,8 MeV. Auch die Beta- und Gamma-Strahlen haben beträchtliche Energien.



Kernkräfte und Bindungsenergie

Nimmt man den Durchmesser eines Atomkernes zu 10^{-15} bis 10^{-14} m an, so ergibt sich ein Kernvolumen von höchstens 10^{-42} m^3, in dem alle Nukleonen zusammengedrängt sind. Bei den geringen Abständen müßten die zwischen den Protonen wirkenden *Coulombschen Abstoßungskräfte* sofort zur Explosion der Kerne führen, wenn nicht sehr viel stärkere *Bindungskräfte* die Nukleonen zusammenhielten.

Welcher Natur sind diese Bindungskräfte?

Gravitationskräfte zwischen den Kernen würden trotz des kleinen Abstandes nicht ausreichen, um den festen Zusammenhalt der Kerne zu sichern. Auch magnetische Kräfte scheiden aus diesem Grunde zur Erklärung der Stabilität der Kerne aus.

Zur Deutung der Natur der Kernbindungskräfte stellten die sowjetischen Physiker I. TAMM und D. IWANENKO die Hypothese auf, daß die Bindungskräfte durch den Austausch von Elektronen zwischen den Nukleonen entstehen.

Nach der Theorie des Japaners YUKAWA werden ständig neutrale π-Mesonen zwischen Proton-Proton- und Neutron-Neutron-Paaren und negative π-Mesonen zwischen Proton-Neutron-Paaren ausgetauscht.

Wenn man über die Ursache der Kernkräfte auch noch keine volle Gewißheit hat, so weiß man doch sicher, daß diese Kräfte außerordentlich groß sind und daß sie nur eine Reichweite von etwa $2 \cdot 10^{-15}$ m besitzen. Sie wirken damit praktisch nur auf Nukleonen innerhalb desselben Atomkernes. Mit größeren Abständen nehmen die Kernkräfte

113/2 Nobelpreisträger Professor IGOR TAMM

sehr schnell ab. Dadurch unterscheiden sie sich von den Coulomb- und den Gravitationskräften.

▷ **Die Energie, die man aufwenden müßte, um gegen die Kernbindungskräfte den Atomkern in seine Bausteine zu zerlegen, nennt man Bindungsenergie. Dieselbe Energie wird frei, wenn der Kern aus den Nukleonen zusammengefügt wird.**

Massendefekt und Bindungsenergie

Für die Massen der Nukleonen hat man experimentell die folgenden genauen Werte gefunden:

Masse eines Protons $m_p = 1{,}00759\ u$
Masse eines Neutrons $m_n = 1{,}00898\ u$
Die atomare Masseneinheit $1\ u = 1{,}660277 \cdot 10^{-27}$ kg

Die atomare Masseneinheit (Symbol u) ist gleich $^1/_{12}$ der Masse eines $^{12}_{6}C$-Atoms, dessen Kern aus 6 Protonen und 6 Neutronen besteht.
Würde man die Masse eines beliebigen Atomkernes durch Addition der Massen aller am Aufbau des Kernes beteiligten Nukleonen berechnen, so ergäbe sich ein Wert m'_K, der um den Wert Δm größer ist, als der experimentell gemessene Wert m_K für die Masse des Kernes.

$\Sigma\,(m_p, m_n) \rightarrow m_K + \Delta m$

Man bezeichnet Δm als den

▶ **Massendefekt** $\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_K$. (125)

Der Massendefekt ist die Differenz aus der Summe der Massen aller Nukleonen eines Kernes und der experimentell bestimmten tatsächlichen Masse des Kernes.

Nach der Einsteinschen Gleichung entspricht Δm einem bestimmten Energiebetrag. Diesen Energiebetrag bezeichnet man als

▷ **Kernbindungsenergie** $W_B = \Delta m \cdot c^2$. (126)

Die den Kern bildenden Nukleonen haben unmittelbar vor ihrer Vereinigung eine größere potentielle Energie als danach. Bei der Vereinigung der Nukleonen wird also eine bestimmte Energie W_B frei.
Der Betrag der frei werdenden Energie ist ein Maß für die Stabilität des gebildeten Kernes. W_B ist dem Massendefekt proportional.
Aus den Gleichungen (125) und (126) ergibt sich für die

▷ **Bindungsenergie eines Kernes** $W_B = [(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_K] \cdot c^2$. (127)

Teilchen bzw. Element	Symbol	Massenzahl A	Protonenzahl Z	Neutronenzahl N	Kernmasse bzw. Teilchenmasse m_K	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	$^{238}_{92}U$

115/1 Charakteristische Größen einiger Atomkerne

Man kann also z. B. aus dem Massendefekt Δm, der bei der Verschmelzung von zwei Protonen und zwei Neutronen entsteht, die freiwerdende Energie W_B berechnen:

Gegeben:

$^{4}_{2}He$

$Z = 2$

$m_p = 1{,}00759\ u$

$N = 2$

$m_n = 1{,}00898\ u$

$m_K = 4{,}00278\ u$

Lösung:

$W_B = [(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_K]\, c^2$

$W_B = [4{,}03314\ u - 4{,}00278\ u] \cdot c^2$

$W_B = 0{,}03036 \cdot 1{,}660277 \cdot 10^{-27}\,kg \cdot 9 \cdot 10^{16}\,m^2 \cdot s^{-2}$

$W_B = 0{,}453 \cdot 10^{-11}\,kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$

$W_B = 0{,}453 \cdot 10^{-11}\,Nm$

$\underline{\underline{W_B \approx 28{,}28\ MeV}}$

Gesucht:

W_B

Diese Energie wird beim Aufbau eines einzigen Heliumkernes in Form von Gamma-Strahlung frei. Bei der Bildung von 1 g Helium würden $190 \cdot 10^3$ kWh Energie frei werden. Das entspricht dem Heizwert von 20 t Steinkohle.

Berechnen Sie die freiwerdende Bindungsenergie beim Aufbau eines $^{23}_{11}Na$-Kernes, wenn $\Delta m = 3{,}3 \cdot 10^{-28}$ kg ist!

Es wäre ein grober Fehler, wollte man aus diesem Sachverhalt schließen, daß Masse „verloren gegangen" und dafür Energie „entstanden" sei, daß sich „Masse in Energie verwandelt" hätte oder gar daß Materie „verschwunden" wäre. EINSTEIN hat lange vor dem experimentellen Nachweis des Massendefektes und der Kernbindungsenergie in seiner bedeutenden Schrift „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?" (1905) völlig klar und eindeutig den Sachverhalt dargestellt und theoretisch begründet. Er schreibt: „Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/v^2 ... Die Masse eines Körpers ist also ein Maß für dessen Energiegehalt; ändert sich die Energie um L, so ändert sich die Masse in *demselben* Sinne ..."

Es folgt dann die geradezu prophetische Aussage: „Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem

Maße veränderlich ist (z. B. bei Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird. — Wenn die Theorie den Tatsachen entspricht, so überträgt die Strahlung Trägheit . . .“

Die Bindungsenergiekurve

Die tatsächlichen Massen aller stabilen Kerne hat man sehr exakt bestimmt und mit dem Wert verglichen, der sich aus der Summe der einzelnen Nukleonenmassen errechnet. Mit der Einsteinschen Gleichung hat man aus den so ermittelten Massendefekten für die meisten Kerne die Bindungsenergie bestimmt. Trägt man diese über der Massenzahl *A* für jeden Kern auf, so ergibt sich das Diagramm Bild 116/1.

Ermittelt man für jeden einzelnen Kern die Bindungsenergie, die auf *ein* Nukleon dieses Kernes entfällt, dann ergibt sich, daß die meisten Kerne eine mittlere Bindungsenergie von 8 bis 8,6 MeV je Nukleon besitzen. Dagegen beträgt die mittlere Bindungsenergie je Nukleon im Deuteron nur etwa 1 MeV, für den $^{3}_{2}$He-Kern 2,5 MeV, für den $^{4}_{2}$He-Kern etwa 7 MeV und für Lithium 5,3 MeV.

Auch bei den schweren Kernen liegt die mittlere Bindungsenergie je Nukleon etwas unter 8 MeV (z. B. Uran 7,6 MeV).

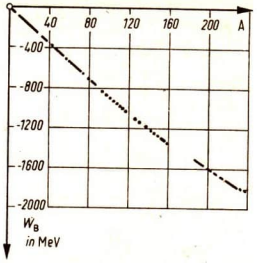
Die Kernspaltung

Die aufsehenerregenden Versuche Otto Hahns zum Beschuß von $^{238}_{92}$U-Kernen mit langsamen Neutronen führten nach gründlicher Auswertung zu drei wichtigen Erkenntnissen:

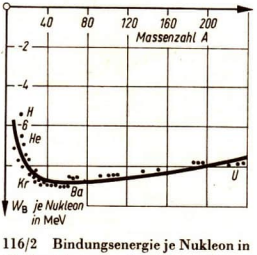
1. Bei Aufnahme eines Neutrons zerfällt der Urankern in zwei Teile, deren Massen sich wenig voneinander unterscheiden.

   Die Summe der Ordnungszahlen der Bruchstücke ist gleich der Ordnungszahl des Urankernes (z. B. $^{146}_{56}$Ba und $^{88}_{36}$Kr).
2. Bei diesem „Auseinanderbrechen“ des Kernes wird eine Energie von etwa 195 MeV je Kern frei.
3. Gleichzeitig werden bei jedem Zerfallsakt Neutronen frei, die weitere Urankerne spalten können (Kettenreaktion).

Wie ist es aber zu erklären, daß sowohl bei der *Vereinigung* von sehr leichten Kernen als auch bei der *Spaltung* von sehr schweren Kernen Energie frei wird?
Um das zu verstehen, muß man nochmals die Bindungsenergiekurve Bild 116/2 betrachten. Berechnet man die Energie, die frei wird, wenn a) ein $^{236}_{92}$U-Kern ($^{235}_{92}$U + 1 Neutron) und b) zwei Kerne mit der Massenzahl 118 einzeln aus 236 Nukleonen aufgebaut werden, so erhält man

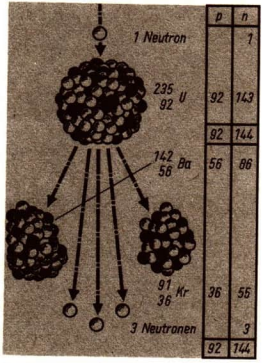


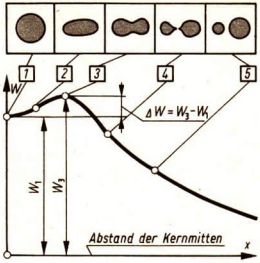
116/1 Bindungsenergie in Abhängigkeit von der Massenzahl



116/2 Bindungsenergie je Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

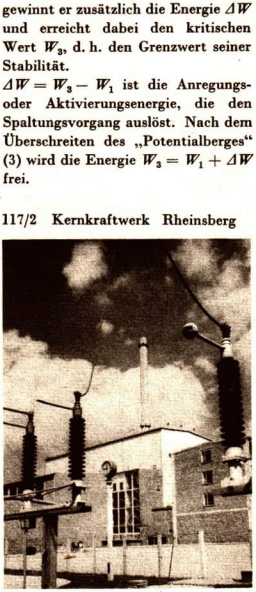
116/3 Kernspaltung





117/1 Energieverhältnisse in den einzelnen Phasen der Spaltung.
Im Zustand (1) besitzt der Kern die potentielle Energie W_1, bezogen auf das Energieniveau nach seiner Teilung in zwei stabile mittlere Kerne. — Durch das Eindringen des Neutrons gewinnt er zusätzlich die Energie ΔW und erreicht dabei den kritischen Wert W_3, d. h. den Grenzwert seiner Stabilität.
$\Delta W = W_3 - W_1$ ist die Anregungs- oder Aktivierungsenergie, die den Spaltungsvorgang auslöst. Nach dem Überschreiten des „Potentialberges" (3) wird die Energie $W_3 = W_1 + \Delta W$ frei.

117/2 Kernkraftwerk Rheinsberg



a) für den schweren Kern:

$W_B = 236 \cdot 7{,}6$ MeV

$W_B = 1794$ MeV

b) für die zwei mittleren Kerne:

$W_B = 2 \cdot 118 \cdot 8{,}4$ MeV

$W_B = 1982$ MeV.

Beim Aufbau der zwei leichten Kerne ist die frei werdende Energie um 188 MeV größer als beim Aufbau eines schweren Kernes. Der Wert stimmt recht gut mit dem für die Kernspaltung genau ermittelten Wert von 195 MeV überein. — Die zwei leichten Kerne sind wesentlich stabiler als der schwerere Urankern.

Multipliziert man die bei der Spaltung eines Urankernes frei werdende Energie mit der Zahl der Atome in einem Kilogramm Uran, so erhält man theoretisch (d. h. bei Annahme der völligen Spaltung des Materials) einen Energiebetrag von $5{,}4 \cdot 10^{26}$ MeV oder $24 \cdot 10^6$ kWh.
Diese Energie ist rund 10^6 mal so groß wie die bei der Verbrennung von 1 kg Steinkohle umgesetzte Energie.

Zum größten Teil (etwa 90%) erscheint die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie als *kinetische* Energie der auseinanderfliegenden Kerntrümmer, der freiwerdenden Neutronen, der Betastrahlen und der Neutrinos. Mittelbar äußert sich diese freiwerdende Energie als Wärmeenergie. Der Rest ist in der Strahlungsenergie der Gammaquanten enthalten.

Man kann den Urankern modellmäßig als einen kugelförmigen Tropfen auffassen, der durch die Oberflächenspannung seine Form bewahrt, und der elektrisch stark geladen ist. Wegen der hohen Protonenzahl ist die Stabilität des Kernes nur noch sehr gering. Dringt ein langsames Neutron in den Kern ein, so nimmt die Stabilität des Kernes noch mehr ab, und er zerfällt (Bild 117/1).

Mit dem Tropfenmodell kann man diesen Vorgang veranschaulichen: Beim Eindringen des Neutrons gerät der Kern in Schwingungen, er schnürt sich dabei zunächst ein. Dadurch wird die auf kurze Entfernung stark wirkende Bindungskraft geringer als die weitreichende elektrostatische Abstoßungskraft. Die Grenze der Stabilität wird damit überschritten, es kommt zur Teilung des Kerns. Die zwei positiv geladenen Kernteile stoßen sich kräftig ab und fliegen mit hoher Geschwindigkeit auseinander. Dabei wird kinetische Energie auf Kosten der potentiellen Energie des Kernes frei.

Vergleichen Sie den in Bild 117/1 gezeichneten „Potentialberg" mit einem Hügel, über den von (1) aus eine Kugel nach (5) gerollt werden soll!

Die zur Auslösung einer induzierten Kernspaltung erforderliche Aktivierungsenergie ΔW hängt von der Massenzahl des zu spaltenden Atomkernes und damit von seiner Stabilität ab. Für sehr schwere Kerne genügen geringe Energiezufuhren, für weniger schwere Kerne muß man dagegen sehr energiereiche Geschosse aufwenden, um überhaupt eine Spaltung zu erreichen (z. B. für $^{232}_{90}$Th Heliumkerne mit 30 MeV, für $^{209}_{83}$Bi Deuteronen mit 200 MeV).

Der erste Kernreaktor in der Welt, der der Erzeugung elektrischer Energie dient, wurde 1954 in der Sowjetunion in Betrieb genommen. In der DDR arbeitet seit 1966 der mit sowjetischer Hilfe errichtete Leistungsreaktor in Rheinsberg (Leistung 150 MW). Das wesentlich stärkere Kernkraftwerk Nord wird nach den neuesten sowjetischen Erfahrungen und mit Unterstützung der Sowjetunion in Lubmin bei Greifswald errichtet. Heute gibt es in verschiedenen Ländern zahlreiche Typen von Leistungsreaktoren. Das größte Kernkraftwerk der Sowjetunion mit einer Leistung von 1500 MW entsteht in Nowo-Woronesh am Don.

Die Kernfusion

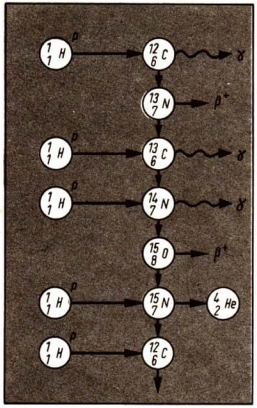
Die *Spaltung schwerer Kerne* wird durch Zufuhr einer Anregungsenergie beim Eindringen von Neutronen in die Kerne ausgelöst (induzierte Spaltung). Außer der erwünschten Energie fallen dabei noch radioaktive Abfallstoffe an, deren Beseitigung eine schwierige Aufgabe darstellt.

Bei der *Vereinigung leichter Kerne* wird die zur Einleitung des Fusionsprozesses erforderliche Energie aus der thermischen Energie eines Gasplasmas entnommen. Man bezeichnet deshalb diesen Prozeß als *thermonukleare Reaktion*. Ein Vorzug der thermonuklearen Reaktion besteht darin, daß sie keine radioaktive Schlacke liefert.

Energiequelle Sonne. Lange Zeit war es ein Rätsel, aus welchen Prozessen die Sonne und die Fixsterne die Energie schöpfen, die sie seit Milliarden Jahren in den Weltraum strahlen. Heute ist bekannt, daß diese Strahlungsenergie bei Kernfusionsvorgängen frei wird, die sich im Innern der Sterne bei Temperaturen von 10 bis $20 \cdot 10^6$ °K und bei großen Drücken abspielen.

Unter diesen physikalischen Bedingungen existieren keine normalen Atome oder Moleküle, sondern nur Atomkerne und freie Elektronen. Diesen Zustand eines Gases bezeichnet man als vollionisiertes *Plasma*.

Bei extrem hohen Temperaturen besitzen die Kerne eine so große kinetische Energie, daß sie die elektrostatischen Abstoßungskräfte überwinden und sich beim Aufeinanderprallen zu neuen Kernen vereinigen. Im wesentlichen voll-



119/1 Reaktionszyklus einer Kernfusion

zieht sich, wenn auch auf verschiedenen Wegen, eine Verschmelzung von Protonen zu Heliumkernen. Dabei werden zwei Positronen bei der Umwandlung von Protonen in Neutronen im Kernkraftfeld frei. Außerdem wird die Bindungsenergie W_B freigesetzt.

$$4 \cdot {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^0_1\mathrm{e}^+ + 28{,}5\ \mathrm{MeV}\,.$$

Die Bildung des Heliums vollzieht sich vor allem in zwei voneinander verschiedenen Prozessen.

Der Proton-Proton-Prozeß wird durch folgende Reaktionsgleichungen dargestellt:

$${}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^2_1\mathrm{H} + {}^0_1\mathrm{e}^+$$
$${}^2_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^3_2\mathrm{He}$$
$${}^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2 \cdot {}^1_1\mathrm{H}$$

Beim **Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus** wirken ${}^{12}_6\mathrm{C}$-Kerne als Katalysatoren:

$${}^{12}_6\mathrm{C} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^{13}_7\mathrm{N} \longrightarrow {}^{13}_6\mathrm{C} + {}^0_1\mathrm{e}^+$$
$${}^{13}_6\mathrm{C} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^{14}_7\mathrm{N}$$
$${}^{14}_7\mathrm{N} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^{15}_8\mathrm{O} \longrightarrow {}^{15}_7\mathrm{N} + {}^0_1\mathrm{e}^+$$
$${}^{15}_7\mathrm{N} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^{12}_6\mathrm{C} + {}^4_2\mathrm{He}$$

Diesen Reaktionszyklus stellten die Physiker Bethe und von Weizsäcker 1938 unabhängig voneinander auf.

