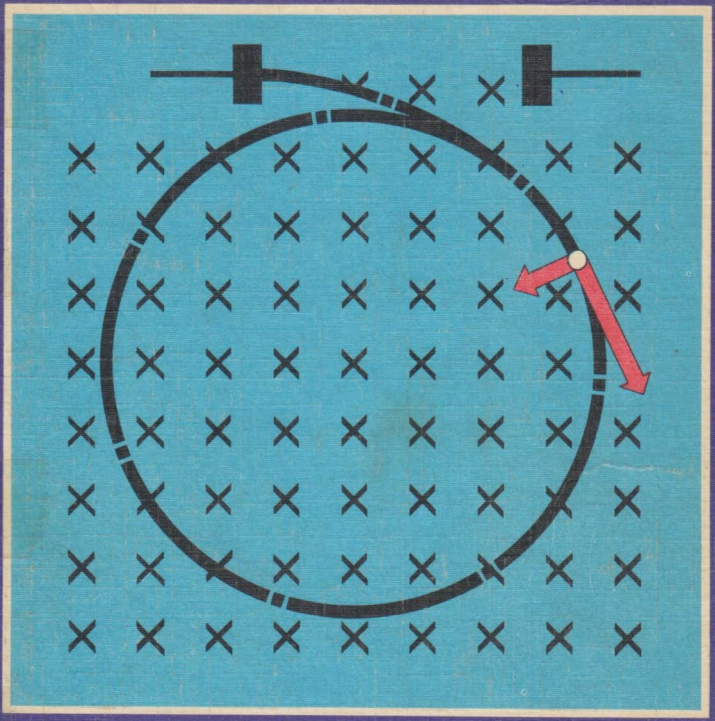
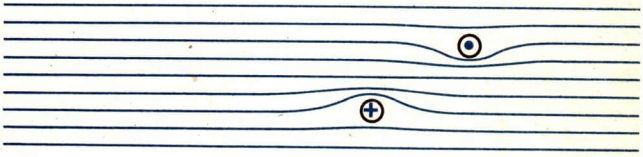


PHYSIK 12

PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 12



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1981

Autoren

Joachim Beyer	Mechanik: Kinematik von Translation und Rotation
Dipl.-Päd., Ing. Günter Meyer	Mechanik: Dynamik von Translation und Rotation
Dipl.-Päd. Helmut Holz	Elektrodynamik-Felder: Elektrostatisches Feld Magnetostatisches Feld
Dr. sc. Hans-Joachim Wilke	Elektrodynamik-Felder: Elektromagnetisches Feld
Prof. Dr. rer. nat. Manfred Wünschmann	Elektrische Leitungsvorgänge
Paul Schulze	Spezielle Relativitätstheorie
Dr. paed. Wieland Müller	Kernenergie

Redaktion: Günter Meyer

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

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1981
1. Auflage
Ausgabe 1981
Lizenz-Nr. 203/1000/80 (E 02 12 54-1)
LSV 0681
Zeichnungen: Heinrich Linkwitz
Einband: Manfred Behrend
Typografische Gestaltung: Hansmartin Schmidt
Printed in the German Democratic Republic
Satz: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97
Druck und Binden: VEB Druckerei Fortschritt Erfurt
Schrift: 9/10 p Gill Monotype
Redaktionsschluß: 20. 11. 1980
Bestell-Nr. 730 863 5
Schulpreis DDR: 3,60

Inhalt

Mechanik 7

Kinematik von Translation und Rotation 8

1 Zur Wiederholung 8
2 Denkmodelle 11
Massepunkt 11
Starrer Körper 12
3 Durchschnitts- und Momentanwerte physikalischer Größen 12
4 Die Bewegungsgesetze der Translation 16
Gleichförmige Bewegung 16
Gleichmäßig beschleunigte Bewegung 17
5 Ort-Zeit-Gesetze 18
6 Die Bewegungsgesetze der Rotation 22

Dynamik von Translation und Rotation 25

7 Einige Grundbegriffe der Mechanik 25
8 Winkelbeschleunigung und Drehmoment 27
Drehmoment und Winkelbeschleunigung 28
9 Winkelbeschleunigung und Trägheitsmoment 29
10 Rotationsenergie 34
11 Zusammenfassung 37

Elektrodynamik - Felder 39

Elektrostatisches Feld 40

12 Eigenschaften und Beschreibung elektrostatischer Felder 40
13 Betrachtungsweisen bei der Erklärung von elektrischen Wechselwirkungen 41
14 Die historische Entwicklung des Feldbegriffs 42
15 Das homogene elektrische Feld in einem Plattenkondensator 44
16 Arbeit bei der Beschleunigung von Elektronen im elektrischen Feld 45
17 Bestimmung der Elementarladung 46

Magnetostatisches Feld 47

18 Magnetische Felder von Dauermagneten und stromdurchflossenen Leitern 47
19 Kraft auf stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld 49

20 Die magnetische Flußdichte B 49
21 Magnetische Flußdichte für das homogene Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule 51
Stoffe im magnetischen Feld der Spule 52
22 Die Lorentzkraft 53
23 Die spezifische Ladung des Elektrons 54

Elektromagnetisches Feld 57

24 Die Induktionsspannung im zeitlich konstanten Magnetfeld 57
Bedingungen für die Erzeugung einer Induktionsspannung 58
Mathematische Beschreibung des Induktionsvorganges 60
25 Die Induktionsspannung im zeitlich veränderlichen Magnetfeld 62
Bedingungen für die Erzeugung einer Induktionsspannung 62
Mathematische Beschreibung des Induktionsvorganges 63
26 Das Induktionsgesetz 64
27 Die Induktivität einer Spule 65
28 Das Lenzsche Gesetz 67
29 Physikalisches Wirkungsprinzip von Generator, Motor und Transformator 68
Der Generator 69
Der Gleichstrommotor 70
30 Zusammenhang zwischen elektromotorischem Prinzip und Generatorprinzip 70
Der Transformator 72
31 Die Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder 73
32 Zusammenfassung 76

Elektrische Leitungsvorgänge 77

Leitungsvorgänge im zeitlich konstanten elektrischen Feld 78

33 Allgemeines Modell elektrischer Leitungsvorgänge 78
34 Ohmsches Gesetz und Widerstandsbegriff 82
35 Gesetze des Stromkreises mit mehreren Widerständen 84
Unverzweigter Stromkreis 84
Verzweigter Stromkreis 84
36 Zusammenfassung 85
37 Elektrische Meßgeräte im Stromkreis 86
Innenwiderstand 86
Meßgerechte Schaltung 86
38 Veränderliche Widerstände im Stromkreis 87

Leitungsvorgänge im elektrischen Wechselfeld 88

39 Allgemeines Leitungsmodell bei zeitlich veränderlichen Feldern 88
40 Zeitverlauf und Kenngrößen des Wechselstromes 89
41 Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis 90
42 Kondensator im Wechselstromkreis 90
43 Spule im Wechselstromkreis 93
44 Zusammenfassung 96
45 Besonderheiten im Zusammenwirken der Widerstände im Wechselstromkreis 97

Leitungsvorgänge bei veränderlicher Beweglichkeit und Konzentration der Ladungsträger 99

46 Bauelemente mit speziellen I-U-Kennlinien 99
Leitungsvorgang im Thermistor 100
47 Halbleiterdioden 102
48 Grenzen des Widerstandsbegriffs 104
49 Steuerbare elektronische Bauelemente 105
50 Röhrentrioden 106
51 Transistoren 107
52 Zusammenfassung 108
53 Anwendung elektronischer Bauelemente 110
Überlagerung und Trennung von Gleich- und Wechselströmen 110
Gleichrichtung einer Wechselspannung und Glättung der pulsierenden Gleichspannung 110
Signalverstärkung 111
Schwingungserzeugung 112