Dabei ergibt sich in jeder Sekunde ein Masseverlust der Sonne durch Ausstrahlung von $4{,}3 \cdot 10^9$ Kilogramm. Trotzdem kann dieser riesige thermonukleare Reaktor noch viele Milliarden Jahre arbeiten.

Gesteuerte thermonukleare Reaktionen. Bei der Verbrennung von 1 kg Steinkohle wird Energie von etwa 10 kWh frei, bei der Kernspaltung von 1 kg Uran die zwei- bis dreimillionenfache Menge von Energie, dagegen bei der Bildung von einem Kilogramm Helium durch Kernfusion Energie von 200 Millionen kWh. Deshalb bemühen sich ganze Kollektive von Wissenschaftlern darum, die gesteuerte thermonukleare Reaktion technisch zu beherrschen und zu nutzen. Dazu sind vor allem zwei Probleme zu lösen:

Es muß ein vollionisiertes Wasserstoff- oder Deuteriumplasma hergestellt werden, das bei den technisch realisierbaren Drücken eine Temperatur von $5 \cdot 10^7$ °K bis zu mehreren Milliarden Grad Kelvin besitzt.

Dieses Fusionsplasma muß wegen seiner hohen Temperatur durch ein extrem hohes Vakuum völlig von seiner Umgebung (Gefäßwand) isoliert werden. Die Isolation kann im Prinzip durch ein das Plasma umgebendes Magnetfeld von geeigneter Form und Stärke erreicht werden („Magnetische Flasche"). Das Magnetfeld muß stark genug sein, um dem großen kinetischen Druck des Plasmas an seiner Oberfläche das Gleichgewicht zu halten.

Wenn auch die Energieausbeute beim Aufbau eines Heliumkernes aus *Protonen* größer wäre, so scheint doch der Weg über die Verschmelzung von *Deuterium-* bzw. *Tritiumkernen* technisch leichter realisierbar zu sein. Die für die Kernfusion technisch wichtigsten Reaktionen sind:

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{3}_{1}T + p + 4\ MeV$$

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{3}_{2}He + n + 3{,}3\ MeV$$

$$^{3}_{1}T + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He + n + 17{,}6\ MeV$$

$$^{3}_{2}He + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He + p + 18{,}3\ MeV$$

Die Kernenergie erscheint im Fusionsplasma als kinetische Energie von Ionen und Neutronen, durch die das Plasma unmittelbar aufgeheizt wird. Vielleicht gelingt es auch, den Energieanteil der Ionen *direkt* in elektrische Energie umzuwandeln.
Die *Neutronen* können durch die „magnetische Flasche" nicht zurückgehalten werden. Sie verlassen das Plasma. Ein wesentlicher Teil ihrer Energie, die nach Bremsung und Absorption der Neutronen in der Abschirmwandung des Reaktors in Wärme umgewandelt wird, kann ebenfalls genutzt werden.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Energiegewinnung aus gesteuerten Kernfusionen erfordern sehr große materielle und personelle Aufwendungen. Die DDR z. B. kann diese Mittel allein nicht aufbringen. Unsere Wissenschaftler haben aber Gelegenheit, zusammen mit sowjetischen Wissenschaftlern in den gemeinsamen Kernforschungszentren in der Sowjetunion an solchen Projekten zu arbeiten.
Es ist noch nicht abzusehen, wann es gelingen wird, gesteuerte thermonukleare Reaktionen für die friedliche Energiegewinnung einzusetzen. Von diesem Zeitpunkt steht der Menschheit aber eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung. Das Deuterium ist auf der Erde in großen Mengen vorhanden (etwa 0,016% im natürlichen Wasser) und kann in Isotopen-Trennanlagen gewonnen werden. In den Ozeanen ist soviel D_2O vorhanden, daß durch die DD-Reaktion in Fusionsreaktoren für $500 \cdot 10^6$ Jahre Energie gewonnen werden könnte. Das entspricht dem Energieäquivalent eines Behälters voll Erdöl, der die Größe der Erdkugel besitzt. Fusionskraftwerke werden so starke Energieströme liefern, daß ein einziges Kraftwerk mehrere Länder mit elektrischer Energie versorgen kann. Es ist deshalb für das Glück und für die Existenz der Menschheit von entscheidender Bedeutung, daß diese gewaltigen Energiequellen nur für friedliche Zwecke eingesetzt werden. Die Anwendung der Kernenergie kann entweder Wohlstand für alle Menschen erzeugen — sie kann aber auch zur völligen Zerstörung und zum Untergang der Menschheit führen. Die Verantwortung für eine Verhinderung des Mißbrauchs der Kernenergie tragen deshalb alle Völker.

Eine besondere Verantwortung für die friedliche Anwendung ihrer Erkenntnisse haben die Wissenschaftler und Ingenieure, die an der Erschließung der Kernenergie arbeiten.

J. ROBERT OPPENHEIMER (1904 bis 1967) nordamerikanischer Physiker, wurde 1943 zum Leiter der Atombomben-Versuchsstation in Los Alamos (Neu-Mexiko — USA) ernannt. Er, wie auch viele andere Physiker in Amerika, nahm an, daß in Deutschland ebenfalls an der Atombombe gearbeitet wurde.

In dieser Phase des zweiten Weltkrieges setzte OPPENHEIMER deshalb seine Kraft für die schnelle Niederwerfung der deutschen Imperialisten ein. Er gilt als der „Vater" der ersten zwei Atombomben, die noch während des Krieges unter seiner Leitung entwickelt wurden. Diese Bomben wurden von amerikanischen Flugzeugen nach Beendigung des Krieges in Europa am 6. und 9. August 1945 ohne militärische Notwendigkeit auf die japanischen Städte Nagasaki und Hiroshima abgeworfen und verursachten den Tod von 335 000 Menschen.

Nach Beendigung des zweiten Weltkrieges forderten die USA-Imperialisten die Entwicklung der noch furchtbareren Wasserstoffbombe. Auf Grund der gegen den Weltfrieden gerichteten Politik der amerikanischen Regierung weigerte sich OPPENHEIMER, nach Beendigung des 2. Weltkrieges an der Entwicklung der Wasserstoffbombe mitzuarbeiten. Auf Veranlassung des Sicherheitsausschusses der amerikanischen Atomenergie-Kommission wurde daraufhin gegen ihn ein Prozeß wegen unamerikanischen Verhaltens und wegen Sympathie für den Kommunismus durchgeführt. OPPENHEIMER mußte, allerdings nach aufreibenden Verhandlungen und Prozessen, von den gegen ihn erhobenen Anschuldigungen freigesprochen werden.

Die von OPPENHEIMER abgelehnte Entwicklung der Kernfusionsbombe führte der amerikanische Physiker E. TELLER für die USA-Imperialisten bedenkenlos durch. Die erste amerikanische Wasserstoffbombe wurde 1952 zur Explosion gebracht. Seit diesem Zeitpunkt wird die Menschheit von den USA-Imperialisten mit der Wasserstoffbombe ständig bedroht.

Deshalb ist es unsere Pflicht, die Sowjetunion bei ihren Bemühungen um Einstellung aller Kernwaffenversuche und besonders um das Verbot der Weiterverbreitung von Kernwaffen zu unterstützen.

Solange die imperialistischen Mächte versuchen, Uran- und Wasserstoffbomben als Mittel zur Erreichung ihrer politischen Ziele einzusetzen oder mit ihrem Einsatz zu drohen, dienen die Kernwaffen in den Händen der Sowjetunion dem Schutz des Friedens und des gesamten sozialistischen Lagers.

Masse-Energiebeziehung bei Paarzerstrahlung und Paarbildung

Bei manchen Kernprozessen werden *Positronen* ($^0_1e^+$) ausgeschleudert, z. B. im p—p-Zyklus und im Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus bei der Bildung von Helium. Die Lebensdauer dieser Teilchen beträgt nur etwa 10^{-9} s. Innerhalb dieser Zeit vereinigen sie sich in einem Kernkraftfeld jeweils mit einem normalen Elektron zu einem Zwillingspaar, das sich danach in zwei γ-Quanten umwandelt. Dabei besitzt jedes γ-Quant die Energie 0,5 MeV.

$$^0_1e^+ + {}^0_1e^- \longrightarrow 2\gamma$$

Paarzerstrahlung: Positron ↘ / Elektron ↗ 2 γ-Quanten

● *Prüfen Sie den Energiewert mit der Einsteinschen Gleichung!*

In Nebelkammeraufnahmen haben IRENE und FREDERIC JOLIOT-CURIE 1933 zum ersten Mal auch den umgekehrten Prozeß beobachtet: Ein sehr energiereiches Photon ($W_\gamma \geqq 1{,}02$ MeV) wandelt sich bei Anwesenheit von Atomkernen in ein Positron-Elektron-Paar um, das noch eine bestimmte kinetische Energie besitzen kann.
Es gilt die Energiebilanz:

$$h \cdot f - 1{,}02\ \text{MeV} = \frac{1}{2} m \cdot v^2_{\text{Elektron}} + \frac{1}{2} m \cdot v^2_{\text{Positron}}$$

Paarbildung: γ-Quant $W_\gamma > 1{,}02$ MeV ⟶ ↗ Positron / ↘ Elektron

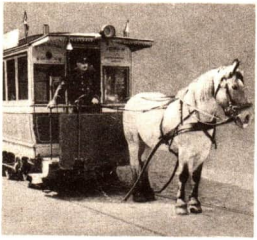
Der Vorgang der „Zerstrahlung" und der umgekehrte Vorgang der „Paarbildung" bestätigen das Gesetz von der Erhaltung der Energie und den Impulserhaltungssatz aufs neue. Es wird auch hier weder Materie „vernichtet" oder „erschaffen", denn Strahlung und Korpuskel sind nur zwei verschiedene Erscheinungsformen der Materie, die sich ineinander umwandeln.

Die experimentellen Befunde bestätigen, daß jede Masse mit Energie verknüpft und jede Energie an Masse gebunden ist. — So besitzt auch ein magnetisches Feld oder eine elektromagnetische Strahlung Masse ebenso wie „die Masse eines Körpers ein Maß für dessen Energieinhalt" ist (Ruheenergie).
Bei der „Zerstrahlung" wird also Ruheenergie in Strahlungsenergie umgewandelt. Dem entspricht eine Umwandlung von Ruhemasse in die Äquivalenzmasse der Strahlungsenergie, wobei zwischen den einander zugeordneten Masse- und Energiewerten die Einsteinsche Gleichung gilt.
Die „Zerstrahlung" liefert zugleich eine Bestätigung dafür, daß auch Elementarteilchen nichts Unwandelbares und ewig Beständiges sind, sondern daß auch sie einer ständigen Veränderung unterliegen.

Die Energieversorgung in Gegenwart und Zukunft

Der Entwicklungsstand der Produktivkräfte eines Landes hängt in hohem Grade von der nach Menge und Qualität ausreichenden Versorgung mit Energie ab. In der vorkapitalistischen Gesellschaft wurde mechanische Arbeit fast nur durch die Muskelkraft von Menschen und Tieren verrichtet.

Die Energieversorgung in der Vergangenheit



123/2 Pferdebahn um 1850

123/3 Straßenbahn um 1870

Die Verwendung von Dampfmaschinen zur Erzeugung mechanischer Energie seit der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts führte zu einem Aufschwung der Produktivkräfte, der ersten industriellen Revolution.

Dieser Prozeß erstreckte sich über mehrere Jahrzehnte. Noch im Jahre 1850 wurden 95% der auf der Erde aufgewendeten mechanischen Arbeit durch die Muskelkraft von Menschen und Zugtieren verrichtet.

Von noch größerer Bedeutung für die Entwicklung der Produktivkräfte war die technische Nutzung der von FARADAY (1831) entdeckten elektromagnetischen Induktion durch WERNER v. SIEMENS (1866).

Der elektrische Strom wurde nun von einer physikalischen Erscheinung, die bisher nur im Laboratorium beobachtet und untersucht worden war, zu einem idealen Energieträger, der das gesamte industrielle und private Leben außerordentlich stark beeinflußte.

Aus der *Rohenergie* (Primärenergie), die als chemische Energie in den *Energieträgern* (Kohle, Holz, Erdöl, Erdgas) gespeichert ist, wird die *Gebrauchsenergie* Elektrizität gewonnen, die über weite Strecken mit geringen Verlusten transportiert und an beliebigen Stellen in verschiedene *Nutzenergieformen* (mechanische Energie, Wärme, Licht . . .) umgewandelt werden kann. Wegen der großen Vielseitigkeit ihres Einsatzes und wegen des günstigen Wirkungsgrades bei der Umformung in Nutzenergie ist die Elektrizität die wichtigste Form der Gebrauchsenergie.

Bei der Entwicklung der energetischen Basis einer modernen Volkswirtschaft kommt es vor allem darauf an, den ständig wachsenden Bedarf an Elektroenergie zu decken.

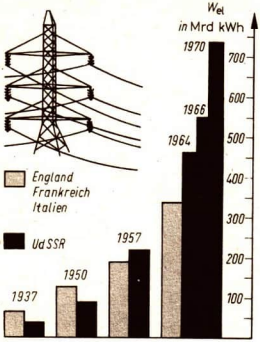
Entwicklung der Energiewirtschaft in der Sowjetunion

In einer sozialistischen Gesellschaftsordnung ist der ausreichende, planvolle und rationelle Einsatz von Energie in der Produktion und für die Befriedigung der unmittelbaren Energiebedürfnisse der Bevölkerung eine vordringliche ökonomische Aufgabe. LENIN erkannte von Anfang an, daß in der Sowjetunion diese Aufgabe nur durch die Elektrifizierung des ganzen Landes zu lösen war: Gleichzeitig mußten ein eigener Energiemaschinenbau und eine eigene leistungsfähige elektrotechnische Industrie errichtet werden.
Mit dem GOELRO-Plan zur umfassenden Elektrifizierung der sowjetischen Industrie, der von „Fachleuten" aus dem kapitalistischen Ausland als undurchführbar bezeichnet wurde, konnte diese Aufgabe bereits in der kurzen Zeit von 10 Jahren gelöst werden.
Auch nach der Erfüllung des GOELRO-Planes stieg die Erzeugung von Elektroenergie in der Sowjetunion entsprechend den Fünfjahres-Plänen der Volkswirtschaft steil an. Eine wichtige Kenngröße des technischen Fortschrittes ist die Elektroenergieerzeugung pro Kopf der Bevölkerung. Sie kennzeichnet den Stand der Elektrifizierung der Industrie und der Haushalte und bestimmt entscheidend die Arbeitsproduktivität und damit den Lebensstandard.
Die Prokopfproduktion an Elektroenergie in der Sowjetunion stieg von 12,8 kWh je Einwohner im Jahre 1913 auf

124/1 Entwicklung der Elektroenergieerzeugung und der industriellen Bruttoproduktion in der UdSSR von 1913 bis 1967 (1 TWh = 10^{12} Wh = 10^{9} kWh) (1920 bis 1930: Erfüllung des GOELRO-Planes)

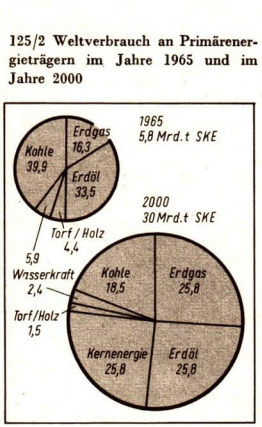
Jahr	Elektroenergieerzeugung TWh	Elektroenergieerzeugung % zu 1913	Bruttoproduktion der Industrie in % zu 1913
1913	2,04	100,0	100,0
1921	0,52	25,0	21,0
1923	1,15	56,2	39,5
1925	2,93	143,4	73,0
1927	4,20	206,0	111,0
1929	6,22	305,2	158,0
1930	8,37	410,4	193,0

Jahr	Elektroenergie-Erzeugung in TWh	Elektroenergie-Erzeugung Vielfaches der Produktion von 1913 (Produkt. 1913 ≙ 1)
1931	10,7	5,2
1935	26,3	12,9
1940	48,3	23,6
1946	48,6	23,8
1950	91,2	44,7
1955	170,2	83,4
1960	292,3	143
1965	506,7	249
1970	740,0	356
1975	1065	512 (Plan)



125/1 Die Sowjetunion lag 1970 in der Weltproduktion von Elektroenergie mit rund 740 · 10^9 kWh auf dem 2. Platz hinter den USA. Besonders in den letzten Jahren hat sich die Elektroenergieerzeugung in der UdSSR mit der Inbetriebnahme gigantischer Kraftwerke stürmisch entwickelt. Das zeigt besonders deutlich ein Vergleich mit anderen hochentwickelten Industriestaaten

125/2 Weltverbrauch an Primärenergieträgern im Jahre 1965 und im Jahre 2000



2200 kWh je Einwohner im Jahre 1967 und ist auf 3000 kWh je Einwohner im Jahre 1970 angewachsen.
Bereits 1935 überflügelte die Sowjetunion so hochentwickelte Länder wie England und Frankreich in der Elektroenergieproduktion (Bild 125/1).
Der erste Energie-Kernreaktor der Welt wurde am 27. Juni 1954 in der Sowjetunion in Betrieb genommen. Heute verfügt die UdSSR über die größten Wärme- und Wasserkraftwerke der Welt und besitzt reiche Erfahrungen im Bau und Betrieb von leistungsstarken Kernkraftwerken.

Die Entwicklung der Weltenergiewirtschaft

Eines der Hauptmerkmale der wissenschaftlich-technischen Revolution ist das unaufhörliche und ständig beschleunigte Wachstum der Produktion und des Einsatzes von Energie. Viele lebenswichtige Probleme der Zukunft sind mit der Sicherung der Energieversorgung, mit der rationellen Ausnutzung der Energiereserven und mit einer vorausschauenden Planung und Veränderung der Struktur der Primärenergieträger verbunden.

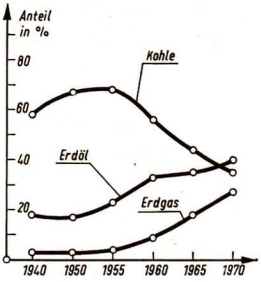
Die Entwicklung der Weltenergiewirtschaft in den vergangenen 150 Jahren wird durch folgende Angaben über die Gesamtleistung der Energieanlagen auf der ganzen Erde gekennzeichnet:
im Jahre 1800: 10 MW; im Jahre 1900: 10^5 MW;
im Jahre 1950: 10^7 MW; im Jahre 1968: 2,5 · 10^7 MW.

Entsprechend stark ist der Verbrauch an Primärenergieträgern in der Welt gestiegen. Es ist üblich, beim Vergleich der Primärenergieträger unter Zugrundelegung ihres Heizwertes die Massen auf Steinkohleneinheiten (SKE) umzurechnen. 10^6 t SKE entsprechen rund 8,14 TWh. Der Weltverbrauch an Primärenergie betrug im Jahre 1900 etwa 9,5 $\times 10^8$ t SKE und stieg bis 1965 auf 5,9 · 10^9 SKE an. Dabei nahm die jährliche Wachstumsrate beständig zu und erreichte in den letzten 8 Jahren etwa 6%. Da es sich bei den in der Vergangenheit und Gegenwart eingesetzten Primärenergieträgern fast ausschließlich um nicht erneuerbare Energiereserven (Brennstoffe) handelt, ist es verständlich, daß düstere Prophezeihungen über die baldige Erschöpfung aller Energiereserven gemacht wurden. Die Erfahrung hat aber gelehrt, daß gegenwärtig im Weltmaßstab die Entdeckung immer neuer Kohlelager, besonders aber die von großen Erdöl- und Erdgaslagern fast noch schneller voranschreitet als der Energieverbrauch. Deshalb ist für die Menschheit insgesamt die Reserve an nichterneuerbarer Energie noch für viele Jahre ausreichend.

Die Strukturänderung der Energieträger

Nicht nur die Menge, sondern auch der prozentuale Anteil der einzelnen Energieträger ändert sich beständig. Vor etwa 100 Jahren betrug der Anteil der Kohle an der Weltenergiebilanz etwa 25%, Holz und Torf lieferten noch 43% und die Verbrennung landwirtschaftlicher Abfälle etwa 16% des Weltenergiebedarfes. Im Jahre 1900 wurden etwa 50% der Energie aus Kohle, 30% aus Holz und Torf und etwa 2,4% durch Erdöl und Erdgas gedeckt.
Der Anteil von Erdöl und Erdgas als Energieträger stieg bis 1950 auf 31% und erreichte 1965 den Wert von über 50%. Seitdem nimmt er ständig zu, während die Bedeutung der Kohle langsam zurückgeht.

Die sich ändernde Struktur der Energieträger in der Sowjetunion zeigt Bild 126/1.



126/1

Die Perspektiven der Energiewirtschaft

In Zukunft werden auch Erdöl und Erdgas als Primärenergieträger für die Erzeugung von Elektroenergie mehr und mehr zurücktreten. Die wichtigste Primärenergie wird dann die Kernenergie sein.
Man nimmt an, daß im Jahre 2000 etwa 25% der Elektroenergie durch Kernreaktoren bereitgestellt wird. Inzwischen unternehmen die Wissenschaftler und Ingenieure alle Anstrengungen, um auch die riesigen, sich ständig *erneuernden* Energiequellen stärker zur Deckung des Energiebedarfs heranzuziehen. Dabei handelt es sich vor allem um die bisher nur zu einem kleinen Teil genutzte Energie der Ströme, des Windes, der Gezeiten, der Erdwärme und der unmittelbaren Sonnenstrahlung. Im kommenden Jahrhundert wird durch die technische Nutzung der thermonuklearen Energie aus Kernfusionsprozessen eine völlig neue Epoche in der Energiewirtschaft und auf dieser Basis eine noch umfassendere Umgestaltung der ökonomischen und gesellschaftlichen Verhältnisse einsetzen. Dann wird auch das durch Mißwirtschaft und Ausbeutung in den ehemals kolonialen und halbkolonialen Ländern entstandene Energiedefizit ausgeglichen.

Die Entwicklung der Energiewirtschaft in der DDR

Die Energiewirtschaft gehört neben der chemischen Industrie in der DDR zu den wichtigsten Bereichen unserer Volkswirtschaft. Ihre große Bedeutung ergibt sich aus folgenden Tatsachen:

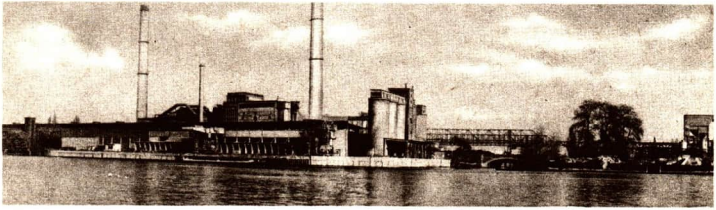
1. Die Energiewirtschaft beeinflußt die gesamte Wirtschaft, da jeder moderne Produktionsprozeß mit der Umformung und Übertragung von Energie verbunden ist.
2. Die Bereitstellung ausreichender Gebrauchsenergie erfordert einen sehr großen materiellen Aufwand. Die Energiewirtschaft beansprucht einen beträchtlichen Teil der für die Industrie aufzuwendenden Investitionsmittel und bindet sie für viele Jahre. Deshalb ist eine weit vorausschauende ökonomische Planung notwendig.

Die enge Zusammenarbeit mit der Sowjetunion ist die wichtigste Grundlage bei der Sicherung unseres künftigen Energiebedarfs. Es ist geplant, in den nächsten Jahren bis zum Aufbau leistungsfähiger Kernkraftwerke den steigenden Bedarf an Elektroenergie durch Fertigstellung und Erweiterung der in Bau befindlichen Wärmegroßkraftwerke (Boxberg, Thierbach) und durch Rekonstruktion der älteren Werke zu decken. Spätestens ab 1980 sollen dann zunehmend Kernspaltungsanlagen zur Deckung des Energiebedarfs eingesetzt werden. Die wenig effektive und sehr aufwendige Gewinnung fester Brennstoffe (Steinkohle und Braunkohle) und die kostspielige Veredlung der Rohbraunkohle wird dann mehr und mehr zurückgehen. Damit setzt sich auch in der Energiewirtschaft das ökonomische Prinzip immer stärker durch: Erreichung höchster Leistungen bei sparsamstem Einsatz der volkswirtschaftlichen Mittel.

Eine große Hilfe bei der Lösung der Aufgaben, die der Energiewirtschaft in der DDR gestellt werden, leistet auch das Verbundnetz der sozialistischen Staaten im Rahmen der RGW. Besonders zur Deckung des Spitzenbedarfs, aber auch beim Ausfall infolge von Havarien in einzelnen Kraftwerken stellt das Verbundnetz immer eine ausreichende Reserve bereit.

Wenn später das gesamte sowjetische Energienetz mit dem der übrigen sozialistischen Länder vereinigt sein wird, kann die wellenförmig über die verschiedenen Zeitzonen vom Stillen Ozean bis zur Elbe fortschreitende Energiebedarfsspitze für alle an das Verbundnetz angeschlossenen Länder gedeckt werden.

127/1 Großkraftwerk



Die Erhaltungssätze der Physik

Eine wesentliche Aufgabe der Naturwissenschaften ist es, die Fülle der Naturerscheinungen und Naturvorgänge durch wenige allgemeingültige und möglichst einfache Gesetze zu beschreiben. Je umfassender diese Gesetze sind, um so abstrakter wird ihre Aussage. „Die Abstraktion . . . spiegelt die Natur tiefer, getreuer und vollständiger wider . . .“ (LENIN)

Zu den bedeutungsvollsten und universellsten Gesetzen der Physik gehören die *Erhaltungssätze*, die im folgenden noch einmal zusammengestellt werden:

▶ 1. **Der Energieerhaltungssatz**: In einem *abgeschlossenen System*, in dem sich mechanische, thermische, elektrische, optische oder chemische Prozesse vollziehen, bleibt die am Anfang vorhandene Gesamtenergie erhalten. Sie kann sich nur durch Energiezufuhr von außen oder durch Energieabgabe nach außen ändern.

Der Energieerhaltungssatz ist mit der für unsere Erkenntnisgewinnung wichtigen Erfahrung verbunden, daß der Ablauf physikalischer Vorgänge unabhängig ist von dem Zeitpunkt, zu dem sie beobachtet und die sie beschreibenden Gesetze gewonnen wurden. Zum Beispiel waren die Gesetze der einfachen kraftumformenden Vorrichtungen im Altertum dieselben wie heute. („Homogenität der Zeit“).

Eine besonders wichtige Seite des Energieerhaltungssatzes liegt in der Aussage, daß sich trotz der *Erhaltung* der Gesamtenergie bei den genannten Prozessen die verschiedenen Formen der auftretenden Energien wechselseitig ineinander umwandeln können. ENGELS wies darauf hin, daß erst in der dialektischen Einheit von Erhaltung und Umwandlung die große Bedeutung des Satzes von der Erhaltung der Energie liegt. Der Energiebegriff selbst erhält aus dieser Einheit überhaupt seinen wesentlichen Inhalt.

▶ 2. **Der Impulserhaltungssatz**: In einem abgeschlossenen System bleibt die Summe aller Bewegungsgrößen konstant.

Es läßt sich zeigen, daß der Impulserhaltungssatz gleichwertig ist mit der Aussage, daß der Ablauf physikalischer Vorgänge unabhängig von dem Ort ist, an dem sie stattfinden. Das bedeutet, daß der durch unsere Erfahrung erfaßte Raum an allen Orten gleichartig ist („Homogenität des Raumes“). Bei einer *Parallelverschiebung* des zur Beschreibung bestimmter Vorgänge verwendeten Bezugssystems bleiben die physikalischen Gesetze unverändert.

▶ 3. **Der Drehimpulserhaltungssatz**: In einem abgeschlossenen System bleibt der Gesamtdrehimpuls (Drall) konstant.

Theoretische Betrachtungen führen zu der Erkenntnis, daß auch der Drehimpulserhaltungssatz eine Besonderheit des Raumes

widerspiegelt, nämlich die Tatsache, daß keine Richtung des Raumes ausgezeichnet ist (Isotropie des Raumes). Bei einer *Drehung* des Bezugssystems ändern sich die physikalischen Gesetze nicht.

4. Der Schwerpunkterhaltungssatz: Der Schwerpunkt eines Körpersystems, auf das keine äußeren Kräfte einwirken, bewegt sich wie ein kräftefreier Körper, also geradlinig und gleichförmig, unabhängig von den im System wirkenden *inneren* Kräften.

Wirken auf die einzelnen Körper des Systems äußere Kräfte ein, so bewegt sich der Schwerpunkt so, als sei die Gesamtmasse aller Körper in ihm vereinigt und als wäre er der Angriffspunkt aller äußeren Kräfte.

Der Schwerpunkterhaltungssatz läßt sich aus dem Impulserhaltungssatz ableiten.

5. Der Ladungserhaltungssatz: In einem abgeschlossenen System bleibt die Summe aller negativen und positiven Ladungen stets konstant. Es ist also unmöglich, in diesem System nur Ladungen *eines* Vorzeichens zu erzeugen.

Dieser Erfahrungssatz, der schon seit längerer Zeit bekannt ist, hat seine Gültigkeit auch im Bereich der Kernphysik und der Physik der Elementarteilchen bewahrt (z. B. bei radioaktiven Zerfallsprozessen, bei Kernumwandlungen, bei der Paarbildung und Paarzerstrahlung).

6. Der Masseerhaltungssatz: Bei physikalischen Vorgängen im Bereich der klassischen Physik und bei allen chemischen Prozessen bleibt die Gesamtmasse der in einem abgeschlossenen System enthaltenen Materie erhalten.
Dieser Satz hat vor allem im Bereich der Chemie eine sehr große Bedeutung und besitzt dort uneingeschränkte Gültigkeit.

Der Masseerhaltungssatz und der Energieerhaltungssatz sind durch die Einsteinsche Gleichung miteinander verbunden. Da auch Felder und Strahlung als Erscheinungsformen der Materie Masse besitzen, gilt der Masseerhaltungssatz im gesamten Bereich der klassischen Physik.

Alle Erhaltungssätze sind nur für abgeschlossene Systeme gültig, d. h. für solche Anordnungen von Körpern oder Feldern, die nicht in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung stehen. Es darf also kein Energieaustausch, keine Krafteinwirkung usw. über die Grenzen des betrachteten Systems erfolgen.
Da es praktisch nicht möglich ist, ein System von seiner Umgebung zu isolieren, stellt das abgeschlossene System eine Idealisierung oder ein physikalisches Modell der Realität dar. Die dabei vorgenommene Abstraktion hat sich aber als äußerst fruchtbar und erkenntnisfördernd erwiesen. Erst

mit ihrer Hilfe konnte die ungeheure Fülle der Erfahrungen erschlossen, systematisiert und durch einfache Gesetze quantitativ beschrieben werden.
Die in den genannten Sätzen auftretenden *Erhaltungsgrößen* haben eine besondere Bedeutung bei der Widerspiegelung der Realität und beim Erfassen ihrer allgemeinen und wesentlichen Eigenschaften.
Es gibt im Bereich unserer Erfahrungen weder im Mikrokosmos noch im Makrokosmos physikalische Erscheinungen oder Vorgänge, die im Widerspruch zu den Erhaltungssätzen stehen.

Der große erkenntnistheoretische Wert dieser Sätze liegt in folgenden Tatsachen:

1. Aus den Erhaltungssätzen lassen sich in einfacher Weise durch Deduktion spezielle Gesetze und Aussagen gewinnen. (Z. B. kann man aus dem Impuls- und dem Energieerhaltungssatz die Gesetze des elastischen und des unelastischen Stoßes herleiten, ohne im einzelnen die bei dem Stoß auftretenden Kräfte zu kennen und ohne rechnerisch alle Vorgänge zu verfolgen, die sich während des Stoßvorganges abspielen.)

2. Wegen der in unserem Erfahrungsbereich universellen Gültigkeit der Erhaltungssätze wird bei jeder neuen physikalischen Hypothese und bei jeder Modellvorstellung zunächst geprüft, ob sie im Widerspruch zu den Erhaltungssätzen steht.

3. Die Erhaltungssätze können aber auch zur Gewinnung völlig neuer Erkenntnisse führen. Sie dienen dann als „vortrefflicher Führer in gänzlich unbekannte und unerforschte Regionen." (PLANCK)

Neue Erkenntnisse über die Elementarteilchen führen zu weiteren Erhaltungsgrößen insbesondere bei verschiedenen Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen.

Auch hier zeigt sich die dialektische Einheit von Erhaltung und Umwandlung: Die Teilchen selbst sind nicht unveränderlich, sie können sich wechselseitig ineinander umwandeln. Wesentliche Größen bleiben aber bei diesen Umwandlungsprozessen erhalten. Demnach haben auch im Bereich der Mikrophysik Erhaltungssätze eine große Bedeutung.
Man muß annehmen, daß auch die Erhaltungssätze einen begrenzten Gültigkeitsbereich besitzen und daß sie nur in der uns aus der Erfahrung vertrauten Raum-Zeit-Realität gelten. Das menschliche Erkenntnisvermögen wird in Zukunft sicher auch über diesen Bereich hinaus weiter vordringen und zu immer umfassenderen Einsichten gelangen.

Als ein Beispiel für die zuletzt genannte Behauptung soll die Geschichte der Entdeckung des Neutrinos dienen: Es war seit langem bekannt, daß beim β-Zerfall die ausgeschleuderten Elektronen sehr unterschiedliche Reichweiten haben, obwohl bei gleichartigen Kernen stets die gleiche Energie frei werden muß. Einzelne Physiker nahmen zunächst an, daß bei diesen Kernprozessen das Energieprinzip nicht mehr gültig sei. PAULI hielt an der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes fest und stellte 1931 die Hypothese auf, daß zusammen mit den Elektronen sehr leichte Teilchen ausgestoßen werden, die gerade die den langsameren Elektronen fehlende Restenergie besitzen. Da auch der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung gültig bleiben sollte, mußten diese Teilchen elektrisch neutral sein. Das von PAULI auf der Grundlage der Sätze von der Erhaltung der Energie und der Erhaltung der Ladung hypothetisch eingeführte *Neutrino* konnte tatsächlich im Jahre 1955 experimentell aufgefunden werden. Damit war die Neutrinohypothese bestätigt. Der Energieerhaltungssatz hat hier tatsächlich zu einer neuen Erkenntnis geführt.

Regelung

In den letzten Dezembertagen des Jahres 1968 vollführte das erste einsatzfähige Überschall-Verkehrsflugzeug der Welt, die sowjetische Tu 144, seinen ersten Probeflug. Das neue Flugzeug war bei dieser Erprobung mit hunderten von Registriergeräten ausgestattet worden, damit in der Bodenleitstelle das Verhalten des Flugzeuges bei allen Flugständen kontrolliert werden konnte. Eine weitere Ausstattung mit Regelgeräten, die auch vom Boden aus beeinflußt werden können, gab den sowjetischen Luftfahrtwissenschaftlern und dem Piloten besondere Sicherheit bei dem komplizierten Erprobungsprogramm.

Solche Regelgeräte ermöglichen durch ständiges Erfassen der Flugparameter, Vergleichen mit den entsprechenden einzuhaltenden oder den kritischen Werten und durch sofortiges Einwirken bei Abweichungen eine schnellere Reaktion, als dies dem Menschen möglich ist. Darin liegt eine wesentliche Bedeutung der Regelung, die in diesem Kapitel behandelt wird.

Grundbegriffe der Regelung

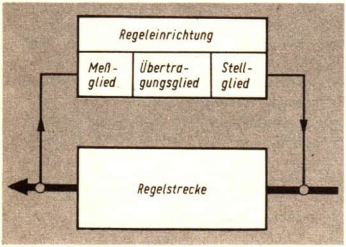
Der Fahrer eines Kraftfahrzeuges muß ständig die Fahrbahn prüfen, damit er die Geschwindigkeit seines Fahrzeuges entsprechend einstellen kann. Die Information, die ihm zum Beispiel ein Hindernis optisch signalisiert, wird durch den Menschen umgewandelt und weitergegeben an die Maschine. Das gesamte System Fahrbahn, Mensch, Maschine ist ein Regelsystem. Der beschriebene Vorgang ist eine Regelung.

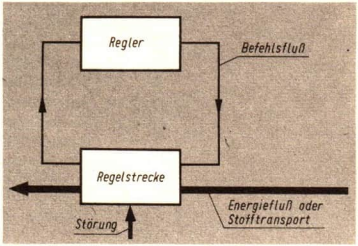
Prinzip einer Regelung

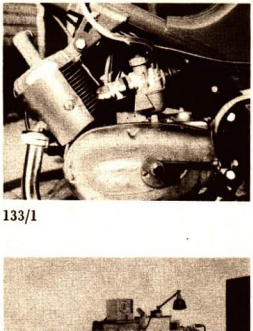
Überall in unserer Umwelt laufen Prozesse ab oder werden Zustände aufrechterhalten, die nur mit Hilfe einer Regelung möglich sind.
Das Regeln oder die Regelung ist ein technischer Vorgang in einem abgegrenzten System, bei dem der Betrag einer physikalischen Größe fortlaufend erfaßt, mit einem vorgegebenen Betrag dieser Größe verglichen und im Sinne einer Angleichung ständig durch Teile des Systems beeinflußt wird. Im Unterrichtsfach Einführung in die sozialistische Produktion (Kl. 9) wurde bereits die Regelung behandelt. Dabei wurden verschiedene Grundbegriffe der Regelanlagen (Tabelle 1, S. 133), erläutert.