Spezielle Relativitätstheorie 113

Relativität von Zeit und Länge 114

54 Klassische Addition der Geschwindigkeiten 114
55 Das Michelson-Experiment 116
56 Die Relativität der Gleichzeitigkeit 118
57 Die Relativität der Zeit- und Längenmessung 118
58 Relativistische Addition der Geschwindigkeiten 120
59 Zusammenfassung 121

Masse-Energie-Beziehung 122

60 Die relativistische Massenveränderlichkeit 122
61 Die Masse-Energie-Beziehung 123
62 Die Paarzerstrahlung 124
63 Zusammenfassung 126

Kernenergie 127

Atomkerne und Kernreaktionen 128

64 Aufbau der Atomkerne 128
65 Kernkraft 130
Das Potentialtopfmodell 131
66 Kernbindungsenergie und Massedefekt 132
67 Philosophische Bemerkungen zum Begriff Massedefekt 134
Die Kernbindungsenergiekurve 134
68 Die Kernspaltung 135
69 Physikalisch-technische Voraussetzungen der Kernspaltung 137
70 Die Kernfusion 139
71 Physikalisch-technische Voraussetzungen einer gesteuerten Kernfusion 140

Gültigkeit der Erhaltungssätze bei kernphysikalischen Reaktionen 142

72 Der Energieerhaltungssatz 142
73 Der Ladungserhaltungssatz 143
74 Der Impuls- und Energieerhaltungssatz 143
75 Kernforschung in kapitalistischen Ländern 144
76 Nutzbarmachung der Kernenergie in der Sowjetunion 145

Aufgaben 147

Mechanik 147
Elektrodynamik-Felder 151
Elektrische Leitungsvorgänge 153
Spezielle Relativitätstheorie 155
Kernenergie 155

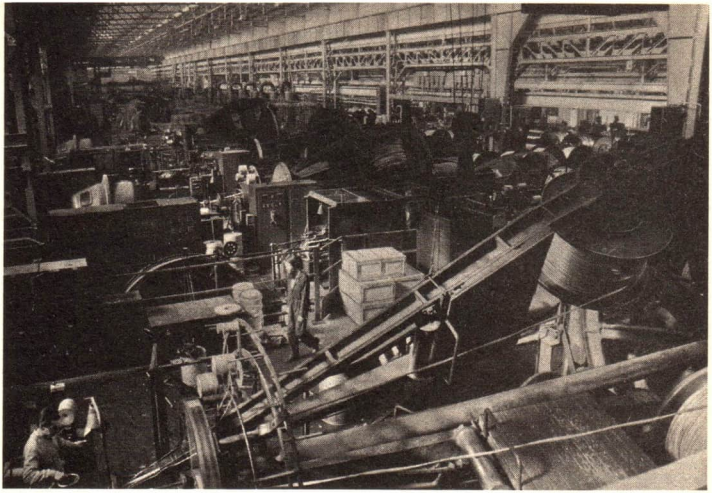
Lösungen 156

Mechanik
Elektrodynamik-Felder
Elektrische Leitungsvorgänge
Spezielle Relativitätstheorie
Kernenergie

Register 158

Bei den Bildnummern bedeutet die erste Zahl die Seite. Die zweite Zahl gibt an, das wievielte Bild von oben gemeint ist.
Im Abschnitt Aufgaben sind die Nummern der Fragen und Aufträge farbig gedruckt, für die eine Lösung angegeben ist.

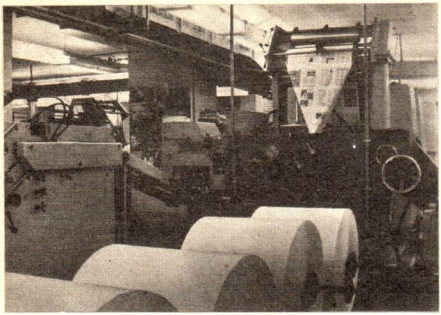
Im Lehrbuch verwendete Symbole
▼ Experimente ① Fragen und Aufträge
► Merksätze
■ Beispiele ↗ siehe



MECHANIK

Die Mechanik ist eines der am frühesten entwickelten Teilgebiete der Physik. Sie ist auch heute, unter den Bedingungen einer hochentwickelten Technik, von größter Bedeutung; denn das Zusammenwirken der einzelnen Teile einer jeden Maschine beruht immer auch auf der bewußten Anwendung von Grundgesetzen der Mechanik.

Die Mechanik kann man einteilen in die Statik, die Kinematik und die Dynamik. Die Kinematik ist die Lehre von den Bewegungen in bezug auf Ort und Zeit und ohne Berücksichtigung wirkender Kräfte. Die Dynamik ist die Lehre von den durch Kräfte hervorgerufenen Bewegungsänderungen. Im folgenden Stoffgebiet werden Bewegungen der Translation und der Rotation untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es zu verstehen, wie komplizierte mechanische Prozesse auf einfache, leicht erfaßbare physikalische Prozesse zurückgeführt werden können. Das charakterisiert die Naturwissenschaft Physik als eine Grundlage aller technischen Wissenschaften.



Kinematik von Translation und Rotation

Auf dieser Rotationsdruckmaschine wurde das Lehrbuch Physik Kl. 12 gedruckt. Das Druckpapier läuft als „endlose" Bahn zwischen mehreren Walzen hindurch, die das schwarze und das blaue Druckbild auftragen sowie den Andruck des Papiers an die Druckform und den Transport bewerkstelligen.

Beim Drucken auf Rotationsdruckmaschinen bewegt sich die Papierbahn geradlinig und zum Teil kreisbahnförmig zwischen rotierenden Walzen hindurch. Dabei hat die Geschwindigkeit der Papierbahn den gleichen Betrag wie die eines Punktes am Umfang der rotierenden Druckwalze. Anliegen des folgenden Abschnittes ist es, derartige Bewegungsabläufe, ihre physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge zu beschreiben. Dabei werden aus früheren Schuljahren bekannte Begriffe und Bewegungsgesetze wiederholt und mit Hilfe mathematischer Methoden präziser formuliert. Das führt zu tieferer Einsicht in die Zusammenhänge und zu umfassenderer Anwendbarkeit des physikalischen Wissens.

Zur Wiederholung 1

Aus dem Physikunterricht ist bekannt: Mechanische Bewegung ist die Änderung der Lage eines Körpers gegenüber einem anderen Körper. Diesen anderen Körper, relativ zu dem die Lageänderung betrachtet wird, bezeichnet man als **Bezugskörper**. Zusammen mit einer Uhr zur Zeitmessung bildet er das **Bezugssystem**.
Bei den Experimenten im Unterrichtsraum ist der Experimentiertisch, in vielen anderen Fällen die Erde der Bezugskörper.
Die Kiste auf dem Transportband (Bild 9/1) führt eine **geradlinige** Bewegung aus, eine **Translation**. Die Änderung der Lage des Körpers besteht hier in einer Verschiebung des ganzen Körpers von einem Ort zu einem anderen. In einer bestimmten Zeit t werden alle Punkte der Kiste um die gleiche Strecke s parallel verschoben. Eine solche Parallelverschiebung aller körperfesten Punkte um die gleiche Strecke s in der Zeit t ist charakteristisch für die Translation. (1)

Der Bewegungszustand des Körpers kann durch die **Geschwindigkeit** v beschrieben werden, die im Sonderfall der gleichförmigen Bewegung gleich dem Quotienten aus einer beliebigen Strecke s und der zugehörigen Zeit t ist.

$$v = \frac{s}{t} \tag{1}$$

Ändert sich in einer Zeitspanne Δt die Geschwindigkeit gleichmäßig um Δv, so beschreibt man diese Änderung durch die **Beschleunigung** a, und es gilt