132/2 Blockschaltplan und Wirkungsweg einer Regelung

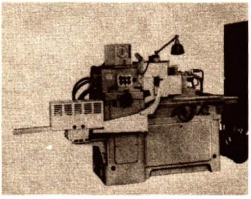
132/3 Energiefluß, Störung und Befehlsfluß bei einer Regelung







133/1



133/2

Die Regelung von Anlagen und Maschinen erfolgt im einzelnen sehr unterschiedlich, für alle aber gilt das gleiche allgemeine Grundprinzip.

Einen Prozeß regeln heißt, den gemessenen Betrag einer physikalischen Größe trotz verschiedenster Einflüsse dem vorgegebenen Betrag dieser physikalischen Größe ständig anzugleichen.

Damit wird das Wesentliche einer Regelung hervorgehoben, es ist das Beeinflussen einer physikalischen Größe.

Wichtige Tätigkeiten beim Regeln sind:

Messen, Vergleichen, Stellen.

Im Schwimmergehäuse eines Vergasers wird die physikalische Größe Masse des vorhandenen Treibstoffes entsprechend der Masse des abfließenden Treibstoffes (Stofftransport) geregelt.

In einem Schleifautomaten wird die physikalische Größe Werkstückdurchmesser durch Verändern des Werkzeugabstandes (Stofftransport) entsprechend dem Werkzeugverschleiß geregelt.

Tabelle 1

Grundbegriff	Erläuterung
Regeleinrichtung	zusammenfassende Benennung für die Bauglieder im Wirkungsweg, die zur Beeinflussung der Regelstrecke über das Stellglied dienen, bestehend aus Meßglied, Vergleichseinrichtung, Übertragungsglied, Stellglied
Regelstrecke	Teil der Regelanlage, in dem die zu regelnde Größe zu beeinflussen ist
Meßglied	Teil des Regelsystems, in dem die zu regelnde Größe gemessen wird
Übertragungsglieder	Teile der Regeleinrichtung, mit deren Hilfe Regelbefehle auf das Stellglied übertragen werden
Stellglied	greift in einen Stofftransport oder Energiefluß ein

■ In einer organischen Zelle müssen alle Lebensprozesse wie Stoffwechsel, Wachstum, Bewegung, Fortpflanzung und Reizreaktionen geregelt werden. Damit paßt sich dieser einfache Organismus seiner Umwelt an. Zum Beispiel wird der Stoffwechsel durch Anpassen der Menge der Stoffwechselprodukte an ein vorgegebenes Stoffwechselprogramm geregelt.
In solch einem primitiven Organismus sind nur wenige Regelkreise vorhanden.

■ Der Mensch als höchstentwickeltes Lebewesen besitzt eine große Anzahl von Regelkreisen. Im menschlichen Organismus wird zum Beispiel die physikalische Größe Körpertemperatur durch Abgabe und Aufnahme von Wärmeenergie (Energietransport) ständig auf 37 °C gehalten.

Im Zusammenhang mit den zu regelnden physikalischen Größen sind bereits verschiedene Grundbegriffe in Klasse 9 erläutert worden (Tabelle 2).

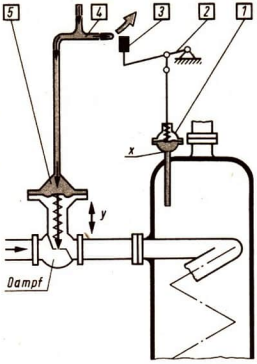
Tabelle 2

Grundbegriff	Erläuterung
Regelgröße	die konstant bleibende oder nach einem bestimmten Programm sich verändernde Größe
Sollwert s	einzuhaltender Betrag der Regelgröße
Istwert x	Betrag der Regelgröße zum Zeitpunkt der Messung
Störgröße z	wirkt auf die Regelgröße in unbekannter Weise ein

Voraussetzung für die Durchführbarkeit einer Regelung ist, daß der Sollwert der zu regelnden Größe bekannt sein muß und die physikalische Größe meßtechnisch erfaßbar ist. Dieser Sollwert ist die Vergleichsgrundlage für den zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Regelanlage vorhandenen Istwert.

Der Istwert wird mit dem Meßglied gemessen und mit dem Sollwert verglichen. Bei einer Abweichung des Istwerts vom Sollwert wird das Stellglied betätigt, bis beide Werte der zu regelnden physikalischen Größe übereinstimmen.

▶ **Bei der Regelung wird ein Energiefluß oder Stofftransport so beeinflußt, daß der Istwert mit dem Sollwert der Regelgröße möglichst immer übereinstimmt.**



135/1 Pneumatische Temperatur-Regelung in einer Heizanlage
1 — Meßglied, Flüssigkeitsfederthermometer
2 — Übertragungsglied, Hebelgestänge
3 — Verstärker, Prallplatte
4 — Übertragungsglied, Druckluftleitung
5 — Stellglied, Ventil

Wirkungsweise einer Regelung

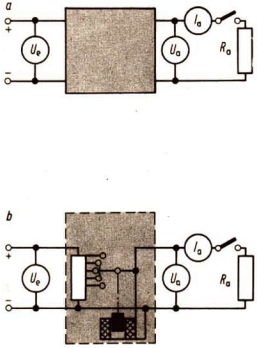
Bei der in Bild 135/1 dargestellten Regelanlage handelt es sich um eine Anlage zum Beeinflussen eines Energie- und Stofftransportes.
Bei automatischen Anlagen muß zum Betätigen eines Stellgliedes meist eine große Stellkraft zur Verfügung stehen. Beim Messen werden jedoch meist nur sehr kleine Kräfte frei. Das in Bild 135/1 durch das Meßglied (1) Flüssigkeitsfederthermometer erhaltene Ausgangssignal hat zu wenig Energie, um das Stellglied (5) Ventil zu betätigen. Über einen Verstärker, Druckluftsystem (4) und Prallplatte (3), wird das Temperatursignal verstärkt und das Ventil betätigt.
Der Meßwert dieser Temperatur wird durch eine mechanische Einrichtung (2) so übertragen, daß die Prallplatte (3) mehr oder weniger den Austritt der Druckluft steuert. Bei geöffnetem Austritt sinkt der Druck in der Leitung so stark, daß das Ventil (5) als Stellglied geöffnet wird und der Heizdampf den Heizkessel durchströmen kann (Bild 135/1).

Bezeichnen Sie in Bild 135/1 Regler und Regelstrecke! ●

Im Beispiel von 135/1 ist die Temperatur der Flüssigkeit in der Heizanlage die *Meßgröße*. Über einen Regler wird diese Meßgröße in die *Stellgröße* Luftdruck umgewandelt.

Beschreiben Sie die für das Regeln typischen Tätigkeiten am Beispiel nach Bild 135/1! ●

135/2 Spannungsregelung

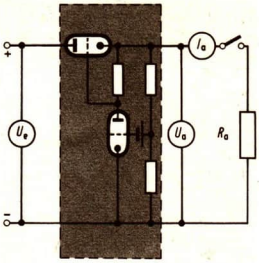


Elektronische Spannungsregelung

Für viele, insbesondere elektronische Anlagen ist eine konstante Spannung notwendig. Da aber die Netzspannung und die Belastung unterschiedlich sind, muß durch eine Anlage gewährleistet werden, daß bei unterschiedlichem Lastwiderstand R_a oder unterschiedlichen Eingangsspannungen U_e immer eine nahezu konstante Ausgangsspannung U_a anliegt (Bild 135/2a). Eine solche Anlage stellt eine Spannungsregelung dar.
Zwei Anlagen, die den geforderten Bedingungen genügen, sind in Bild 135/2b und 136/1 dargestellt. Es handelt sich um eine elektromagnetische und eine elektronische Spannungsregelung.

Welche technischen und wirtschaftlichen Nachteile bringt der Regler nach Bild 135/2b? ●

Im vorgegebenen Fall soll eine elektronische Regelung erfolgen. Dementsprechend ist es notwendig, mit Hilfe der physikalischen Eigenschaften elektronischer Schaltelemente, wie z. B. Diode und Triode, die Meßgröße U_a in eine geeignete Stellgröße U_y umzuwandeln (Bild 136/1).



136/1 Spannungsregelung

Erkennen der Wirkungsweise einer Regelanlage. Wenn man die Wirkungsweise einer Regelanlage erkennen will, muß man eine Einwirkung auf die Anlage in Form einer Veränderung des Stoff- oder Energietransportes untersuchen und die Fortleitung dieser Einwirkung durch die Anlage hindurch beschreiben oder berechnen. Man bezeichnet dies als das Aufstellen einer Wirkungskette.

Wirkungskette bei Spannungserhöhung. Um die Wirkungsweise zu untersuchen, nimmt man an, daß am Eingang der Regelanlage (Bild 137/1) der Betrag der Eingangsgröße U_e erhöht eingegeben wird.

Dies bewirkt zwischen (3) und (5) eine erhöhte Spannung U_a, da die erhöhte Spannung direkt zwischen (3) und (5) anliegt. Die Spannung am Widerstand R_1 zwischen (3) und (4) und am Widerstand R_2 zwischen (4) und (5) erhöht sich dadurch (Spannung im unverzweigten Stromkreis $U_g = \Sigma U_i$). Das bedeutet, daß am Gitter der Röhre 1 eine schwächere negative Gitterspannung anliegt, weil sich diese aus der Differenz der Spannungen am Widerstand R_2 und der Spannung U_b der Batterie zusammensetzt. Beide Bauelemente sind so geschaltet, daß die Differenz der Spannungen am Gitter wirksam wird. Die verringerte negative Gitterspannung bewirkt einen größeren Anodenstrom durch die Röhre 1 (Wirkungsweise einer Triode). Dieser hat eine größere Spannung ($I \cdot R$) am Widerstand R_3 zur Folge. Die Gitterspannung der Röhre 2 ist gleich dieser Spannung. Das bedeutet, der Anodenstrom durch die Röhre 2 wird verringert, oder anders ausgedrückt, der Gleichstromwiderstand der Röhre 2 wird größer. Betrachtet man die Reihenschaltung Eingang—Röhre 2—Lastwiderstand R_a (Bild 137/2), so erkennt man, daß die Wirkungsweise so eingestellt werden kann, daß der erhöhte Spannungsabfall der Röhre 2 der Erhöhung der Eingangsspannung entspricht. Damit ist der Kreis der Wirkungen geschlossen.

▶ **Als Kennzeichen der Regelung ergibt sich eine geschlossene Wirkungskette.**

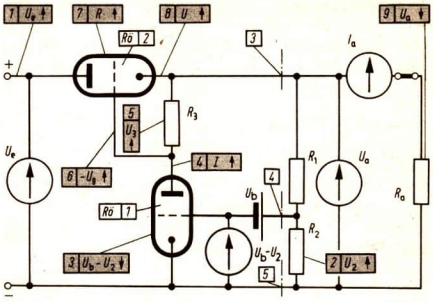
● *Stellen Sie die Wirkungskette für die elektronische Spannungsregelung für den Fall auf, daß am Eingang eine kleinere Spannung angelegt wird!*

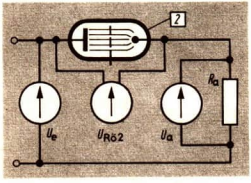
137/1 Schaltbild einer elektronischen Gleichspannungskonstanthaltung mit Eintragungen zur Wirkungskette

Schritt

physikalische Größe

vergrößert sich
(↓ verringert sich)





137/2 Teilschaltung der Gleichspannungskonstanthaltung
Stromkreis mit Triode (2) und Widerstand R_a

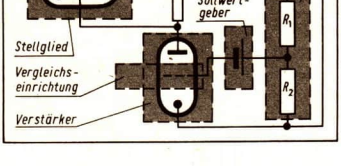
Als weitere Aufgabe bei der Analyse der Regelanlage ist festzustellen, ob durch einzelne Bausteine die charakteristischen Tätigkeiten — Messen, Vergleichen, Stellen — ausgeführt werden. Die Widerstandskombination R_1, R_2 bildet das Meßglied.

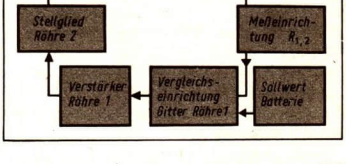
Der Vergleich des gemessenen Istwertes mit dem durch die Batterie gegebenen Sollwert erfolgt am Gitter der Röhre 1. Ein Eingriff in den Energiefluß erfolgt durch die Röhre 2. Somit sind auch die eine Regelung charakterisierenden Tätigkeiten vorhanden (Bild 137/3).

Die Blockdarstellung faßt die vorangegangenen Erörterungen in einer allgemeinen Form zusammen (Bild 137/4). In Bild 137/3 sind die Beziehungen zwischen der Blockdarstellung und der Schaltung aufgezeigt. Verfolgt man den Informationsfluß dieser Gleichspannungskonstanthaltung, so erkennt man, daß die Informationsübertragung durch verschiedene Signale erfolgt. Die Signale werden dabei realisiert durch die physikalischen Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand. So werden zum Beispiel die Regelgröße, die Meßgröße, die Stellgröße und die Störgröße durch unterschiedliche Spannungen dargestellt.

137/3 Schaltung der elektronischen Gleichspannungskonstanthaltung (links)

137/4 Blockdarstellung der elektronischen Gleichspannungskonstanthaltung (rechts)





Eigenschaften von Regelanlagen

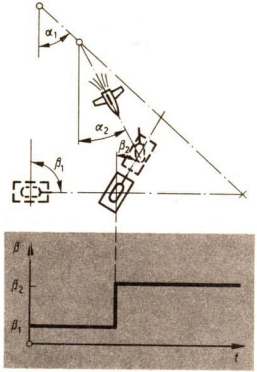
Panzerabwehr-Lenkraketen werden von Lenkschützen bedient.
Die mit einer Geschwindigkeit von etwa 100 m · s^{-1} fliegende Rakete muß während des Fluges mit geringstmöglicher Verzögerung bei jeder Ortsveränderung des Zieles aufs Neue in das Ziel gesteuert werden. Der Lenkschütze übt hierbei die Funktion eines reaktionsschnellen Reglers aus.

Zeitverhalten einer Regelanlage

Bisher wurde das Prinzip einer Regelung untersucht. Ziel der Betrachtungen war, die Funktionsfähigkeit einer Regelanlage zu erkennen. Wie das Beispiel Lenkrakete zeigt, ist aber für die Einsetzbarkeit einer Regelanlage sehr wichtig, in welcher Zeit und wie ein Regler auf Störungen durch Angleichen des Istwertes an den Sollwert reagiert.

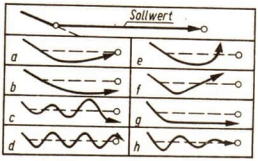
Die Sprungfunktion. Die Einsatzmöglichkeit eines Reglers ist von seinem Verhalten gegenüber einer Störung z der zu regelnden physikalischen Größe abhängig. Bei einer Lenkrakete ist zum Beispiel eine Kursänderung notwendig, wenn vom Lenkschützen eine Ortsveränderung des Zieles wahrgenommen worden ist.
Zeichnet man die Störung in ein Richtungs-Zeit-Diagramm ein, dann erhält man eine Kurve, die die sprunghafte Änderung des Eingangssignals kenntlich macht, man bezeichnet sie als **Sprungfunktion** (Bild 138/2).

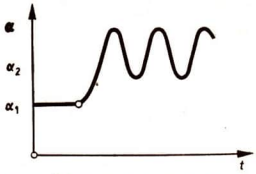
Die Übergangsfunktion. Betrachtet man den Richtungswechsel als Störung im System Lenkrakete-Panzer als gegeben entsprechend der Sprungfunktion, dann kann man die notwendige Kursänderung erkennen. Der Regler „Lenkschütze" kann aber verschieden reagieren. Daraus resultieren sehr unterschiedliche Kursänderungen (Bild 138/3) und Treffergebnisse entsprechend dem Übergang der Lenkrakete auf einen neuen Kurs.
Zeichnet man den Übergang der Lenkrakete auf einen neuen Kurs in Abhängigkeit von der Zeit auf, so erhält man ein



138/2 Sprungfunktion

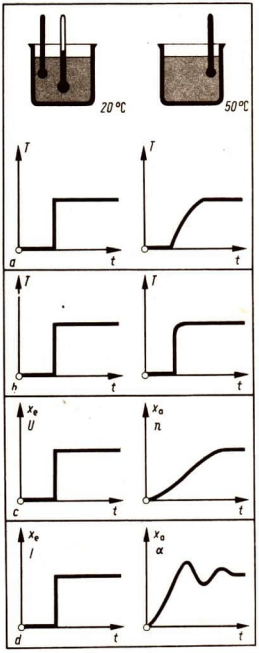
138/3 Mögliche Kursänderung der Lenkrakete





139/1 Übergangsfunktion des Regelsystems Panzer-Lenkrakete-Lenkschütze für die Kursänderung nach Beispiel 138/3 d

139/2 a Zeitliches Verhalten (Sprung- und Übergangsfunktion) von Eingangs- und Ausgangssignal bei einem Thermometer



ähnliches Diagramm wie in Bild 138/2. Das Diagramm Bild 139/1 kennzeichnet das Übergangsverhalten des Regelsystems entsprechend einer eingegebenen Sprungfunktion, es wird dementsprechend als **Übergangsfunktion** bezeichnet.

Schätzen Sie die Trefferwahrscheinlichkeit bei den verschiedenen Übergangsfunktionen (Bild 138/3) ab!

Um z. B. die Übergangsfunktion eines Temperaturmeßgerätes, das in einem Regler verwendet werden soll, zu ermitteln, kann man folgenden Versuch durchführen (Bild 139/2b):

18

Ein Thermometer wird zunächst in Wasser mit der Temperatur $T_1 = 293$ °K gebracht. Nachdem das Thermometer diese Ausgangstemperatur angenommen hat, wird es in ein Gefäß mit Wasser der Temperatur $T_2 = 323$ °K gebracht. Die Angaben auf dem Thermometer werden in bestimmten Zeitintervallen abgelesen und in einer Tabelle festgehalten.

Dieser Versuch wird durchgeführt mit einem
Gasthermometer,
Flüssigkeitsthermometer,
Thermoelement.

Stellen Sie für die drei Meßgeräte Tabellen auf und tragen Sie die Meßwerte in eine grafische Darstellung ein.

Nimmt man statt des Flüssigkeitsthermometers ein Thermoelement ohne Ummantelung, so erhält man als Übergangsfunktion eine Kurve nach Bild 139/2b. Man erkennt, daß beim Thermoelement kaum eine Verzögerung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal auftritt, während diese Verzögerung beim Flüssigkeitsthermometer schon recht deutlich ist.

Die Übergangsfunktion von Geräten, die einer noch größeren Verzögerung unterliegen, sind in Bild 139/2c, d dargestellt.

Im Beispiel des Drehspulmeßgerätes tritt zur Verzögerung infolge der Trägheit der drehenden Teile noch ein *Schwingungsverhalten* um den Endwert des Ausgangssignals hinzu. Als Schwingungsverhalten bezeichnet man einen Vorgang, bei dem sich eine physikalische Größe so ändert, daß dabei ein Mittelwert mehrmals hintereinander über- und unterschritten wird.

Beschreiben Sie die Sprungfunktion und die Übergangsfunktion für ein Ihnen bekanntes Regelsystem!

139/2 b Zeitliches Verhalten von Eingangs- und Ausgangssignal beim Thermoelement bei sprunghafter Veränderung des Eingangssignals

139/2 c, d Zeitliches Verhalten von Eingangs- und Ausgangssignal beim Gleichstromnebenschlußmotor und beim Drehspulmeßwerk bei sprunghafter Änderung des Eingangssignals

Formen der Regelung

Zweckmäßige Formen der Regelung erkennt man an der Übergangsfunktion des Reglers. Im Beispiel nach Bild 138/3 kann man voraussetzen, daß die Abweichung vom Sollwert nur klein sein darf, weil das Ziel der Lenkrakete klein ist. Außerdem muß das Einregeln sehr schnell erfolgen, weil die Flugdauer der Lenkrakete vom Start bis Ziel klein ist.

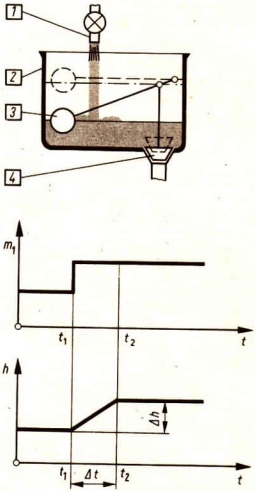
Beispiel 138/3 a erfordert eine Rechenanlage. Beispiel 138/3 b, c, d: Trefferwahrscheinlichkeit ist sehr gering, im Beispiel 138/3 e, f ist sie Null.

Die Beispiele nach Bild 138/3 g, h stellen zwei Sonderfälle dar, die für die Regelung von technischen Anlagen besondere Bedeutung haben.

Proportionalregler. Am Beispiel einer Wasserstandsregelung kann der Fall nach Bild 138/3 g untersucht werden.

19

▼ Eine Wasserstandregelanlage (Bild 140/1) besteht aus dem Zufluß (1) mit dem maximal möglichen Zuflußvolumen der Masse m_1, einem Behälter (2) mit einem Schwimmer (3), der ein Abflußventil (4) bedient.
Nachdem der Zufluß geöffnet wurde, strömt vom Zeitpunkt t_1 an Wasser mit der Masse m_1 in den Behälter. Der Schwimmer öffnet auf Grund der steigenden Flüssigkeitshöhe (Regelgröße h) das Ventil langsam, bis zum Zeitpunkt t_2 die Masse m_2 des abfließenden Wassers gleich ist der Masse m_1. Die Regelgröße h hat dann das in Bild 140/1 gezeigte zeitliche Verhalten.

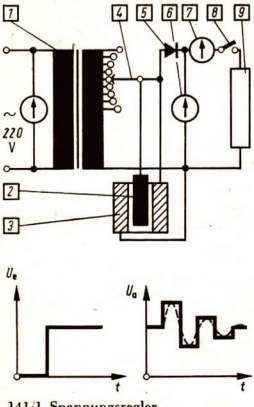


140/1 Flüssigkeitsstandregelung

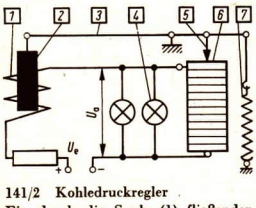
Betrachtet man die besprochene Wasserstandsregelung, so erkennt man, daß diese Einrichtung ein proportionales Verhalten zeigt. Einer Veränderung der Wasserstandshöhe h infolge einer Störung folgt über den Schwimmer das Ventil verzögerungsfrei.
Einer Änderung des Istwertes der Regelgröße h folgt eine proportionale Änderung der Ventilöffnung A. Derartige Regler nennt man *Proportional-* oder P-Regler.
P-Regler sind Regler, bei denen ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Regelgrößendifferenz Δh und der Änderung ΔA der Stellgröße besteht.

Bei diesem P-Regler ist ein verstärkter Abfluß des Wassers nur durch einen höheren Stand des Schwimmers möglich. Es muß also zu einer Abweichung vom Sollwert kommen. Ein Nachteil der Proportionalregler besteht darin, daß beim Regeln eine Abweichung des Istwertes vom Sollwert (z. B. Füllstandshöhe Δh) eintritt.

▷ **Proportionalregler werden eingesetzt, wenn für den Istwert der zu regelnden physikalischen Größe eine Abweichung zulässig ist.**



141/1 Spannungsregler
1 — Regeltransformator
2 — Reglerkern
3 — Reglerspule
4 — Reglerschalter
5 — Gleichrichter
6 — Spannungsmesser für U_a
7 — Strommesser für I_a
8 — Schalter
9 — Gerätewiderstand



141/2 Kohledruckregler

Ein durch die Spule (1) fließender Strom $I_e = f(U_e)$ beeinflußt den Spulenkern (2). Über einen Hebel (3) und eine Druckstange (5) wird durch Druckveränderung auf die Kohleplatten (6) der Übergangswiderstand und damit die Stromstärke I_a für die Lampen (4) verändert.

Die Rückstellfeder (7) sorgt für einen bestimmten einstellbaren Druck auf (6)

Integralregler. Am Beispiel der Spannungskonstanthaltung mit Regeltransformator (Bild 141/1) kann der Fall nach Bild 138/3h beschrieben werden.

Die Spule (3) ist als elektromagnetischer Antrieb an einen stufenweise schaltbaren Transformator (1) angeschlossen. Nach dem Einschalten einer Eingangsspannung $U_e = 220$ V liegen an den Schaltkontakten Spannungen von 180 V, 190 V, 200 V, 210 V, 220 V (Mittelstellung), 230 V, 240 V, 250 V, 260 V. Steigt nun die Spannung U_e plötzlich auf 242 V, so liegen an den Kontakten z. B. Spannungen von etwa 198 V, 209 V, 220 V, 231 V, 242 V, 253 V, 264 V, 275 V und 286 V.

Durch die höhere Spannung $U_a = 242$ V (Mittelstellung) wird der Kern (2) weiter in die Spule (3) hineingezogen und der Schaltkontakt (4) in die Schaltstellung 198 V gebracht. Der Kern geht daraufhin zurück und schaltet den Kontakt $U_a = 231$ V. Daraufhin wird der Kern abermals in die Spule gezogen, aber mit verminderter Kraft, so daß der Kontakt mit $U_a = 209$ V geschaltet wird. Daraufhin erfolgt nochmaliges Schalten auf $U_a = 220$ V, und damit ist der Regler zum Stillstand gekommen.

Ein solcher Regler verändert in Abhängigkeit von der Zeit nicht wie beim Proportionalregler die Regelgröße, sondern die Regelgrößendifferenz, das heißt die Abweichung der Regelgröße nimmt nicht proportional der Zeit ab.

Solch ein Verhalten, bei dem eine Veränderung einer Regelgrößendifferenz in Abhängigkeit von einer Zeitdifferenz auftritt, wird durch ein Zeitintegral der Regelabweichung ausgedrückt. Regler dieser Art bezeichnet man als *Integralregler* oder I-Regler.

Der Vorteil der Integralregler besteht darin, daß der Istwert genau auf den Sollwert eingestellt wird. Die Regelgröße pendelt dabei meist mehrmals um den Sollwert. Beim Integralregler tritt keine Regelabweichung auf.

Untersuchen Sie das Verhalten der Regelung einer Spannungskonstanthaltung mit Kohledruckregler (Bild 141/2)!

Im Gegensatz zum Proportionalregler würde bei einer Wasserstandsregelung mit I-Regler der Abstrom größer eingestellt werden als der augenblickliche Zustrom, damit die bei Beginn des Regelprozesses eingetretene Wasserstandsvergrößerung noch während des Regelprozesses ausgeglichen wird.

Integralregler werden eingesetzt, wenn für den Istwert der zu regelnden Größe eine Abweichung unzulässig ist.

Beschreiben Sie, wie sich bei der Spannungskonstanthaltung (Bild 137/1) U_a zu U_e verhält und wie sich U_a verändert!

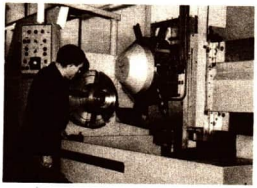
Regelungseinrichtungen und Automatisierung in Industrie und Landwirtschaft

Regelungseinrichtungen der verschiedenen Arten sind wichtige Voraussetzungen zur Realisierung der Teil- und Komplexautomatisierung in der Industrie und der Landwirtschaft. Vielfältige naturwissenschaftliche und technische Kenntnisse und Fähigkeiten sind notwendig, um alle aufkommenden Probleme zu bewältigen. Die Ausbildung von Facharbeitern, Ingenieuren und Diplom-Ingenieuren für Betriebsmeß-, Steuer- und Regeltechnik zeigen die Notwendigkeit einer besonderen Qualifizierung auf diesem Gebiet. Doch nicht nur diese Spezialkader werden die Automatisierung in den Zweigen der Volkswirtschaft vorantreiben. Jeder Werktätige, ganz gleich an welchem Platz er seinen Beitrag zum Aufbau des Sozialismus leistet, wird mit dieser Technik in Berührung kommen.

Die Steigerung der Arbeitsproduktivität, Rationalisierung und Erhöhung der Effektivität der Produktionstätigkeit sind Maßnahmen, die dazu beitragen, die vom VIII. Parteitag der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands gestellte Hauptaufgabe der Erhöhung des materiellen und kulturellen Lebensniveaus des Volkes auf der Grundlage eines hohen Entwicklungstempos der sozialistischen Produktion zu lösen.

Exponate der Messe der Meister von morgen und vielfältige Initiativen in der Neuererbewegung sind Ausdruck dieses Bestrebens. Dabei werden Kenntnisse über Regelungen angewandt. Der Einsatz teilautomatisierter und automatisierter Anlagen rundet dieses Bild ab. Deshalb ist es wichtig, daß möglichst viele Werktätige mit dem Wesen von Regelanlagen in seiner Abstraktion und den zugehörigen naturwissenschaftlichen Grundlagen vertraut gemacht werden und in die Lage versetzt werden, prinzipielle Auswirkungen vorauszusehen.

Im Rahmen des Wettbewerbes zum 20. Jahrestag der Deutschen Demokratischen Republik wurden z. B. in knapp 18 Monaten 87 neue Automatisierungsobjekte in volkseigenen Betrieben und Kombinaten in Betrieb genommen. 142/1



In all diesen Fällen wurde die Automatisierung so organisiert, daß sie im Prozeß schöpferischer Arbeit der Menschen entsteht und gleichzeitig dazu beiträgt, neue Bedingungen für die schöpferische Arbeit zu schaffen.

Bei der Entwicklung und Realisierung neuer Automatisierungsvorhaben spielt die Zusammenarbeit innerhalb der sozialistischen Staatengemeinschaft im Rahmen der sozialistischen ökonomischen Integration, insbesondere mit der Sowjetunion, eine wesentliche Rolle.

Einige Automatisierungsobjekte zum 20. Jahrestag der DDR:

die automatisierte Großrundstrickerei im Textilkombinat Cottbus, die zu 75% automatisiert ist (Bild 143/1);

das neue Knotenamt des Leipziger Fernsprechamtes mit Transitfunktion. Damit wurde der Fernsprechverkehr des Bezirkes Leipzig automatisiert;

die Filmbegießerei VII der VEB Filmfabrik Wolfen, die die automatisierte Herstellung der ORWO-Color-Filme unter Einsatz eines Prozeßrechners ermöglicht;

der teilautomatisierte Produktionsbereich zur Fertigung von Waschgeräte- und Kleinmotoren des VEB Elektromotorenwerkes Grünhain;

der teilautomatisierte DDR-Frachtschifftyp XD, der für die Besatzung wesentliche Erleichterungen der Arbeit an Bord schafft und der eine maximale Sicherung des Schiffsbetriebes gewährleistet;

die weitgehend automatisierte Milchfabrik der Kooperation Dedelow, die von einem Elektronenrechner gesteuert wird;

der Betriebsteil für alkoholfreie Getränke des Berliner Getränkekombinates in Berlin-Weißensee, der eine Steigerung der Arbeitsproduktivität auf über 300% ermöglicht;

der hochautomatisierte Betriebsteil des Fischkombinates Rostock, der eine Jahresproduktion von 22400 t Fischwaren mit 195 Werktätigen erreichen wird.

So stehen in der DDR programmgesteuerte Drehmaschinentypen (Bild 142/1), elektronische Rechner und Datenfernübertragungsanlagen zur Verfügung. Die abgebildete programmgesteuerte Drehmaschine mit automatischem Werkzeugwechsel und automatischer Einstellung der Schnittgeschwindigkeit hat eine 4- bis 5fach größere Leistung als die herkömmlichen, schon hochproduktiven Universaldrehmaschinen.

Doch nicht nur die Frage der Erhöhung der Produktion durch den Einsatz teilautomatisierter oder automatisierter Anlagen ist wichtig, sondern ein weiteres wichtiges Anliegen ist die Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen in unserem sozialistischen Staat. So können durch den Einsatz von Regelanlagen Menschen bei gesundheitsgefährdenden Arbeiten und bei monotonen Arbeiten durch Maschinen ersetzt werden. Der Mensch wird dadurch zum echten Beherrscher der Technik, indem er von umfangreicher körperlicher Arbeit entlastet wird und weitgehend nur noch die Entscheidungsaufgaben im Arbeitsprozeß übernimmt.

Dies wird besonders in der Energiewirtschaft und in der chemischen Industrie notwendig. Mit dem Einsatz von Kernkraftwerken in der Energieproduktion gewinnt die Automatisierung ebenso wie in der chemischen Industrie, in der eine Erhöhung der Betriebsmeß-, Steuer- und Regeltechnik um das Vierfache geplant ist, als Mittel der Arbeitserleichterung und der Minderung gesundheitsgefährdender Arbeiten an Bedeutung.

Aus den genannten wenigen Beispielen wird die große Bedeutung der Automatisierung für alle Bereiche unserer Gesellschaft deutlich. Deshalb müssen die naturwissenschaftlichen Grundlagen und die gesellschaftlichen Auswirkungen dieser Technik jedem Werktätigen bewußt sein.

143/1

Aufgaben

Fragen, Aufträge, Versuche

Mechanik

1. Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit!
2. Berechnen Sie die fehlenden Werte!

Winkelgeschwindigkeit ω	$1\ s^{-1}$		
Umlaufzeit T			0,02 s
Umlaufzahl n		$3800\ min^{-1}$	

3. Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation und die Bahngeschwindigkeit eines Punktes der Erdoberfläche
   3.1. am Äquator ($r = 6378$ km),
   3.2. in 52° nördlicher Breite!
   Rotationsdauer der Erde = 23 h 56 min.
4. Erörtern Sie die Unterschiede zwischen dem freien Fall, dem horizontalen Wurf und der gleichförmigen Kreisbewegung!
   Welche Beschleunigungen treten bei diesen Bewegungen auf!
5. Beim Hammerwerfen wird der Wurfkörper, der eine Masse von 7,25 kg hat, vor dem Loslassen in 1 Sekunde etwa 1,5mal herumgeschwungen. Mit welcher Kraft muß der Sportler das Gerät festhalten, wenn ein Bewegungsradius der Kugel von 1,7 m angenommen wird?
6. Erläutern Sie die verschiedenen Bezugssysteme bei der Drehbewegung, ebenso den Unterschied zwischen der Radialkraft und der Fliehkraft!
7. Wie groß sind Bahngeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und Umlaufzeit eines Körpers, der bei gleichförmiger Bewegung in horizontaler Ebene auf einem Kreis von 1 m Radius eine Fliehkraft erfährt, die seiner Gewichtskraft gleich ist? Welchen Winkel schließt die Resultierende der Kräfte mit der Vertikalen ein, wie groß ist ihr Betrag?
8. Leiten Sie anhand des Bildes 15/4 die Gleichung für den Neigungswinkel des Bahnprofils ab (Radius und Bahngeschwindigkeit seien gegeben)!
9. Ein Körper wird an einem Faden von 40 cm Länge um eine vertikale Achse herumgeschwungen. Welchen Winkel schließt der Faden mit der Achse ein
   9.1. bei einer Umlaufzahl $n = 2\ s^{-1}$,
   9.2. bei einer Umlaufzeit $T = 0{,}7$ s?
   Überprüfen Sie die Ergebnisse durch Versuch!
10. Um welchen Betrag muß die äußere Schiene einer gekrümmten Eisenbahnstrecke (Spurweite 1435 mm) mit einem Radius von 1000 m überhöht werden, wenn die Kurve für $80\ km \cdot h^{-1}$ ausgebaut sein soll?
11. Um welchen Winkel muß sich ein Motorradfahrer, der mit einer Geschwindigkeit von $25\ km \cdot h^{-1}$ durch eine Kurve von 20 m Radius fährt, nach innen neigen, damit die Resultierende von Gewichts- und Fliehkraft in die Ebene des Rades fällt? Fertigen Sie eine Skizze dazu an!
12. Welche Drehzahl muß ein Umlaufgerät (Zentrifuge) zum Training eines Kosmonauten erreichen, wenn der Dreharm eine Länge von 6 m hat und in der Kabine eine Gesamtbeschleunigung hervorgerufen werden soll, die fünfmal so groß ist wie die Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche?
13. Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit und Umlaufzeit eines Körpers beim Flug mit der ersten kosmischen Geschwindigkeit um die Erde!
14. Ein Elektromotor erzeugt ein Drehmoment von 16,5 Nm. Wie groß ist die Kraft (gemessen in kp), die am Umfang einer Riemenscheibe von 180 mm Durchmesser angreift?
15. Einem Motor, der ein Drehmoment von 3,8 kpm erzeugt, ist ein Getriebe vorgelagert, das die Drehzahl des Motors auf den achten Teil verringert. Wie groß ist das Drehmoment, das man mit Motor und Getriebe erhält? (Von Reibungsverlusten sei abgesehen.)
16. Skizzieren Sie folgende volum- und massegleichen Körper ($\varrho = 7{,}8\ g \cdot cm^{-3}$) und vergleichen Sie deren Trägheitsmomente bei Rotation um ihre Längsachse!
    16.1. Zylinder: $r = 3$ cm, $h = 10$ cm
    16.2. Zylinder: $r = 5$ cm, $h = 3{,}6$ cm
    16.3. Hohlzylinder: $r_a = 5$ cm, $r_i = 4$ cm, $h = 10$ cm
17. Der Rotor einer Zentrifuge hat ein Trägheitsmoment von $0{,}45\ kg \cdot m^2$, er läuft mit einer Drehzahl von $13\,200\ min^{-1}$. Er wird durch eine konstante Bremskraft von 36 kp verzögert, die am Umfang einer Trommel von 100 mm Durchmesser angreift. Nach welcher Zeit kommt der Rotor zum Stillstand?