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \tag{2}$$

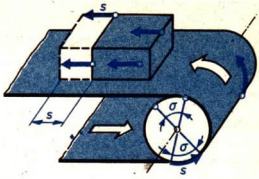
Die Parallelverschiebung der Kiste um den Weg $\vec{s}$, ihre Geschwindigkeit $\vec{v}$ und die Beschleunigung $\vec{a}$ sind vektorielle Größen und als solche durch Betrag und Richtung bestimmt. Hier und im folgenden werden jedoch nur Translationen mit vorgegebener Richtung betrachtet. Die Symbole s, v, a bezeichnen die Koordinaten dieser Vektorgrößen in bezug auf die Bewegungsrichtung (vgl. Seite 19).
Bei der Translation eines Körpers bewegen sich alle seine Punkte mit der gleichen Momentangeschwindigkeit, sie erfahren auch zu jedem Zeitpunkt die gleiche Beschleunigung. Während das Transportband mit der Kiste eine Translation ausführt, vollführt die Antriebsrolle eine **drehende** Bewegung, eine **Rotation**. Die Antriebsrolle bewegt sich nicht von einem Ort zu einem anderen, sie verbleibt an der gleichen Stelle im Raum. Die Änderung der Lage des Körpers besteht hier in einer Drehung der Rolle um ihre Achse. Dabei beschreibt jeder Punkt der Rolle (mit Ausnahme der auf der Achse liegenden Drehpunkte) eine kreisförmige Bahn. Alle Punkte, die auf gleichem Radius liegen, durchlaufen in der gleichen Zeit t das gleiche Kreisbogenstück s. Alle Punkte der Rolle (mit Ausnahme der Drehpunkte) durchlaufen in der gleichen Zeit t den gleichen Drehwinkel σ. ②

Bild 9/1 macht deutlich: Dieses Kreisbogenstück s_{Kreis} ist genauso lang wie der geradlinig zurückgelegte Weg s_{Kiste} der Kiste auf dem Band, man braucht also zwischen beiden nicht zu unterscheiden:

$$s = s_{Kreis} = s_{Kiste}$$

In Analogie zur Geschwindigkeit v bei der Translation beschreibt man den Bewegungszustand des Drehkörpers durch die **Winkelgeschwindigkeit** ω, für die bei gleichförmiger Drehbewegung gilt

$$\omega = \frac{\sigma}{t}. \tag{3}$$



9/1 Die Bewegung einer Kiste auf einem Förderband läßt den Zusammenhang von Translation und Rotation erkennen

---

① Geben Sie an, wo an einem Fahrrad, an einer Lokomotive, an einer Drehmaschine, einer Hobelmaschine, einem Karussell, einem Sägegatter Translation auftritt!

② Geben Sie für verschiedene Beispiele an, wo Rotation auftritt!

Ändert sich in einer Zeitspanne Δt die Winkelgeschwindigkeit gleichmäßig um $\Delta\omega$, so beschreibt man diese Änderung mit der **Winkelbeschleunigung** α, und es gilt

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \qquad (4)$$

Bei der Rotation eines starren Körpers haben alle seine Punkte stets die gleiche Winkelgeschwindigkeit, und es erfahren auch zu jedem Zeitpunkt alle diese Punkte die gleiche Winkelbeschleunigung.
In vielen Fällen sind kompliziertere Körperbewegungen aus beiden Bewegungen zusammengesetzt. So rotiert ein Bohrer um seine Längsachse und vollführt gleichzeitig eine translatorische Vorschubbewegung. ①

Bei Drehbewegungen wird der Winkel im Bogenmaß gemessen, d. h. durch das Verhältnis aus Kreisbogen s und Radius r (Bild 10/1).

$$\sigma = \frac{s}{r} \qquad (5)$$

Einheit ist $1\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{m}^{-1} = 1$ rad (Radiant), 1 rad $\approx 57{,}3°$

Nach der Definition (5) kann die Einheit rad in jedem Falle durch die Zahl 1 ersetzt werden, der Winkel wird dann als Zahl ohne jede Benennung geschrieben. Dieses Weglassen der Einheit rad bedeutet jedoch einen gewissen Informationsverlust. Diesen nimmt man in Kauf, wenn aus dem Zusammenhang eindeutig klar wird, daß mit der Zahl eine Winkelangabe gemeint ist. ②

Aus dem Beispiel Transportband kann man erkennen: Falls kein Schlupf auftritt, bewegt sich die Kiste gleichförmig auf dem Band in einer bestimmten Zeit genau so weit in gerader Linie wie ein Punkt auf dem Umfang der Rolle im Kreisbogen. Durch Einsetzen von (5) in (3) ergibt sich

$$\omega = \frac{s}{t \cdot r} \qquad (6)$$

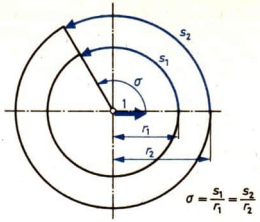
und mit (1) erhält man

$$\omega = \frac{v}{r}.$$

Diese Gleichung ist allgemeingültig und beschreibt den Zusammenhang (Bild 10/3) von

► **Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit**

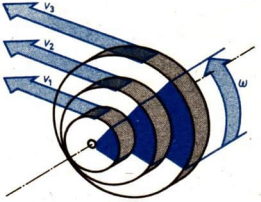
Die Gleichheit der Wege auf dem geradlinigen Teil des Transportbandes und auf dem Kreisbogen wurde aus Bild 9/1 deutlich. Genauso hat die Geschwindigkeit der Kiste auf dem Band den gleichen Betrag wie die Umfangsgeschwindigkeit eines beliebigen Punktes der Rolle.
Vor allem bei gleichförmiger Rotation verwendet man oft noch andere Größen, um den Bewegungszustand zu charakterisieren:



10/1 Drehwinkel

Tabelle 10/2

Winkel im Gradmaß	Winkel im Bogenmaß
360°	$2\pi \approx 6{,}28$
....	π
90°	....
....	1
45°	....
30°	....
1°	....



10/3 Stufenscheibe
Bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ω ist die Bahngeschwindigkeit v dem Radius r proportional

$$v = \omega \cdot r \qquad (7)$$

– Die Zeit für eine Umdrehung nennt man die **Umlaufzeit** T
– Der Quotient aus einer Anzahl Umläufe und der dafür benötigten Zeit wird **Drehzahl** n genannt.

Es gilt

$n = \frac{1}{T}$ (8)	$\omega = \frac{2\pi}{T}$ (9)	$\omega = 2\pi \cdot n$ (10)

Denkmodelle 2

Im vorigen Abschnitt wurden die Translation und die Rotation realer Körper betrachtet. In der Physik ist es üblich, von vielen Einzelheiten der untersuchten Objekte zu abstrahieren und die komplizierte, vielgestaltige Realität durch ein vereinfachtes Denkmodell zu ersetzen.
Solche Denkmodelle sind wertvolle Hilfsmittel bei der Erkenntnisgewinnung. Lenin schrieb: „Die Abstraktion der Materie, des Naturgesetzes, des Wertes usw., mit einem Worte, alle wissenschaftlichen (richtigen, ernst zu nehmenden, nicht unsinnigen) Abstraktionen spiegeln die Natur tiefer, getreuer, vollständiger wider."
So sind beispielsweise bekannt: Aus der Thermodynamik das Denkmodell ideales Gas, aus der Optik das Denkmodell Lichtstrahl, aus der Mechanik das Denkmodell Massepunkt. Dieses Denkmodell erwies sich als besonders geeignet zur Beschreibung vieler Bewegungsvorgänge.

Massepunkt. Dieses Denkmodell ist sinnvoll und richtig anzuwenden,

– wenn reine Translation vorliegt. Da sich dann alle Punkte gleich bewegen, kann einer als repräsentativ herausgegriffen werden.
  Dieser Punkt kann der Schwerpunkt des Körpers sein.
– wenn Drehungen des Körpers nicht beschrieben werden sollen.