Felder

18. Bestimmen Sie die Masse der Erde aus den Daten der Mondbewegung nach dem Beispiel auf S. 38 und überprüfen Sie das Ergebnis mit Hilfe des Gravitationsgesetzes (35) aus der Gravitationskraft, die auf einen Körper von 1 kg Masse auf der Erdoberfläche ausgeübt wird!

19. Berechnen Sie die Feldstärke des Gravitationsfeldes der Erde für folgende Entfernungen:
19.1. 200 km über der Erdoberfläche,
19.2. 30 Erdradien vom Erdmittelpunkt!

20. Ein Körper von der Masse m, der sich in der Entfernung r vom Gravitationszentrum befindet, soll aus dem Anziehungsbereich des Zentralkörpers (Masse M) entweichen. Welche Mindestarbeit ist hierfür notwendig? W = F s

21. Wie groß ist die Gravitationskraft, die zwei Körper mit einer Masse von je 1 g in einer Entfernung von 1 cm aufeinander ausüben?

22. Welchen Impuls und welche kinetische Energie besitzt ein Raumschiffsatellit mit einer Masse von 12,1 t (Proton 1), der 200 km über der Erdoberfläche die Erde umkreist?

23. Welche Flughöhe über der Erdoberfläche muß ein künstlicher Satellit haben, dessen Umlaufzeit auf einer Kreisbahn gleich der Dauer der Erdrotation (23 h 56 min) ist?

24. Bestimmen Sie die Entfernung des Apogäums der elliptischen Bahn gleicher Umlaufzeit aus Aufgabe 23, deren Perigäum 230 km über der Erdoberfläche liegt!

25. Welche Folgerungen ergeben sich aus der Gleichung für die Entfernung des Apogäums (40), wenn bei gegebener Entfernung des Perigäums die Geschwindigkeit in diesem Punkte kleiner als die Kreisbahngeschwindigkeit ist? Bahn?

26. Aus den Bahnbeobachtungen des ersten künstlichen Planetoiden (XXI. Parteitag) wurde errechnet, daß der Flugkörper nach dem Brennschluß der Rakete in einer Höhe von 400 km über dem Erdboden eine Geschwindigkeit von 11 020 m · s^{-1} erreicht hat. Vergleichen Sie diese Geschwindigkeit mit der entsprechenden Parabelbahngeschwindigkeit, und überlegen Sie, welche Genauigkeitsanforderungen an die Leistung kosmischer Raketen zu stellen sind!

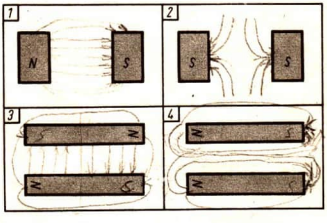
27. Berechnen Sie die Kreisbahngeschwindigkeit und die Parabelbahngeschwindigkeit für die Oberfläche des Planeten Venus!

28. Berechnen Sie die Kreisbahngeschwindigkeit und die Parabelbahngeschwindigkeit für die Oberfläche des Planeten Mars!

29. In einem Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt fließt ein Strom von 1 A. In 63,5 g Kupfer sind $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Atome, von denen jedes ein Elektron zur Elektrizitätsleitung zur Verfügung stellt. 1 cm³ Kupfer (8,9 g) enthält somit $0{,}84 \cdot 10^{23}$ Leitungselektronen mit je $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (Elementarladung). Berechnen Sie die Elektronengeschwindigkeit ($I = N \cdot A \cdot v \cdot e$)!

30. Welche Ladung muß jedes von zwei kleinen, je 1 p schweren Kügelchen erhalten, damit sie, an 4,905 m langen Kokonfädchen hängend, sich genau 10 cm weit abstoßen?

31. Zeichnen Sie den Verlauf der Kraftlinien zwischen den Polen der Magnete, wie sie in den vier Abbildungen angeordnet sind! Geben Sie den Richtungssinn an!



32. Welche Spannung ist nötig, um einem Elektron Schnellzugsgeschwindigkeit (120 km/h) zu geben?

33. An einer Fernsehröhre liegt eine Spannung von 15 000 Volt. Auf welche Geschwindigkeit wird ein Elektron hier beschleunigt? Wie lange braucht ein Elektron von der Anode zum Leuchtschirm (30 cm)?

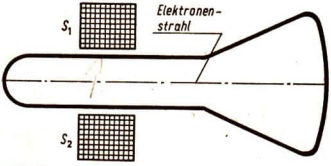
34. Welche magnetische Induktion B muß ein Magnetfeld haben, damit ein mit 2000 V beschleunigtes Elektron auf eine Kreisbahn mit 10 cm Radius gezwungen wird?

35. In einem Betatron steigt bei $v = 0{,}99\,c$ die Masse des bewegten Protons auf das Siebenfache der Ruhemasse. Welchen Durchmesser muß der Beschleuniger haben, falls das Magnetfeld den Betrag $B = 100$ T hat?

36. Erklären Sie die Bedeutung des Begriffes „Kraftlinie des magnetischen Feldes"!

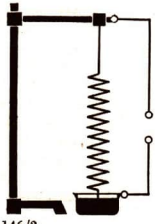
37. Beschreiben Sie ein Dreheisen-Meßgerät und erklären Sie seine Arbeitsweise. Warum wird Weicheisen statt Stahl verwendet? Warum kann dieses Instrument zum Messen von Gleich- und Wechselstrom verwendet werden?

38. Der Hals der Fernsehröhre befindet sich zwischen zwei Spulen, die zur horizontalen Ablenkung des Elektronenstrahls vorgesehen sind (Bild 146/1). Welche Richtung muß das magnetische Feld der Spulen haben, damit sich der Lichtfleck auf dem Schirm nach rechts bewegt (von außen auf den Schirm gesehen)?



146/1

39. Ein Ende eines schraubenförmigen federnden Leiters ist in eine Stativklemme eingeklemmt, und das andere taucht in eine Schale mit Quecksilber.
Der Stromfluß wird laufend unterbrochen und wieder geschlossen. Wie ist der Vorgang zu erklären?



146/2

40. Man gibt Ihnen drei stählerne Nähnadeln. Von einer weiß man, daß sie mit entgegengesetzten Polen an den Enden magnetisiert ist, eine andere hat Pole in der Mitte, die dritte ist nicht magnetisiert. Beschreiben Sie, wie Sie vorgehen werden, um die Nadeln zu identifizieren. Es steht Ihnen nur eine Vorrichtung zum horizontalen Aufhängen der Nadeln zur Verfügung.

41. Eine quadratische Leiterschleife mit 40 cm Seitenlänge wird innerhalb 0,5 Sekunden in ein Magnetfeld mit $B = 2$ T geschoben.
41.1. Wie groß ist die induzierte Spannung?
41.2. Wie groß ist die Spannung, wenn die Schleife im homogenen Feld parallel zu sich verschoben wird?
41.3. Berechnen Sie die Stromstärke und die bei der Bewegung fließende Ladung, wenn der Draht 50 mm² Querschnitt hat und aus Kupfer besteht.
41.4. Welche Kraft erfährt die Schleife beim Einschieben in das Magnetfeld?

42. Warum fällt eine Kupfermünze durch ein starkes inhomogenes Magnetfeld langsamer als ein Holzstück. Kann die Münze auch zur Ruhe kommen?

43. Eine Zylinderspule hat einen Wirkungsquerschnitt $A = 20$ cm² und 30 Windungen je 1 cm Spulenlänge. Die Stromstärke I wird in $\Delta t = 0{,}6$ s um $\Delta I = 10$ A geändert. Welche Spannung wird hierbei in einer die Spule umfassenden Induktionsspule von 500 Windungen induziert?

44. Beschreiben Sie drei Experimente zur Erzeugung einer Induktionsspannung. Von welchen Faktoren ist die Richtung und die Höhe der Spannung abhängig? Erklären Sie den Sachverhalt auch an einem praktischen Beispiel und fertigen Sie dazu eine Skizze an!

45. Legen Sie den Zusammenhang zwischen dem Induktionsgesetz und dem Lenzschen Gesetz dar. Beschreiben Sie zwei Experimente zur Illustration des Lenzschen Gesetzes, eines unter Verwendung eines Magnets, eines ohne Magnet!

46. Welche Spannung wird in einer in der Tragfläche eines Flugzeugs ausgespannten Antenne von $l = 30$ m durch die Vertikalkomponente des Erdfeldes bei einer Fluggeschwindigkeit von 2160 km · h^{-1} induziert? ($B = 4{,}1 \cdot 10^{-5}$ Vs · m^{-2})

47. Bei einem Drehspulgerät wird auf eine Windung das Drehmoment $M_1 = F \cdot d = (I \cdot I \cdot B) \cdot d$, auf die Drehspule somit das Drehmoment $M = N \cdot I \cdot d \cdot I \cdot B$ ausgeübt.
47.1. Wie groß ist M bei $I = 2$ mA?
47.2. Um wieviel Grad schlägt der Zeiger bei dieser Stromstärke aus?
Spulendurchmesser $d = 15$ mm $B = 0{,}25$ Vs · m^{-2}
Spulenlänge $l = 20$ mm $N = 100$
Rückdrehendes Federmoment $M_r = 10$ mp·cm/1°

48. Im Luftspalt eines Drehspulgeräts befindet sich eine kleine Induktionsspule ($A = 2$ cm², $N = 50$). Beim Herausziehen zeigt ein ballistischer Spannungsstoßmesser 0,0022 Vs an. Berechnen Sie die magnetische Induktion B im Luftspalt des Meßgeräts!

Zur speziellen Relativitätstheorie

49. Wiederholen Sie das Trägheitsgesetz!
Wenden Sie es auf folgenden Fall an: In einem Eisenbahnzug befindet sich eine ebene horizontale Platte, auf der ein Körper reibungsfrei gleiten kann (nach Art eines Luftkissenfahrzeuges). Wie verhält sich der Körper beim
49.1. ruhenden,
49.2. anfahrenden,
49.3. mit gleichförmiger Geschwindigkeit fahrenden,
49.4. bremsenden und

49.5. mit konstanter Geschwindigkeit eine nicht überhöhte Kurve fahrenden Zug?

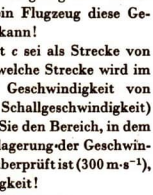
50. Ein Physiker befindet sich in einer Kabine, die mit einem sich drehenden Bezugssystem verbunden ist. Wie kann er mit einer Meßeinrichtung entsprechend Bild 81/1 unterscheiden, ob seine Kabine eine Translation oder Rotation ausführt?

51. Welche Bahnkurve beschreibt ein Gegenstand, der aus einem mit konstanter Geschwindigkeit auf einem geraden Bahndamm fahrenden Zug fällt, wenn er vom Zug aus und vom Bahndamm aus beobachtet wird?

52. Ein Flugzeug fliegt über dem Äquator (die Höhe wird vernachlässigt) mit der Geschwindigkeit, die ein Punkt auf dem Äquator infolge der Erddrehung besitzt, aber in entgegengesetzter Richtung. Wie beurteilt ein Beobachter von der Sonne aus die Bewegung von Flugzeug und Erde? Rechnen Sie nach, ob ein Flugzeug diese Geschwindigkeit erreichen kann!

53. Die Lichtgeschwindigkeit c sei als Strecke von 3 m dargestellt. Durch welche Strecke wird im gleichen Maßstab eine Geschwindigkeit von $300\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ (nicht ganz Schallgeschwindigkeit) dargestellt? Vergleichen Sie den Bereich, in dem das Gesetz von der Überlagerung der Geschwindigkeiten experimentell überprüft ist ($300\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$), mit der Lichtgeschwindigkeit!

54. Drei große Schiffe A, B und C fahren auf dem Meer in konstantem Abstand (Bild 147/1) mit einer Geschwindigkeit von $V = 9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ in die gleiche Richtung. Berechnen Sie die Fahrzeit eines Schnellbootes mit der Geschwindigkeit $v = 15\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, das



147/1

54.1. von B nach A fährt, dort ohne Zeitverlust wendet und zurückfährt,

54.2. ebenso von B nach C und zurück fährt!

55. Berechnen Sie zum Beispiel auf Seite 91 die Zeit t_A und die Orte x_E und x_A, in denen die Lichtsignale in S E und A erreichen! Berechnen Sie aus den Koordinaten der Ereignisse in S die Geschwindigkeit der Lichtsignale!

56. In einem Zug mit durchsichtigen Wänden befindet sich in der Mitte eine Lichtquelle, die Lichtblitze aussenden kann. Der Zug fährt etwa mit halber Lichtgeschwindigkeit.

56.1. Ein Beobachter im Zug „sieht" (damit ist eine Messung der Lichtgeschwindigkeit gemeint; wie sie ausgeführt werden kann, interessiert hier nicht) die Lichtsignale, die zum Anfang und Ende des Zuges laufen.

56.2. Ein Beobachter auf dem Bahnsteig „sieht" die Lichtsignale im Zug ebenfalls zum Anfang und Ende des Zuges laufen.
Welche Geschwindigkeit „sieht" der Beobachter in 56.1. und der in 56.2.?

57. Eine Photonenrakete erzeugt den Schub durch Abstrahlung von Photonen. Sie soll fast mit Lichtgeschwindigkeit fliegen.
Welche Geschwindigkeit der Photonen mißt ein Beobachter in der Rakete?
Welche Geschwindigkeit der Photonen mißt ein Beobachter auf einem Planeten, an dem die Rakete vorbeifliegt?

58. Im Bahndammsystem sind zwei Kontakte A und E in einer Entfernung angebracht, die gleich der Länge des Zuges ist. Durch Zuganfang A′ und Zugende E′ werden über die Kontakte unmittelbar daneben befindliche Lampen zum Aufleuchten gebracht.
Zum Zeitpunkt des Aufleuchtens befindet sich ein Beobachter B in S in der Mitte zwischen A und E und in S′ ein Beobachter B′ in der Mitte des Zuges, der über Spiegel die Signale beobachtet. Beschreiben Sie den Vorgang, wie ihn die Beobachter in S und S′ sehen!

59. Ein Myon bewegt sich in bezug auf die Erdoberfläche S mit der Geschwindigkeit $V = 0{,}99\ c$. Seine Halbwertzeit sei $t_0' = t_h' = 2 \cdot 10^6$ s.

59.1. Welche Halbwertzeit t_h wird in S gemessen?

59.2. Welche Strecke wird in dieser Zeit im System S zurückgelegt?

59.3. Welche Strecke wird im System S′ zurückgelegt?

60. Wie groß muß die Geschwindigkeit eines Raumfahrers sein, wenn für eine Reise, für die er 10 Jahre mißt, auf der Erde 20 Jahre vergehen sollen?

61. Ein Würfel im System S′ liege mit einer Kante parallel zur Bewegungsrichtung. Was ergibt eine Messung des Körpers von S aus bei hoher Relativgeschwindigkeit?

61.1. Wie werden Form und Volumen beurteilt?

61.2. Was ergibt sich hinsichtlich Form und Volumen bei beliebiger Lage des Würfels in S′?

62. Ein Zug bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $180\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Im Zug soll sich ein Körper relativ zum Zug mit $180\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ in Fahrtrichtung bewegen.

Welche Geschwindigkeit wird für diesen Körper von der Erde aus gemessen?

63. Berechnen Sie nach dem Additionsgesetz
63.1. v für $v' = c$ und $V = c$
63.2. v für $v' = c$ und $V < c$!

64. Ein Körper mit der Masse 1 g wird durch eine Kraft von 100 Newton beschleunigt. Welche Geschwindigkeit sollte dieser Körper nach 100 s, 1000 s und 5000 s erreichen?

65. Welche Geschwindigkeit sollte ein Elektron erreichen, das eine Spannung von
65.1. $U = 4{,}55 \cdot 10^9$ V
65.2. $U = 4{,}55 \cdot 10^{11}$ V durchläuft?

66. Ein Körper mit der Masse $m_0 = 1$ kg bewegt sich mit einer Geschwindigkeit $v = 240\,000$ km $\cdot$ s^{-1}. Welche Impulsmasse besitzt er?

67. Berechnen Sie, bei welcher Geschwindigkeit die Impulsmasse eines Körpers fünfmal so groß ist, wie die Ruhmasse!

68. Eine Tonne Stahl wird von 0 °C auf 1500 °C erwärmt. Welche Massenzunahme ergibt sich?

69. Berechnen Sie die Impulsmasse eines Photons der Frequenz $f = 10^{16}$ Hz (Ultraviolett) mit Hilfe der Beziehung $W = h \cdot f$!

Energieerhaltungssatz

70. Eine Stahlkugel mit der Masse 0,3 kg wird aus einer Höhe von 5 m mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 8 m $\cdot$ s^{-1} nach unten gegen eine horizontale Stahlplatte geworfen.
70.1. Wie hoch springt die Kugel zurück, wenn 20 Prozent der Energie beim Aufprall in Wärme umgewandelt wird?
70.2. Die Kugel wird aus derselben Höhe mit $v_1 = 8$ m $\cdot$ s^{-1} nach oben geworfen.
Vergleichen Sie und diskutieren Sie die Ergebnisse dieser zwei Aufgaben!

71. Mit welcher Geschwindigkeit muß man ein Geschoß senkrecht nach oben schießen, damit es die Höhe von 100 km erreicht?

72. Welche Arbeit kann ein Wasserfall in einer Stunde abgeben, bei dem 250 m^3 Wasser je Sekunde 20 m tief fallen?

73. Auf welche Höhe könnte ein 10 kp schweres Stahlstück mit der Wärmemenge gehoben werden, die beim Verbrennen eines Streichholzes ($m = 0{,}1$ g, Heizwert $H = 3500$ kcal $\cdot$ kg^{-1}) frei wird?

74. Welche Leistung könnte ein verlustlos arbeitendes Kraftwerk erzeugen, wenn in der Sekunde 89 m^3 Wasser durch die Turbinen laufen und der Höhenunterschied 200 m beträgt?

75. Ein Schwungrad hat die Form einer homogenen Scheibe (Zylinder). Seine Masse beträgt 2500 kg, der Durchmesser 2 m und die Drehzahl $n = 600$ min^{-1}.
75.1. Wie groß ist seine kinetische Energie?
75.2. Wie hoch könnte man mit dieser Rotationsenergie eine Masse von 100 kg heben, wenn man die Reibung vernachlässigt?

76. Eine Lokomotive, deren mittlere Leistung 400 PS beträgt, verbraucht in drei Stunden 1350 kg Steinkohle. Mit welchem Wirkungsgrad arbeitet die Maschine? ($H = 7000$ kcal $\cdot$ kg^{-1}).

77. Beim Härten eines Stahlmeißels stieg seine Temperatur auf 650 °C. Im Ölbad kühlte er sich auf 50 °C ab. Welche Wärmemenge verlor der Meißel ($m = 500$ g, $c = 0{,}11$ cal $\cdot$ g^{-1} $\cdot$ grd^{-1})?
Welche mechanische Arbeit entspricht dieser Wärmemenge?

78. Ein Drehmeißel aus einer Hartmetallegierung bearbeitet mit einer Schnittkraft von 720 kp ein Werkstück auf der Drehmaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von 120 m $\cdot$ min^{-1}. Welche Wärmemenge wird in jeder Sekunde frei?