Durch die Angabe eines Punktes abstrahiert man von den Abmessungen des Körpers, seiner Form usw. und berücksichtigt nur den Ort, an dem er sich jeweils befindet. Diesem Punkt ordnet man die Masse des Körpers zu. Mit diesem Modell erfaßt man Lage und Trägheit als die hier wesentlichen Merkmale des Körpers. ③

In vielen Fällen ist eine exakte physikalische Beschreibung mit diesem Modell jedoch nicht möglich, und es macht sich der Übergang zu einem anderen Denkmodell erforderlich.

---

① Analysieren Sie die Bewegungen eines rollenden Rades, eines Artilleriegeschosses, der Teile eines Verbrennungsmotors, des Kabels in der Verseilmaschine (S. 7)!
Suchen Sie selbst weitere Beispiele solcher zusammengesetzter Bewegungen!
② Ergänzen Sie die Tabelle 10/2!
③ Ein anfahrender Eisenbahnzug wird mit dem Denkmodell Massepunkt beschrieben. Nennen Sie Eigenschaften des Zuges, von denen man dabei abstrahiert!

Starrer Körper. Dieses Denkmodell

- kann (aber muß nicht) angewendet werden bei reiner Translation. Die Beschreibungen werden dann etwas komplizierter als mit dem Denkmodell Massepunkt.
- muß angewendet werden bei reiner Rotation und bei Kombinationen von Translation und Rotation. Das Denkmodell Massepunkt genügt in diesen Fällen nicht.

Der Körper ändert nur seine Orientierung gegenüber anderen Körpern im Raum, er ändert dabei nicht seine Gestalt. Die Teilchen des Körpers bilden ein makrophysikalisches System miteinander starr verbundener Massepunkte. Bei der Rotation durchlaufen diese alle in der gleichen Zeit den gleichen Drehwinkel, bewegen sich also mit gleicher Winkelgeschwindigkeit.
Jede gedankliche Vereinfachung wird natürlich nur unter gewissen Gesichtspunkten vorgenommen. Manche Seiten des Objektes erscheinen wesentlich und bilden die Grundlage der Modellbildung, andere entfallen bei der Abstraktion. Zur wissenschaftlichen Arbeit gehört demnach unter allen Umständen die kritische Einschätzung der angewendeten Methoden und der Ergebnisse sowie deren Überprüfung in der Praxis. Bestätigungsexperimente und die technische Anwendbarkeit zeigen die Richtigkeit physikalischer Erkenntnisse. ①

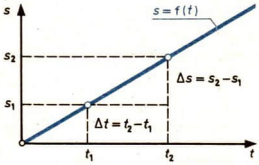
Bei allen Translationen, Rotationen oder zusammengesetzten Bewegungen sind sowohl freie Bewegungen im Raume als auch mehr oder minder zwangsläufig geführte Bewegungen möglich. Auf genaue Beschreibung zusammengesetzter Bewegungen soll hier verzichtet werden.
Als Beispiele zwangsläufig geführter Bewegungen seien genannt:

Translation: Die Bewegung eines Eisenbahnzuges längs der Strecke.

Rotation: Die Drehung eines Turbinenläufers um seine körper- und raumfest gelagerte Achse.

Durchschnitts- und Momentanwerte physikalischer Größen 3

Die Definitionsgleichung (1) der Geschwindigkeit gilt **nur** für gleichförmige Bewegungen. Es reicht jedoch nicht aus, wenn ein allgemein anzuwendender Begriff nur für einen Sonderfall definiert wird. Soll die Definitionsgleichung in allen Fällen gültig sein, so muß in ihr auch eine Veränderlichkeit der definierten Größe Berücksichtigung finden. Das ist exakt nur möglich mit den Mitteln der Infinitesimalrechnung. Der Weg der Betrachtung soll am Beispiel der Definition des Momentanwertes der Geschwindigkeit ausführlich dargelegt werden.



12/1 Weg-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung

Bei einer Translation legt ein Körper (Massepunkt) im Laufe der Zeit einen Weg zurück. Dabei besteht eine eindeutige Zuordnung zwischen diesen beiden Größen. Der Weg s läßt sich als Funktion der Zeit t mathematisch beschreiben. Diese Funktion kann man durch eine Tabelle gemessener Wertepaare, durch ein Weg-Zeit-Diagramm oder auch durch eine Funktionsgleichung der allgemeinen Form $s = f(t)$ darstellen.
Bei gleichförmigen Bewegungen ist der zurückgelegte Weg der abgelaufenen Zeit proportional (Bild 12/1), das heißt, der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der dazugehörigen Zeit ist konstant.

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

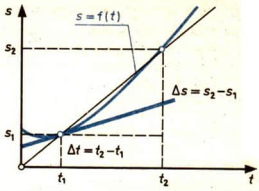
$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

Da der Graph der Funktion $s = f(t)$ durch den Koordinatenursprung verläuft, ist auch ablesbar

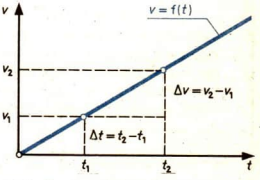
$$v = \frac{s_1}{t_1}, \quad v = \frac{s_2}{t_2} \text{ und allgemein}$$

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

Im Falle ungleichförmiger Bewegungen hat der Quotient aus zurückgelegtem Weg und der zugehörigen Zeitspanne die Bedeutung der Durchschnittsgeschwindigkeit des betrachteten Bewegungsablaufes (Bild 13/1). Man erhält für jeden beliebigen Teilabschnitt die



13/1 Weg-Zeit-Diagramm einer ungleichförmigen Bewegung



13/2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung

► **Durchschnittsgeschwindigkeit**

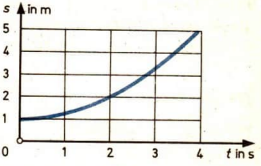
$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad (11)$$

$$\bar{v} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

Denkt man sich nun den Zeitpunkt t_2 an den Zeitpunkt t_1 immer dichter herangerückt, so nähert sich die Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ mehr und mehr der Momentangeschwindigkeit v im Zeitpunkt t_1. Mathematisch bedeutet das den Grenzübergang

$$v = \lim_{t_2 \to t_1} \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}; \quad v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}; \qquad ②$$

$$v = \frac{ds}{dt}.$$



13/3 Weg-Zeit-Diagramm einer ungleichförmigen Bewegung

① Nennen Sie mechanische Vorgänge, die weder mit dem Denkmodell Massepunkt noch mit dem Modell starrer Körper exakt beschreibbar sind!

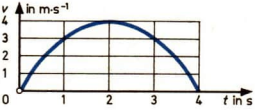
② Welche geometrische Bedeutung hat die Ableitung einer Funktion? Bestimmen Sie aus dem Diagramm (Bild 13/3) zu den Zeitpunkten 0; 1 s; 2 s; 3 s; 4 s die Augenblicksgeschwindigkeiten! Verwenden Sie ein lichtdurchlässiges Lineal, um die Tangente an die Kurve anzulegen!
Beschreiben Sie den durch das Diagramm dargestellten Bewegungsablauf mit Worten!

► **Die Geschwindigkeit ist eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand eines Körpers bzw. Massepunktes charakterisiert.** Sie ist definiert als Ableitung des Weges nach der Zeit.

$$v = \frac{ds}{dt} \qquad (12)$$

Einheit der Geschwindigkeit ist $1\ m \cdot s^{-1}$.

Der Begriff **Beschleunigung** ist in Klasse 9 nur für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen verwendet worden. Durch prinzipiell gleichartige Gedankengänge wie oben kann man diesen Begriff für eine beliebige Bewegung definieren (Bilder 13/3 und 14/2): ① ②



14,1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm

► **Die Beschleunigung ist eine physikalische Größe, welche die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers bzw. Massepunktes charakterisiert.** Sie ist definiert als Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit.

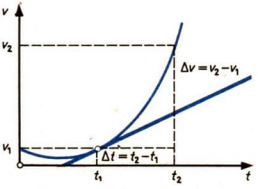
$$a = \frac{dv}{dt} \qquad (13)$$

Einheit der Beschleunigung ist $1\ m \cdot s^{-2}$.

Der Grundgedanke der beschriebenen Methode läßt sich verallgemeinern. Eine beliebige physikalische Größe, im folgenden mit G bezeichnet, ändere sich im Laufe der Zeit. Diese Zeitabhängigkeit von G läßt sich mit Hilfe der Funktion $G = f(t)$ mathematisch beschreiben. Ein Differenzenquotient

$$\frac{G_2 - G_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta G}{\Delta t} \qquad (14)$$

charakterisiert den durchschnittlichen Grad der zeitlichen Änderung dieser Größe im Zeitintervall Δt. Ein Differentialquotient dG/dt beschreibt den momentanen Grad der zeitlichen Änderung, die Änderungsgeschwindigkeit.
Überträgt man diese aus der Translation gewonnene Erkenntnis auf die Rotation, dann muß die



14/2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer ungleichmäßig beschleunigten Bewegung

Durchschnitts-Winkelgeschwindigkeit

$$\bar{\omega} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{t_2 - t_1}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \qquad (15)$$

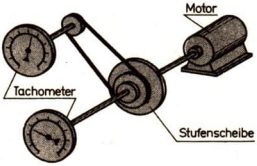
sein. Ganz entsprechend ist die

Durchschnitts-Winkelbeschleunigung

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}. \qquad (16)$$

Für $t_2 \rightarrow t_1$ ergeben sich dann die Momentanwerte als Ableitungen.



14,3 Experimentelle Untersuchung zu $v = \omega \cdot r$. Mit den Tachometern werden die Bahngeschwindigkeit v und die Winkelgeschwindigkeit ω gemessen, an der Stufenscheibe sind unterschiedliche Radien einstellbar. Verwendet man an Stelle der Stufenscheibe einen konischen Körper, ist der Radius stufenlos verstellbar.

► **Die Winkelgeschwindigkeit ist eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand eines rotierenden Körpers charakterisiert.** Sie ist definiert als Ableitung des Drehwinkels nach der Zeit.

$$\omega = \frac{d\sigma}{dt} \qquad (17)$$

Einheit der Winkelgeschwindigkeit ist $1\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1} = 1\ \text{s}^{-1}$.

► **Die Winkelbeschleunigung ist eine physikalische Größe, die die Änderung des Bewegungszustandes eines rotierenden Körpers charakterisiert.** Sie ist definiert als Ableitung der Winkelgeschwindigkeit nach der Zeit.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \qquad (18)$$

Einheit der Winkelbeschleunigung ist $1\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-2} = 1\ \text{s}^{-2}$.

Am Förderband (Bild 9/1) ist die Geschwindigkeit v des Bandes gleich der Geschwindigkeit eines Punktes auf dem Umfang der Antriebsrolle, und es gilt $v = \omega \cdot r$.
Differentiation dieser Gleichung nach t führt auf

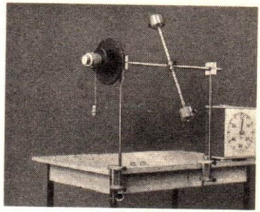
$$\frac{dv}{dt} = \frac{d(\omega \cdot r)}{dt}, \text{ und da } r = \text{konstant ist,}$$

$$\frac{dv}{dt} = r\frac{d\omega}{dt}$$

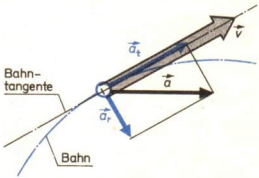
d. h. man erhält für die

Tangentialbeschleunigung $a_t = \alpha \cdot r.$ (19)

Diese Gleichung ermöglicht, Winkelbeschleunigungen aus Bahnbeschleunigungen zu errechnen. Da bei der Translation die Beschleunigung oft einfach zu messen ist, wird in den Experimenten M 1 und M 2 die Gleichung (19) zur Bestimmung von Winkelbeschleunigungen benutzt (Bild 15/1).
Es ist notwendig, die Tangentialbeschleunigung a_t von der Radialbeschleunigung a_r zu unterscheiden. Im Unterricht der Klasse 9 wurde begründet, daß bei Kreisbewegung eines Körpers die Radialbeschleunigung auftritt, d. h. eine Radialkraft den Körper auf die Kreisbahn zwingt. Bei der dort ausschließlich behandelten gleichförmigen Kreisbewegung ist die Tangentialbeschleunigung $a_t = 0$. Bei der Bewegung eines Massepunktes auf beliebig gekrümmter Bahn und auch bei der beschleunigten Rotation eines drehbar gelagerten starren Körpers treten sowohl Tangential- als auch Radialbeschleunigungen an den Teilen des Körpers auf (Bild 15/2).



15/1 Experimentaufbau zur Bestimmung der Winkelbeschleunigung



15/2 Tangentialbeschleunigung und Radialbeschleunigung

---

① Ermitteln Sie aus dem Diagramm (Bild 14/1) zu jeder vollen Sekunde die Augenblicksbeschleunigung! Beschreiben Sie den dargestellten Bewegungsablauf mit Worten!

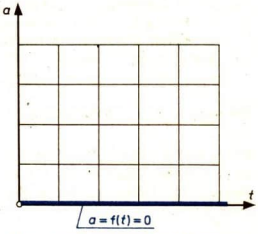
② Erläutern Sie an Hand der Bilder 13/2 und 14/2 in der Anwendung des Beschleunigungsbegriffes den gedanklichen Übergang von gleichmäßig beschleunigten Bewegungen zu beliebigen Bewegungen!

Die Bewegungsgesetze der Translation 4

In Klasse 9 wurden die Bewegungsgesetze für einfachste Bewegungen auf induktivem Wege aus experimentellen Untersuchungen gefunden. Die gleichen Gesetze sollen jetzt in allgemeinerer Form aus den Definitionsgleichungen der Geschwindigkeit und der Beschleunigung sowie aus dem Newtonschen Grundgesetz deduktiv hergeleitet werden. Dazu werden Arbeitsmethoden der theoretischen Physik angewendet. Hier sei allerdings nochmals betont: Sowohl die Definitionen als auch das Grundgesetz der Mechanik ergeben sich letzten Endes aus Beobachtungen und Messungen. Auch die abstrakte Theorie stellt eine wissenschaftliche Widerspiegelung der Realität dar und findet in Gestalt von quantitativen Naturbeschreibungen, technischen Berechnungen und wissenschaftlichen Prognosen ihre konkrete Anwendung in der Praxis.

Gleichförmige Bewegung. Wirken auf einen in Bewegung befindlichen Körper keine Kräfte (vgl. Trägheitsgesetz), so ist nach dem Newtonschen Grundgesetz der Mechanik in diesem Falle $m \cdot a = 0$.
Da für jeden Körper $m > 0$ ist, muß demnach $a = 0$ sein.

Bei kräftefreier Bewegung ist die Beschleunigung Null: Das ist eine **gleichförmige Bewegung** (Bild 16/1).



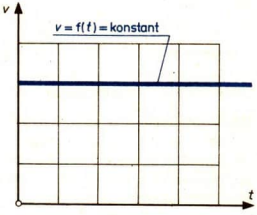
16/1 Beschleunigung-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung

Die Beschleunigung ist definiert als Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit. Aus bekannter Ableitung kann man durch Integration die Stammfunktion ermitteln.

Aus $a = 0$; $a = \frac{dv}{dt}$ und $\frac{dv}{dt} = 0$ erhält man somit

$$v = f(t) = \text{konstant}. \tag{20}$$

Dies ist das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung (Bild 16/2).