79. In einem modernen Kraftfahrzeug beträgt der stündliche Verbrauch an Benzin je 1 PS Leistung durchschnittlich 250 g.
Bestimmen Sie den Wirkungsgrad des Motors!

80. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad eines Dieselmotors von 100 PS Leistung, der je Stunde 20 kg Treibstoff verbraucht!

81. Berechnen Sie den Verbrauch an Steinkohle je Stunde und PS in der ersten Dampfmaschine von Pulsonow! Sie hatte einen Wirkungsgrad von 0,8 Prozent.

82. Eine Lokomotive hat eine Leistung von 2500 PS. Wieviel Rohöl verbraucht sie in der Stunde, wenn ihr Wirkungsgrad 15 Prozent beträgt?

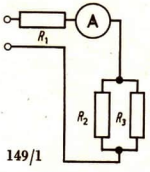
83. Die Elektroenergie, die das Wolgograder Wasserkraftwerk jährlich abgeben kann, beträgt etwa 10 Milliarden kWh. Welche Menge Heizmaterial ($H = 7000$ kcal $\cdot$ kg^{-1}) müßte zur Verfügung stehen, um die gleiche Energie zu erzeugen? Der Wirkungsgrad des Wärmekraftwerkes betrage 20 Prozent!

84. Wie groß ist die in einem Blitz enthaltene Energie, wenn man annimmt, daß die Entladungsspannung 10^9 Volt, die Stromstärke 50 000 Ampere und die Entladungszeit 10^{-3} s beträgt?
84.1. Wie lange könnte mit dieser Energie eine 110 W-Lampe betrieben werden?
84.2. Weshalb kann man die in einem Blitz steckende Energie praktisch nicht verwerten?

84.3. Welche Energie besitzen die im Laufe eines Jahres auf der Erde sich entladenden Blitze, wenn man die Zahl der Gewitter auf $16 \cdot 10^6$ pro Jahr schätzt und wenn man für jedes Gewitter im Mittel 5 Blitze annimmt?

84.4. Welchen Geldwert hätte diese Energie (1 kWh mit 0,08 M angenommen)?

85. Welche Energiemenge wird in 10 Stunden in dem dargestellten Stromkreis umgewandelt, wenn der Strommesser 2 A anzeigt und die Widerstände die Werte $R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 50\Omega$, $R_3 = 200\ \Omega$ betragen?

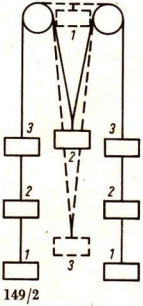


149/1

86. Zwischen der Erde und einer Wolke ging während eines Gewitters eine Entladung vor sich. Wie groß war die Energie des Blitzes, wenn die Potentialdifferenz zwischen Erde und Wolke 10^8 Volt betrug und eine Elektrizitätsmenge von 20 Coulomb floß?

87. Welche energetischen Prozesse verlaufen in einer Leuchtstoffröhre? — In einer Röntgenröhre mit a) kalter Katode (Ionenröhre), b) geheizter Katode (Elektronenröhre)?

88. Befestigen Sie zwei Wägestücke an den Enden und ein Wägestück in der Mitte eines Fadens und legen Sie diesen Faden über zwei leicht bewegliche Rollen! Geben Sie dem System aus Faden und Wägestücken verschiedene Lagen und überlassen Sie es dann sich selbst! Ermitteln Sie jeweils die Summe der potentiellen Energien der drei Wägestükke bezogen auf die Tischplatte! Welches Ergebnis liefern die Versuche?



149/2

89. Setzen Sie das Ergebnis des Versuches 88 in Beziehung zu folgenden Erscheinungen: Ruhestellung eines Fadenpendels — Bewegung eines auf einer beliebigen Bahn gleitenden oder rollenden Körpers — Bewegung bei Erdrutsch — Abtragung von Gebirgen — Einstellung der Wasseroberfläche in einem Gefäß — Form der Wasseroberfläche auf den Weltmeeren — u. a. m.

90. In einem Behälter schwimmt ein Holzkörper auf dem Wasser. Ein Stein sinkt in dem Wasser zu Boden. Welche Beziehung besteht zum Ergebnis des Versuches 88?

91. Beim Übertritt eines Elektrons von einer äußeren zu einer inneren Schale verringert sich die Energie des Atoms um 1,89 eV. Dabei wird ein Lichtquant abgestrahlt. Bestimmen Sie die Wellenlänge des Lichtes!

92. Ein Energiequant des Natriumlichtes hat eine Energie von $3{,}34 \cdot 10^{-19}$ J. Welche Wellenlänge hat dieses Licht?

93. Die für die violette Linie des Kaliumspektrums typische Wellenlänge beträgt 405 nm. Bestimmen Sie die Energie eines Photons dieses Lichtes!

94. Beim Franck-Hertz-Versuch wird durch den angeregten Quecksilberdampf Licht mit der Wellenlänge 253,7 nm emittiert. Welche Energie besitzt ein Photon dieser Strahlung?

95. Berechnen Sie die Energie der Lichtquanten aus den beiden Extremen des sichtbaren Spektrums $\lambda_r = 750$ nm und $\lambda_v = 400$ nm!

96. Um ein Wasserstoffatom zu ionisieren, muß man einem Elektron die Energie von 13,5 eV zuführen. Welche Frequenz besitzt die elektromagnetische Welle, die zur Ionisierung führt?

97. Die Energie eines von einem Protactinium-Isotop emittierten Gammaquants beträgt 0,8 MeV. Wie groß ist die Wellenlänge der Strahlung?

98. Welche Geschwindigkeit haben die Elektronen in einem Gasentladungsrohr, wenn ihre Energie 45 eV beträgt?

99. Welche Spannung ist nötig, um Elektronen in Katodenröhren eine Geschwindigkeit von $2000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ zu erteilen?

100. In einer Entladungsröhre ist der Potentialunterschied zwischen den Elektroden 1125 V. Welche Geschwindigkeit und welche Energie haben die Elektronen in der Röhre?

101. Welche Geschwindigkeiten erhalten ein Elektron, ein Proton und ein α-Teilchen durch das freie Durchlaufen der Spannung 1 V?

102. Welche Energie besitzen Elektronen, die durch Licht der Wellenlänge 400 nm aus Zäsium herausgelöst werden? $W_A = 1{,}81$ eV

103. Für Wolfram beträgt die Austrittsarbeit 4,9 eV. Macht sich ein Photoeffekt bemerkbar, wenn das Wolfram vom grünen Licht der Wellenlänge $\lambda = 500$ nm bestrahlt wird?

104. Bestimmen Sie die langwellige Grenze der Abstrahlung für Zink, wenn die Austrittsarbeit

der Elektronen für Zink $5{,}6 \cdot 10^{-19}$ J beträgt!

105. Welche Energie, gemessen in MeV, besitzen α-Teilchen des Poloniumisotopes 214 mit der Geschwindigkeit $v = 19\,200\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$?

106. Welchem Massendefekt entspricht eine freiwerdende Energie von 10 000 kWh?

107. Berechnen Sie, welcher Energie in kWh ein Massendefekt von 6 mg entspricht!

108. Wie groß ist die Bindungsenergie je Nukleon bei einem $^{27}_{13}$Al-Kern (relative Atommasse = 26,99)?

109. Wieviel $^{235}_{92}$U-Kerne müssen gespalten werden, damit primär eine Energie von $25 \cdot 10^6$ kWh frei wird?

110. Die Massenzunahme einer Wassermasse von 50 000 kg, die von 0 °C auf 100 °C erhitzt wird, ist zu berechnen!

111. Mit exothermen chemischen Reaktionen ist stets ein Massenverlust verbunden. Die Verbrennung von 1 kg Kohlenstoff liefert $8 \cdot 10^3$ kcal.
Wie groß ist der mit dieser Energieabgabe verbundene Massenverlust?

112. Berechnen Sie den sekundlichen Massenverlust der Sonne infolge der Strahlung: Solarkonstante $S = 1{,}9\ \mathrm{cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}}$.
Mittlere Entfernung Erde—Sonne zu $1{,}5 \cdot 10^{13}$ cm, $A = 4 \cdot \pi \cdot a^2$.

113. Die Verbrennungsenergie des Kohlenstoffs, die Kernspaltungsenergie des Urans und die Fusionsenergie des Heliums sind zu vergleichen,
113.1. bezogen auf ein Grammatom,
113.2. bezogen auf ein Kilogramm!

114. Bei der Verschmelzungsreaktion eines Deuteriumkernes mit einem $^3_2$He-Kern zu einem $^4_2$He-Kern wird die Energie 18,3 MeV frei:
$^2_1\mathrm{D} + {}^3_2\mathrm{He} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_1\mathrm{H} + 18{,}3\ \mathrm{MeV}$
Welcher Massendefekt tritt auf?

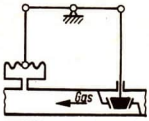
115. Aus welcher Menge Uran 235 könnte theoretisch die von der Sowjetunion im Jahre 1967 gewonnene Elektroenergie (600 TWh) erzeugt werden, wenn man annimmt, daß das Uran völlig gespalten werden könnte und wenn man alle Umwandlungsverluste vernachlässigt?

Regelung

116. Erklären Sie den grundsätzlichen Unterschied zwischen einer Handregelung und einer automatischen Regelung!

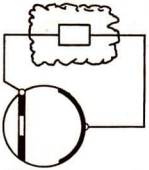
117. Durch welche Kennzeichen ist eine Regelung charakterisiert?

118. Beschreiben Sie die in Bild 150/1 dargestellte Regelung!
118.1. Wie wird das zeitliche Verhalten der Regelgröße bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße sein?
118.2. Erklären Sie, warum es zu einer bleibenden Regelabweichung kommt!



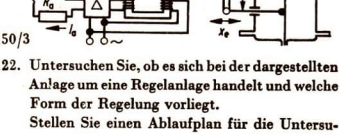
150/1

119. Der Musculus dilatator öffnet und der Musculus sphincter pupillae schließt die Pupille des Auges bei Helligkeitsänderungen. Beweisen Sie an Hand der Kennzeichen, daß es sich um eine Regelung handelt (Bild 150/2).


150/2

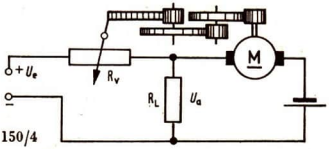
120. Entwerfen Sie eine Temperaturregelung für ein Aquarium, die eine kontinuierliche (keine Zweipunktregelung) Regelung darstellt.
Begründen Sie diesen Entwurf und zeigen Sie die zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf.

121. In Bild 150/3 ist das Prinzip einer Stromwaage dargestellt. Beweisen Sie, daß die Stromstärke I_a der Eingangsgröße x_e proportional ist! Nutzen Sie die Möglichkeit der Aufstellung einer Wirkungskette.

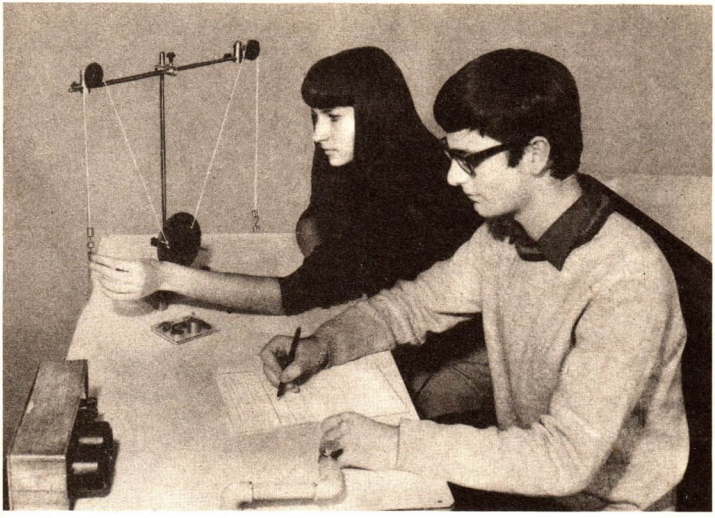


150/3

122. Untersuchen Sie, ob es sich bei der dargestellten Anlage um eine Regelanlage handelt und welche Form der Regelung vorliegt.
Stellen Sie einen Ablaufplan für die Untersuchung des Gleichspannungskonstanthalters auf.



150/4



Schülerexperiment

Die physikalische Theorie mit ihren mathematischen Hilfsmitteln und modernen Modellvorstellungen und das physikalische Experiment sind bestimmend für den Physikunterricht.
Bei den Schülerexperimenten werden Methoden kennengelernt und Fertigkeiten erworben, mit denen Gesetzmäßigkeiten in der Natur aufgefunden oder bestätigt werden können. Dabei wird im Verlaufe des Physik-Kurses eine gewisse Selbständigkeit erworben, die jeden Schüler befähigt, während seiner weiteren Ausbildung und beruflichen Entwicklung Aufgaben experimentell zu lösen oder theoretisch gefundene Lösungen experimentell zu überprüfen. Besonders zu beachten sind die Hinweise mit der Bezeichnung ACHTUNG! Hier wird auf Gefahren und Unfallquellen aufmerksam gemacht. Bei Nichtbeachtung können Menschen gefährdet werden, oder sie können eventuell sogar körperliche Schäden davontragen. Wenn die Anweisungen nicht ordnungsgemäß oder nachlässig ausgeführt werden, können Geräte oder Hilfsmittel beschädigt werden. Diese Hinweise zum Arbeits- und Unfallschutz sind ein wichtiger Teil der Anleitung.

Bestimmung von Drehmomenten | M 1

Aufgabe

Bestätigen Sie, daß ein drehbar gelagerter Körper im Gleichgewicht verbleibt, wenn die rechtsdrehenden Momente den gleichen Betrag haben wie die linksdrehenden!

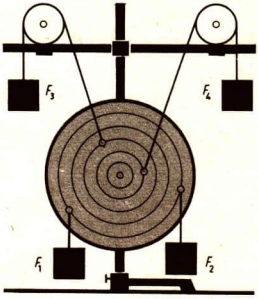
Vorbetrachtungen

1. Wie errechnet man ein Drehmoment?
2. Mehrere gleichgerichtete Momente faßt man durch Addition zusammen.

Geräte und Hilfsmittel

1 V-Fuß
2 Zwei Stativstäbe (je 500 mm)
3 Stativstab 250 mm
4 Vier Kreuzmuffen
5 Momentenscheibe mit Stiften
6 Drei Achszapfen
7 Zwei Rollen
8 Satz Hakenkörper
9 Lineal
10 Linealhalter
11 Schnur
12 Anleitung zum Schülerexperimentiergerät „Mechanik", Versuch 36 und Versuch 38

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

1. Bauen Sie die Versuchsapparatur zusammen. (Vs. 36)
2. Wählen Sie zunächst zwei geeignete Hakenkörper als Kräfte F_1 und F_2, um die Momentenscheibe in das Gleichgewicht zu bringen. (Protokoll)
3. Ändern Sie die Versuchsbedingungen ab, indem Sie drei Kräfte (F_1, F_2, F_3) wirken lassen. (Vs. 38, Protokoll)

Hinweis!

Den Abstand der Wirkungslinien vom Drehpunkt messen Sie mit Hilfe eines rechtwinkligen Zeichendreiecks.

4. Wählen Sie noch zwei Möglichkeiten mit jeweils drei Kräften. (Protokoll)
5. Wählen Sie insgesamt vier Kräfte. (Protokoll)

Antwort zu den Vorbetrachtungen

1.

Meßprotokoll

Zu 2

Rechtsdrehend			Linksdrehend		
F in p	s in cm	$F \cdot s$ in p · cm	F in p	s in cm	$F \cdot s$ in p · cm

Zu 3

	Rechtsdrehend			Linksdrehend		
	F in p	s in cm	$F \cdot s$ in p · cm	F in p	s in cm	$F \cdot s$ in p · cm
1						
2						
3						

Entsprechende Tabellen für 4 u. 5

Auswertung

1. Errechnen Sie für jede Anordnung die rechtsdrehenden und die linksdrehenden Momente.
2. Vergleichen Sie diese für jede einzelne Anordnung.
3. Suchen Sie nach einer Begründung, wenn Abweichungen auftreten.

Ergebnis

Lösungen

Mechanik

2. Tabelle

ω	$(1\ s^{-1})$	$398\ s^{-1}$	$314\ s^{-1}$
T	$6{,}28\ s$	$0{,}0158\ s$	$(0{,}02\ s)$
n	$0{,}159\ s^{-1}$	$(3800\ min^{-1})$	$50\ s^{-1}$

3. $\omega = 7{,}29 \cdot 10^{-5}\ s^{-1}$

3.1. $v = 465\ m \cdot s^{-1}$

3.2. $v = 281\ m \cdot s^{-1}$

5. $F \approx 114\ kp$

7. $v = 3{,}13\ m \cdot s^{-1}$
$\omega = 3{,}13\ s^{-1}$
$T = 2{,}01\ s$
$\alpha = 45°$
$F = \sqrt{2} \cdot G$

8. $\tan\alpha = \dfrac{v^2}{r \cdot g}$

9.1. $\alpha \approx 81°$

9.2. $\alpha \approx 72{,}4°$

10. $h \approx 72\ mm$

11. $\alpha \approx 14°$

12. $n = 0{,}45\ s^{-1}$

13. $\omega = 1{,}24 \cdot 10^{-3}\ s^{-1}$
$T = 5{,}065 \cdot 10^{3}\ s$
$= 84\ min\ 25\ s$

14. $F \approx 18{,}6\ kp$

15. $M = 30{,}4\ kpm$

16.1. $J = 9{,}92\ kg \cdot cm^2$

16.2. $J = 27{,}56\ kg \cdot cm^2$

16.3. $J = 45{,}21\ kg \cdot cm^2$

17. $t = 17{,}6\ s$

Felder

19.1. $E = 9{,}23\ m \cdot s^{-2}$

19.2. $E = 1{,}10\ cm \cdot s^{-2}$

20. $W = \dfrac{k \cdot M \cdot m}{r}$

21. $F = 6{,}67 \cdot 10^{-13}\ N \approx 6{,}8 \cdot 10^{-11}\ p$

22. $I = 9{,}43 \cdot 10^{7}\ kg \cdot m \cdot s^{-1}$
$W_{kin} = 3{,}67 \cdot 10^{11}\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
$W_{kin} \approx 37\,000\,000\,000\ kpm$

23. $h = 35\,180\ km$

24. $h = 71\,390\ km$

26. $v_P = 10\,860\ m \cdot s^{-1}$ (Differenz $160\ m \cdot s^{-1}$ $\triangleq 1{,}5\%$)

27. $v_K = 7\,200\ m \cdot s^{-1}$
$v_P = 10\,200\ m \cdot s^{-1}$

28. $v_K = 3\,590\ m \cdot s^{-1}$
$v_P = 5\,020\ m \cdot s^{-1}$

29. $v_e = 7{,}5 \cdot 10^{-5}\ m \cdot s^{-1}$

30. $F = 10^{-4}\ N$
$Q = 10{,}6 \cdot 10^{-10}\ C$

32. $U \approx 3 \cdot 10^{-9}\ V$

33. $v \approx 7{,}3 \cdot 10^{7}\ m \cdot s^{-1}$
$t \approx 4 \cdot 10^{-9}\ s$

34. $B = 1{,}51 \cdot 10^{-3}\ T$

35. $d \approx 0{,}44\ m$

41.1. $U = 0{,}64\ V$

41.2. $U = 0\ V$

41.3. $I = 1{,}18 \cdot 10^{3}\ A$
$Q = 0{,}59 \cdot 10^{3}\ C$

41.4. $F = 0{,}94 \cdot 10^{3}\ N$

43. $U = 7{,}54 \cdot 10^{-3}\ V$

46. $U = 0{,}74\ V$

47.1. $M = 1{,}5 \cdot 10^{-5}\ Nm$

47.2. $\alpha = 14{,}8°$

48. $B = 0{,}2\ T$

Zur speziellen Relativitätstheorie

49.1. und 49.3. Der Körper bleibt in Ruhe.