16/2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung

Die Definitionsgleichung (12) kann man umformen

$$ds = v \cdot dt. \tag{21}$$

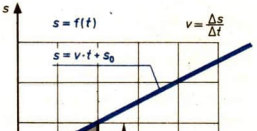
Durch nochmalige Integration erhält man

$$\int ds = \int v \cdot dt. \tag{22}$$

Führt man diese Integration aus, so ergibt sich

$$s = v \cdot t + c. \tag{23}$$

Diese Funktionsgleichung gilt für alle Zeitpunkte t der gleichförmigen Bewegung, also auch für den Zeitpunkt $t_0 = 0$, den Anfang. Aus (23) erkennt man, daß die Integrationskonstante c die zu $t_0 = 0$ gehörige Wegstrecke $s = s_0$ angibt, also den Anfangspunkt der gleichförmigen Bewegung (Bild 16/3). ① ② ③



16/3 Weg-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung

Die Bewegungsgesetze der gleichförmigen Bewegung sind

► **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz**	$v = f(t) = \text{konstant}$ (20)
Weg-Zeit-Gesetz	$s = f(t) = v \cdot t + s_0$ (24)

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Wirkt auf einen Körper eine konstante Kraft in Wegrichtung, so bewegt er sich gleichmäßig beschleunigt geradlinig. Nach dem Newtonschen Grundgesetz der Mechanik ist in diesem Falle

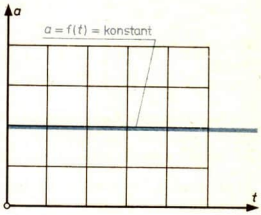
$$m \cdot a = \text{konstant} \neq 0. \qquad (25)$$

Da die Masse eines Körpers als unveränderlich und ungleich 0 angesehen werden kann, ist also auch $a = \text{konstant} \neq 0$ (Bild 17/1).
Aus Gleichung (13) folgt

$$dv = a \cdot dt. \qquad (26)$$

Durch Integration und Berücksichtigung der Anfangsbedingungen ergibt sich hieraus

$$v = f(t) = a \cdot t + v_0. \qquad (27)$$



17/1 Beschleunigung-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Bei Bewegung unter Einwirkung einer konstanten Kraft in Wegrichtung ist
- **die Beschleunigung konstant,**
- **die Geschwindigkeitsänderung der Zeit proportional:**
  Das ist eine **gleichmäßig beschleunigte Bewegung.**

Dies ist das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz. Mit dessen Hilfe und der Definitionsgleichung (12) läßt sich das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung herleiten:

In $ds = v \cdot dt$

wird (27) eingesetzt

$$ds = (a \cdot t + v_0)\, dt. \qquad (28)$$

Durch Integration

$$\int ds = \int (a \cdot t + v_0)\, dt$$

folgt $$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + c. \qquad (29)$$

Die physikalische Bedeutung der Integrationskonstante c erkennt man auch hier, wenn man bedenkt, daß die Funktionsgleichung (29) auch für den Zeitpunkt $t_0 = 0$ gilt; denn dann ist $s_0 = c$.

---

① Skizzieren Sie Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme für langsame und schnelle, vorwärts und rückwärts verlaufende gleichförmige Bewegungen!

② Der Graph der Funktion $s = f(t)$ für die gleichförmigen Bewegungen im Weg-Zeit-Diagramm ist eine Gerade. Was bedeutet es, wenn diese Gerade mehr oder weniger steil ansteigt, horizontal verläuft oder fällt?

③ Welchen Sinn hat es, ein Stück dieser Geraden im 2., 3. oder 4. Quadranten zu zeichnen?

Die Bewegungsgesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung sind

► **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz** $v = f(t)$

Weg-Zeit-Gesetz $s = f(t)$

$$v = a \cdot t + v_0 \qquad (27)$$

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0 \qquad (30)$$

Aus dem Unterricht sind die Bewegungsgesetze in vereinfachter Form bekannt:

$$\left.\begin{aligned} v &= \text{konstant} \\ s &= v \cdot t \end{aligned}\right\} \text{für die gleichförmige Bewegung}$$

und

$$\left.\begin{aligned} v &= a \cdot t \\ s &= \frac{1}{2} a \cdot t^2 \end{aligned}\right\} \text{für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung.}$$

Die hergeleiteten Bewegungsgesetze (20) (24) (27) (30) haben einen umfassenderen Gültigkeitsbereich. Sie sind aber auch aus den bekannten vereinfachten Gesetzen zu gewinnen. ①

Angenommen, ein Körper bewegt sich anfangs gleichförmig mit der Geschwindigkeit v_0 und wird dann zusätzlich gleichmäßig beschleunigt, so erfährt er in einer Zeitspanne t den Geschwindigkeitszuwachs $a \cdot t$, und die resultierende Geschwindigkeit ist

$$v = a \cdot t + v_0 .$$

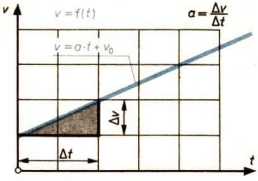
Das ist die Gleichung (27). Wenn nun der Beschleunigungsvorgang an der Stelle s_0 beginnt, ist der resultierende Weg (Bild 18/2) gleich der Summe aus s_0, dem gleichförmig mit v_0 zurückgelegten Weg $v_0 \cdot t$ und dem beschleunigt zurückgelegten Weg $\frac{1}{2} a \cdot t^2$:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$$

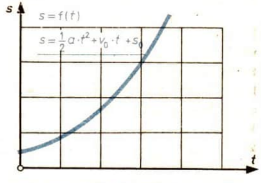
in Übereinstimmung mit Gleichung (30). ②

Ort-Zeit-Gesetze 5

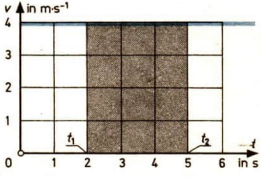
Es gibt in der Praxis viele Fälle, in denen der zurückgelegte Weg weniger von Interesse ist als der Ort, an dem der bewegte Körper sich zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet. So muß bei der Kontrolle der Bahnkurve eines Raumschiffes oder bei der Lenkung einer Flugabwehrrakete unserer NVA im Leitstand jederzeit der momentane Aufenthaltsort des Flugkörpers bekannt sein, um danach weitere Flugmanöver einleiten zu können. Dieser Aufenthaltsort verändert sich im Laufe der Zeit. Wenn es gelingt, die im Raum verlaufende Bahnkurve durch Ort-Zeit-Gesetze zu erfassen, dann werden diese sich als aussagekräftiger und zweckmäßiger erweisen als die Weg-Zeit-Gesetze.



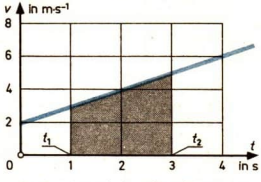
18/1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung



18/2 Weg-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung



18/3 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm



18/4 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm

Im Bild 19/2 legt ein Körper im Raum den geraden Weg s vom Punkt P_1 zum Punkt P_2 zurück. Die Ortsvektoren der Punkte sind

$\overrightarrow{OP}_1(x_1; y_1; z_1)$ und $\overrightarrow{OP}_2(x_2; y_2; z_2)$.

Ebenso wie für die Punkte ist auch für den Weg s eine Koordinatendarstellung möglich:

$\vec{s}(s_x; s_y; s_z) = \vec{s}[(x_2 - x_1); (y_2 - y_1); (z_2 - z_1)]$.

In gleicher Weise sind für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung Koordinatendarstellungen möglich:

$\vec{v}(v_x; v_y; v_z)$ und (31)

$\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$. (32)

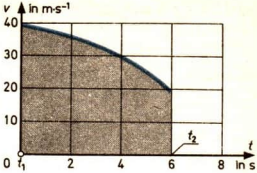
Für die x-Koordinate des bewegten Punktes gilt dann im Falle gleichförmiger Bewegung

$$x = f(t) = v_x \cdot t + x_0 \quad (33)$$

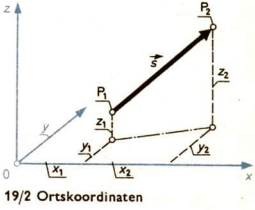
und im Falle gleichmäßig beschleunigter Bewegung

$$x = f(t) = \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 + v_{0x} \cdot t + x_0. \quad (34)$$

Die Koordinatensysteme sind nicht naturgegeben, sondern sie werden vom Beobachter in der Absicht festgelegt, mit ihrer Hilfe die Vorgänge zu beschreiben. Hier werden nur geradlinige Bewegungen betrachtet. Die Bewegungsrichtung liegt also fest, und es ist zweckmäßig und einfach, die x-Achse des Koordinatensystems in die Bewegungsrichtung zu legen. Dann kann man auf die y- und z-Koordinaten ganz verzichten und erhält



19/1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm



19/2 Ortskoordinaten

► **Ort-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung**
$x = f(t)$

$$x = v_x \cdot t + x_0 \quad (35)$$

Ort-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung
$x = f(t)$

$$x = \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 + v_{0x} \cdot t + x_0 \quad (36)$$

③ ④

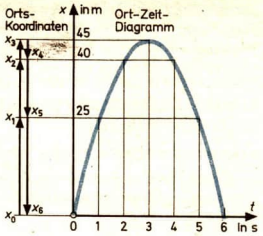
① Jede gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist durch die Parameter s_0, v_0 und a charakterisiert. Überlegen Sie, welchen Verlauf die Graphen der Funktion $s = f(t)$ bzw. $v = f(t)$ im Weg-Zeit-Diagramm bzw. im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für bestimmte Werte (kleine, große, Null, negative) haben! Beschreiben Sie in jedem Falle den Bewegungsablauf in Worten!

② Die Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes läßt erkennen: Der zwischen t_1 und t_2 zurückgelegte Weg ist gegeben durch das Integral $s_{1,2} = \int_{t_1}^{t_2} v \cdot dt$.
Welche Beziehung hat dieses Integral zum Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm? Ermitteln Sie aus den drei Diagrammen (Bilder 18/3 bis 19/1) den zurückgelegten Weg! Welche Bewegungsarten liegen in den drei Fällen vor? Ermitteln Sie aus den Diagrammen auch die Anfangs- und die Endbeschleunigung!
Beschreiben Sie die Bewegungsabläufe in Worten!

③ Entwerfen Sie ein Experimentierprogramm, mit dem man die deduktiv gefundenen Bewegungsgesetze experimentell bestätigen könnte!

④ Geben Sie für das Ort-Zeit-Gesetz (36) die physikalische Bedeutung der drei Summanden an!

■ Ein Körper wird von der Höhe $x_0 = 0$ mit der Anfangsgeschwindigkeit $v_{0x} = 30\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ nach oben geworfen. Er unterliegt der Fallbeschleunigung ($g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$). Wann befindet er sich in 25 m Höhe?



20/1 Ort-Zeit-Diagramm eines lotrechten Wurfes aufwärts

Gegeben:

$x_0 = 0$

$v_{0x} = 30\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$a_x = -g$

$= -10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

$x = 25\ \mathrm{m}$

Gesucht:

t

Lösung:

Aus

$$x = \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 + v_{0x} \cdot t + x_0$$

ergibt sich mit $x_0 = 0$

$$0 = \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 + v_{0x} \cdot t - x.$$

Diese quadratische Gleichung wird durch $\frac{1}{2} a_x$ dividiert:

$$0 = t^2 + \frac{2v_{0x}}{a_x} t - \frac{2x}{a_x}.$$

Mit der allgemeinen Lösungsformel der quadratischen Gleichung folgt hieraus:

$$t_{1,2} = -\frac{v_{0x}}{a_x} \pm \sqrt{\left(\frac{v_{0x}}{a_x}\right)^2 + \frac{2x}{a_x}}.$$

Nun setzt man die gegebenen Größenwerte ein:

$$t_{1,2} = -\frac{30\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{-10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}} \pm \sqrt{9\ \mathrm{s^2} + \frac{2 \cdot 25\ \mathrm{m}}{-10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}}}$$

$$t_{1,2} = 3\ \mathrm{s} \pm \sqrt{9\ \mathrm{s^2} - 5\ \mathrm{s^2}}$$

$$t_{1,2} = 3\ \mathrm{s} \pm 2\ \mathrm{s}$$

Und die Lösung der quadratischen Gleichung ist

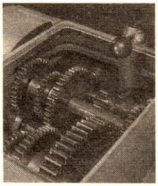
$$\underline{\underline{t_1 = 1\ \mathrm{s}}}$$

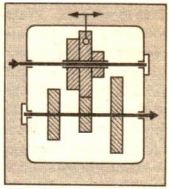
$$\underline{\underline{t_2 = 5\ \mathrm{s}.}}$$

Der Körper erreicht zweimal die Höhe von 25 m, das erste Mal beim Aufstieg nach 1 s, das zweite Mal beim Herabfallen 5 s nach dem Abwurf.
Beim ersten Male hat er einen Weg $s_1 = 25$ m zurückgelegt. Er steigt dann zum Gipfel der Bewegung auf, fällt wieder herab und hat insgesamt $s_2 = 65$ m durchlaufen, wenn er erneut die Höhe von 25 m erreicht.

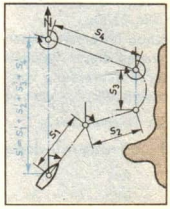
Anwendungsbeispiele zur Kinematik

Schaltgetriebe. Um an der Arbeitsspindel einer Werkzeugmaschine verschiedene Drehzahlen zu erhalten, muß zwischen den Motor mit konstanter Drehzahl und der Arbeitsspindel ein Schaltgetriebe eingefügt werden. Auf Grund der zwar gleichen Winkelgeschwindigkeit, aber des ungleichen Radius der verschiedenen, auf der Eingangswelle sitzenden Schalträder erhält man je nach Schaltstellung unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten und damit unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten der Gegenräder auf der Antriebswelle.

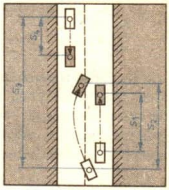




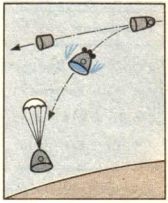
Standortbestimmung. Mit Hilfe der einfach feststellbaren Größen Schiffsgeschwindigkeit, Kompaßkurs und Fahrzeit läßt sich bei gewissenhafter Ausführung der Standort eines Segelschiffes trotz vielfachen „Kreuzens" beim Segeln am Wind relativ sicher bestimmen. Entsprechend der angegebenen Größen kann der Kurs des Schiffes auf der Seekarte eingezeichnet werden. Dieses Aneinanderfügen von mit Bestimmtheit zurückgelegten Strecken kann man benutzen, wenn keine Orientierungspunkte im betreffenden Gebiet vorhanden sind.



Überholvorgang. Wenn ein Kraftfahrer mit seinem Fahrzeug ein anderes sich bewegendes Fahrzeug überholen will, dann muß er bei nahendem Gegenverkehr abschätzen, ob vom augenblicklichen Ort bei der vorhandenen Fahrgeschwindigkeit und der möglichen Beschleunigung die vorhandene freie Strecke zum Überholen ausreicht. In jedem Zweifelsfall oder bei unzureichender Erfahrung ist das Überholen zu unterlassen; denn es gefährdet alle Beteiligten.