49.2., 49.4. und 49.5. Der Körper bewegt sich entgegengesetzt zur Beschleunigungsrichtung.

50. Messungen an verschiedenen Punkten. Bei Translation wird ein homogenes, bei Rotation ein inhomogenes Beschleunigungsfeld gemessen.

51. Vom Zug aus freier Fall, vom Bahndamm aus Wurfparabel.

52. Von der Sonne aus ruht das Flugzeug; $v \approx 1667\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$

53. $300\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \triangleq 0{,}003\ \mathrm{mm}$

54.1. $t = 250\ \mathrm{s}$

54.2. $t = 200\ \mathrm{s}$

55. $t_A = 2\ \mathrm{s};\ x_E = -150\,000\ \mathrm{km};$
$x_A = 600\,000\ \mathrm{km}$

56. Beide „sehen" die Lichtgeschwindigkeit c.

57. Jeder Beobachter mißt für die Photonen die Lichtgeschwindigkeit c.

59.1. $t_h \approx 14{,}2 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{s}$

59.2. $s \approx 4220\ \mathrm{m}$

59.3. $s' \approx 594\ \mathrm{m}$

60. $v \approx 260\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

61.1. Die Kante in Bewegungsrichtung wird verkürzt gemessen, das Volumen ist entsprechend kleiner.

61.2. Die Volumenverkleinerung bleibt die gleiche.

62. $v \approx 265\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

63.1. $v = c$

63.2. $v = c$

64. nach 100 s : $v = 10^7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
nach 1000 s : $v = 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
nach 5000 s : $v = 5 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

65.1. $v \approx 4 \cdot 10^7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

65.2. $v \approx 4 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

66. $m \approx 1{,}667\ \mathrm{kg}$

67. $v \approx 294\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

68. $\Delta m \approx 8{,}4 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{kg}$

69. $m \approx 0{,}74 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{kg}$

Energieerhaltungssatz

70.1. $h = 6{,}6\ \mathrm{m}$

70.2. $h = 6{,}6\ \mathrm{m}$

71. $v = 1{,}4\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

72. $W = 48{,}6 \cdot 10^3\ \mathrm{kWh}$
$\approx 18 \cdot 10^9\ \mathrm{kpm}$

73. $h = 14{,}9\ \mathrm{m}$

74. $P = 17{,}5 \cdot 10^4\ \mathrm{kW}$

75.1. $W_{\mathrm{kin}} = 2{,}46 \cdot 10^6\ \mathrm{J}$
$= 0{,}69\ \mathrm{kWh}$

75.2. $h = 2500\ \mathrm{m}$

76. $\eta = 0{,}08$

77. $W_{\mathrm{mech}} = 1{,}38 \cdot 10^5\ \mathrm{Nm}$
$= 1{,}405 \cdot 10^4\ \mathrm{kpm}$

78. $P = 3{,}4\ \mathrm{kcal \cdot s^{-1}}$

79. $\eta \approx 0{,}23$

80. $\eta \approx 0{,}3$

81. $m = 11{,}3\ \mathrm{kg}$

82. $m = 1052\ \mathrm{kg}$

83. $m = 6{,}15 \cdot 10^6\ \mathrm{t}$

84.1. $W_{\mathrm{el}} = 13{,}9 \cdot 10^3\ \mathrm{kWh}$

84.2. $t = 5 \cdot 10^8\ \mathrm{s} \approx 1{,}4 \cdot 10^5\ \mathrm{h}$

84.3. $W = 11 \cdot 10^{11}\ \mathrm{kWh/Jahr}$

84.4. $88 \cdot 10^9$ Mark

85. $W_{\mathrm{el}} = 2{,}4\ \mathrm{kWh}$

86. $W_{\mathrm{el}} = 5{,}6 \cdot 10^2\ \mathrm{kWh}$

88. Die Wägestücke stellen sich so ein, daß die Summe der potentiellen Energie aller 3 Wägestücke den kleinstmöglichen Wert hat.

91. $\lambda = 657\ \mathrm{nm}$

92. $\lambda = 595\ \mathrm{nm}$

93. $W = 4{,}9 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

94. $W = 7{,}85 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

95. $W_r = 2{,}65 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$
$W_v = 4{,}98 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

96. $f \approx 3{,}3 \cdot 10^{15}\ \mathrm{s^{-1}}$

97. $\lambda = 1{,}6 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{m}$

98. $v = 4 \cdot 10^3\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

99. $U = 11{,}25\ \mathrm{V}$

100. $v = 2 \cdot 10^4\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$
$W = 18 \cdot 10^{-17}\ \mathrm{J}$

101. $v_e = 6 \cdot 10^2\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$
$v_p = 14\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$
$v_\alpha = 10\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

102. $W_{kin} = 1{,}9 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

103. nein

104. $\lambda = 355\ \mathrm{nm}$

105. $W = 7{,}64\ \mathrm{MeV}$

106. $\Delta m = 4 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{g}$

107. $W = 1{,}5 \cdot 10^5\ \mathrm{kWh}$

108. $W_n = 8{,}06\ \mathrm{MeV}$

109. $n \approx 2{,}9 \cdot 10^{24}$

110. $\Delta m = 2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{g}$

111. $\Delta m = 0{,}37 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{g}$

112. $m = 4{,}16 \cdot 10^6\ \mathrm{t}$

113.1. Kohlenstoff $96\ \mathrm{kcal \cdot Mol^{-1}}$
Uran $4 \cdot 10^9\ \mathrm{kcal \cdot Mol^{-1}}$
Helium $5{,}5 \cdot 10^8\ \mathrm{kcal \cdot Mol^{-1}}$

113.2. Kohlenstoff $8000\ \mathrm{kcal \cdot kg^{-1}}$
Uran $1{,}7 \cdot 10^{10}\ \mathrm{kcal \cdot kg^{-1}}$
Helium $1{,}4 \cdot 10^{11}\ \mathrm{kcal \cdot kg^{-1}}$

114. $\Delta m = 0{,}0175\ u$

115. $m \approx 25\ \mathrm{t}$

Abgeschlossenes System 128 ff
ABRAHAM, ALBERT 42, 85
Addition von Geschwindigkeiten 95
Aktivierungsenergie 117
Aphel 36
Apogäum 42
Äquipotentiallinien 33, 36
Arbeit im Gravitationsfeld 41
axialer Vektor 10

Bahn-beschleunigung 11
— geschwindigkeit 9
— überhöhung 15
beschleunigtes System 82
Beschleunigung geladener Teilchen 53
Beschleunigungssimulator 15
BETHE 119
Bezugssystem 80
—, rotierendes 13
Bindungsenergie 113
Bindungskraft 113
Bogenmaß 8
BOLTZMANN 106
BRAHE, TYCHO 35
Brennstoffzellen 106

CAVENDISH, HENRY 39
CLAUSIUS 106
Coulombsches Gesetz 50
CURIE 113

Dauermagnet 57
Diamagnetismus 66
Dichtediffusion 107
Dielektrizitätskonstante 49
Drehbewegung, Grundgesetz der 21
Drehimpuls 22
—, Gesetz von der Änderung des — es 22
—, Gesetz von der Erhaltung des — es 36
Dreh-moment 17
— schwingung 21
— vektor 11
— waage 39
— winkel 8

Eigenzeit 92
EINSTEIN, ALBERT 79
elektrische Elementarladung 54
— Felder 30
elektromagnetische Felder 30, 77
— Induktion 69
Elektron, spezifische Ladung des — s 62
Elektronenmikroskop 55
elektrostatische Felder 77
Elementarladung, elektrische 54
Energetik 109
Energie des elektrischen Feldes 51
— des magnetischen Feldes 73
Energie-einheiten 109
— träger 123
— wandler 107
ENGELS, FRIEDRICH 128
Entweichungsgeschwindigkeit 44
Ereignis 80
—, Gleichzeitigkeit von — sen 88
Erhaltungsgröße 106

FARADAY, MICHAEL 69
Feld einer physikalischen Größe 30
—, elektrisches 30
—, elektromagnetisches 30,77
—, elektrostatisches 77
—, Energie des elektrischen — es 51
—, Energie des magnetischen — es 73
—, magnetisches 30
—, magnetostatisches 77
—, physikalisches 30
Felder der quasistationären Ströme 77
— der stationären Ströme 77
Feld-elektronenmikroskop 55
— konstante, magnetische 64
— theorie 29
Ferromagnetismus 65
Fliehkraft 15
Foto-element 110
— synthese 108

Galilei-Transformation 81
Gebrauchsenergie 123
Generator, MHD- 109
—, thermoelektrischer 107
Generatorprinzip 68
Geschwindigkeit, erste kosmische der Erde 14
—, erste kosmische 44
—, zweite kosmische 44

—, dritte kosmische 56
—, Überlagerung der — en 82
—, Addition von — en 95
Gesetz, Coulombisches 50
— vom Qualitätsumschlag 46
— von der Änderung des Drehimpulses 22
— von der Erhaltung des Drehimpulses 22, 36
gleichförmig 9
— bewegtes System 81
Gleichzeitigkeit, Relativität der 89
— von Ereignissen 88
GOELRO-Plan 124
Gradmaß 8
Gravimeter 40
Gravitationsfeld 30, 39
—, Arbeit im 41
Gravitationsfeldstärke 40
Gravitationsgesetz 39
Gravitationskonstante 39
Gravitationskraft 39
Grenzfrequenz 110
Größe, physikalische 132
Grundgesetz der Drehbewegung 21

HELMHOLTZ 106

Impulsmasse 96
Induktion, elektromagnetische 69
—, magnetische 58, 64
Induktionsgesetz 70
Induktionsspannung 69
Induktionsstrom 71
Induktivität 73
Inertialsystem 84
INFELD, LEOPOLD 92
Information 108, 132
Integralregler 141
irreversibel 110
Istwert 134
IWANENKO 113

JOULE 106

Katalysator 118
KEPLER, JOHANNES 35
Keplersches Gesetz 35
Kernfelder 30
kohärent 109
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 87
Konverter 108
KOPERNIKUS, NIKOLAUS 35
Körper, starrer 9, 17
kosmische Geschwindigkeit 14, 44, 46
Kraft-arm 17
— linien 33
Kreis-bahngeschwindigkeit 14, 43
— beschleuniger 63
— bewegung, gleichförmige 9
Kreiselpumpe 15
Kreiselverdichter 15
KRIGAR-MENZEL 39

Ladung, spezifische des Elektrons 62
Ladungsträger 46
Längenkontraktion 94
Leitstrahl 8
LENIN 128
Lenzsches Gesetz 71
Leucht-röhre 110
— stofflampe 110
Licht-ausbeute 110
— geschwindigkeit, Konstanz der 87
Linearbeschleuniger 53
Lorentzkraft 60
Lorentz-Transformation 90
Lunik I 46

Magnetische Felder 30
— Feldkonstante 64
— Induktion 58, 64
Magnetisierungskurve 66
magnetostatische Felder 77
Massen-änderung 95
— defekt 114
Masse-Energie-Beziehung 97
Materie, physikalische Strukturformen der 33
— begriff 77
MAXWELL 106
MAYER 106
Mesonen π- 95
Meßglied 133
MHD-Generator 109
MICHELSON 85
Michelson-Versuch 85
Milchzentrifuge 15
Modellvorstellung 30
Myonen 93

Neutrino 117, 130
NEWTON, ISAAC 37
Nutzenergie 123

OPPENHEIMER 120

Paarbildung 122
Parabelbahngeschwindigkeit 44
Paramagnetismus 65
PAULI 130
Perigäum 42
Perihel 36
Permeabilität 64
Phasotron 63
physikalische Felder 30
— Größe 132
PLANCK 107, 130
Plasma 109, 118
Positron 118, 121
Potentialberg 117
Prinzip, elektromotorisches 68
Probekörper 32
Proportionalregler 140
Punktmasse 8

Radial-beschleunigung 12
— kraft 12
Radionuklid-Batterie 107
Radiusvektor 8
RANKINE 106
Raum 99
Reaktionszyklus 119
Regel-anlagen 138
— einrichtung 133
— geräte 131
— größe 134
— größendifferenz 141
— strecke 133
— system 132
Regeln 132
Regelung 132
Relativität der Gleichzeitigkeit 89
Relativitätsprinzip, spezielles 88
Relativitätstheorie, spezielle 79
RICHARZ 39
Rohenergie 123
Rotation, gleichförmige 9
Rotationsenergie 23
rotierendes Bezugssystem 13
Ruh-energie 122
— länge 94
— masse 122

Schubvektoren 11
Schwerefelder 30
schwerelos 14
Schwerelosigkeit 14
Schwungradantrieb 25
Selbstinduktion 72
Sollwert 134
Sprühentladung 55
Sprungfunktion 138
Sputnik I 16
Steinkohleneinheit (SKE) 125
Stell-glied 133
— kraft 135
Stoffe, diamagnetische 66
—, ferromagnetische 65
—, paramagnetische 65
Störgröße 134
Störung 138
Strahlungsfelder 32
Strukturformen der Materie, physikalische 33
Superposition 107
Synchrozyklotron 63
System, abgeschlossenes 128, 129, 130
—, beschleunigtes 82
—, gleichförmig bewegtes 81

TAMM, IGOR 113
Teilchenbeschleuniger 32
Tesla 59
Thermoelement 107
Trägheitsmoment 19

Umlauf-zahl 9
— zeit 9, 44
Überlagerung der Geschwindigkeiten 82
Übertragungs-funktion 138
— glied 133

Vektor, axialer 10

Wechselwirkung 130
von WEIZSÄCKER 119
Winkel-beschleunigung 11
— geschwindigkeit 9
— geschwindigkeit, Vektor der 10
Wirbelströme 75
Wirkungsgrad, thermischer 111
—, wirtschaftlicher 111
Wirkungskette 136

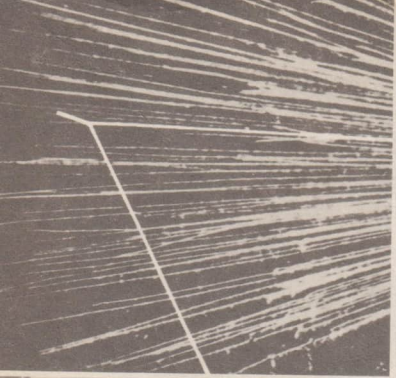
Zeit 99
— dilatation 92
— verhalten 138
Zerstrahlung 121
Zustandsgröße 107
Zyklotron 63

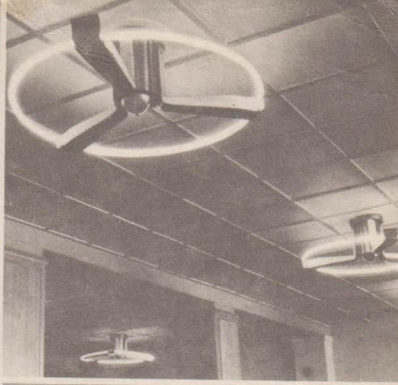
Quellennachweis der Bilder

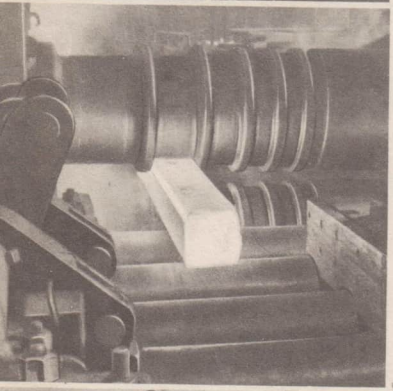
APN: 16/1 · Bach, E.-L.: 22/1 · Brüggemann: 2. Umschlagseite 2 · BVB: 123/2 · Deutsche Reichsbahn: 2. Umschlagseite 1; 80/1 · DSF: 40/2; 56/1; 62/2; 78/1; · Foto Diesing: 133/2 · Klein: 3. Umschlagseite 5 · Murza: 143/1 · Pohl: 2. Umschlagseite 4 · Postmuseum DDR: 56/2 · Schröter, W. G.: 29/1 · Sportverlag-Rowell: 2. Umschlagseite 5 · Transpress-Verlag: 8/1 · VEB Pressen- und Scherenbau, WMW Erfurt: 7/1; 24/1 · Volksarmee, Klöppel: 138/1 · VWV Archiv, Berlin: 2. Umschlagseite 3; 24/2; 46/1; 64/1; 68/1; 69/2; 74/3; 75/2; 113/1; 123/3; 3. Umschlagseite 1; 3 · VWV Seifert, M.: 24/3; 24/4; 62/3; 65/1; 74/2; 75/3; 127/1; 133/1; 151/1; 3. Umschlagseite 2; 4 · Zentralbild Berlin: 15/4; 32/1; 54/1; 68/2; 78/1; 79/1; 92/1; 99/1; 103/1; 104/1; 113/2; 117/2; 123/1; 128/1; 131/1; 132/1; 142/1.

Reproduktionen aus:

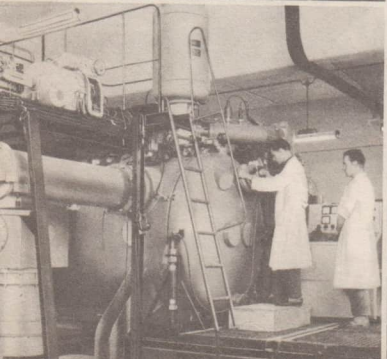
W. Kaempfert, Bahnbrechende Erfindungen in Amerika und Europa, Rud. Moss. Buchverlag Berlin 1927: 56/3 · Kridla vlasti: 15/2 · Wissenschaft und Fortschritt, 11/1965: 85/1; 87/1; 87/2.

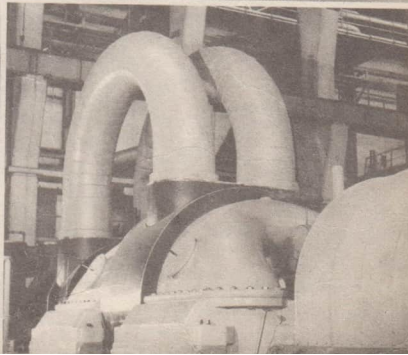






Die Energie ist eine Zustandsgröße, die das in einem materiellen System enthaltene Arbeitsvermögen kennzeichnet





02 12 52-4
Schulpreis DDR 3,60