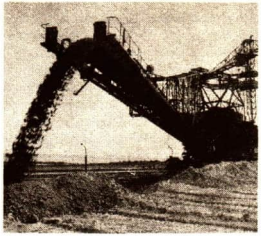
Abbremsen einer Landesektion. Beim Wiedereintauchen einer landenden Raumfahrtkabine in die dichten Schichten der Erdatmosphäre entsteht infolge des zunehmenden Reibungswiderstandes zwischen Landesektion und Luft eine sehr starke Verzögerung der Fallbewegung. Die Landesektion wird dabei von einer Geschwindigkeit von etwa 8000 $m \cdot s^{-1}$ auf etwa 200 $m \cdot s^{-1}$ abgebremst. Der erforderliche lange Bremsweg wird dadurch erreicht, daß die Landesektion schräg in die dichteren Schichten der Erdatmosphäre eindringt.



Problemfragen

- Welche physikalischen Sachverhalte und welche Gleichungen liegen den erläuterten Beispielen zugrunde?
- Erläutern Sie Anwendungsbeispiele aus den verschiedenen Bereichen der Gesellschaft analog zu den dargestellten Beispielen!

Transportband, Walzwerk, Papiermaschine, Seiltrommel, rollendes Rad und viele andere Beispiele lassen erkennen, daß zwischen Translation und Rotation enge Beziehungen bestehen. Das Fördergut und das Transportband des Absetzgerätes (Bild 22/1) führen eine gleichförmige Translation aus, weil die Antriebsrollen eine gleichförmige Rotation ausführen. Am Reifenapparat, der zur experimentellen Untersuchung vieler Bewegungsvorgänge der Translation und der Rotation geeignet ist, läuft ein Antriebskörper in gleichmäßig beschleunigter Translation ab, und der drehbare Teil wird dabei durch einen auf eine Aufhängetrommel gewickelten Faden in gleichmäßig beschleunigte Rotation versetzt (Bild 22/2).



22/1 Abraumabsetzgerät in einem Braunkohlentagebau

Schon im ersten Abschnitt konnten wegen der engen Beziehungen dieser Bewegungsformen untereinander die Größen zur Beschreibung von Translation und Rotation in Analogie zueinander definiert werden:

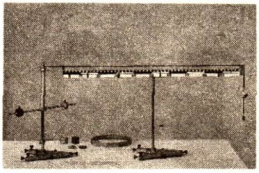
der Drehwinkel σ analog dem Weg s,

die Winkelgeschwindigkeit analog der Geschwindigkeit

$$\omega = \frac{d\sigma}{dt} \qquad v = \frac{ds}{dt},$$

die Winkelbeschleunigung analog der Beschleunigung

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \qquad a = \frac{dv}{dt}.$$

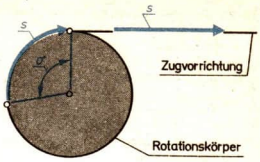


22/2 Experimentiergerät Reifenapparat

Die Definitionsgleichungen der analogen Größen stimmen in ihrer mathematischen Form völlig überein. Aus diesen Definitionsgleichungen werden die Bewegungsgesetze hergeleitet. Folglich müssen auch diese für analoge Fälle die gleiche mathematische Form haben:

Bewegungsgesetze			
Translation		**Rotation**	
gleichförmige Bewegung			
$v = f(t) = \text{konstant}$	(20)	$\omega = f(t) = \text{konstant}$	(37)
$s = f(t) = v \cdot t + s_0$	(24)	$\sigma = f(t) = \omega \cdot t + \sigma_0$	(38)
$x = f(t) = v_x \cdot t + x_0$	(35)		
gleichmäßig beschleunigte Bewegung			
$v = f(t) = a \cdot t + v_0$	(27)	$\omega = f(t) = \alpha \cdot t + \omega_0$	(39)
$s = f(t) = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$	(30)	$\sigma = f(t) = \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2 + \omega_0 \cdot t + \sigma_0$	(40)
$x = f(t) = \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 + v_{0x} \cdot t + x_0$	(36)		

Eine Experimentieranordnung nach Bild 14/3 enthält zwei Tachometer. Eines dient zur Messung der Bahngeschwindigkeit, das andere zur Messung der Winkelgeschwindigkeit. Mit einer solchen Anordnung ist es auch möglich, die durch Analogieschluß gefundenen Bewegungsgesetze der gleichförmigen Rotation experimentell zu bestätigen. Baut man in eine Anordnung nach Bild 23/1 zwei Tachometer ein, dann können damit auch die Gesetze der beschleunigten Rotation experimentell untersucht werden. ① ②



23/1

■ In einer Experimentieranordnung nach Bild 15/1 treibt ein Gewichtskörper über einen Fadenzug und eine Scheibe von 45 mm Radius einen Drehkörper an. Der Gewichtskörper läuft in 3,4 s eine Strecke von 1,1 m gleichmäßig beschleunigt ab.

Berechnen Sie:

a) die Endgeschwindigkeit des Gewichtskörpers,
b) die Beschleunigung des Gewichtskörpers,
c) die End-Winkelgeschwindigkeit des Drehkörpers,
d) die Winkelbeschleunigung des Drehkörpers!

Gegeben:	*Gesucht:*
$r = 45\ \text{mm} = 0{,}045\ \text{m}$	v
$s = 1{,}1\ \text{m}$	a
$t = 3{,}4\ \text{s}$	ω
	α

Lösung:

a) Da die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ ist, lautet das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz (27)

$$v = a \cdot t.$$

Dies wird nach a umgestellt:

$$a = \frac{v}{t},$$

und in das Weg-Zeit-Gesetz (30) eingesetzt:

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

$$s = \frac{1}{2} \frac{v}{t} \cdot t^2.$$

Diese Gleichung ist nach v aufzulösen:

$$v = \frac{2s}{t}.$$

Mit den gegebenen Größenwerten

$$v = \frac{2 \cdot 1{,}1\ \text{m}}{3{,}4\ \text{s}}$$

ergibt sich

$$\underline{\underline{v = 0{,}65\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

---

① Entwerfen Sie eine andere Anordnung zur experimentellen Bestätigung der Bewegungsgesetze der Rotation!

② Leiten Sie die Gleichung (40) mit Hilfe der Integralrechnung her! Gehen Sie dabei aus von den Definitionsgleichungen (17) und (18) sowie von der Tatsache, daß bei gleichmäßig beschleunigter Rotation die Winkelbeschleunigung konstant ist.

b) Die Beschleunigung kann aus der Gleichung

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

errechnet werden:

$$a = \frac{0{,}65\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{3{,}4\ \mathrm{s}}$$

$$\underline{\underline{a = 0{,}19\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}}}$$

c) Die Winkelgeschwindigkeit wird nach der Gleichung (7) errechnet:

$$v = \omega \cdot r$$

$$\omega = \frac{v}{r}$$

$$\omega = \frac{0{,}65\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{0{,}045\ \mathrm{m}}$$

$$\underline{\underline{\omega = 14{,}4\ \mathrm{s^{-1}}}}$$

d) Für die Berechnung der Winkelbeschleunigung führen zwei Wege zum gleichen Ziel.

Entweder

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \qquad (4)$$

$$\alpha = \frac{14{,}4\ \mathrm{s^{-1}}}{3{,}4\ \mathrm{s}}$$

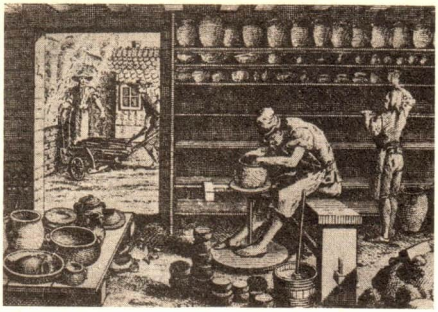
$$\underline{\underline{\alpha = 4{,}2\ \mathrm{s^{-2}}}}$$ oder

$$\alpha = \frac{a}{r} \quad \text{mit} \quad a_t = a \qquad (19)$$

$$\alpha = \frac{0{,}19\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}}{0{,}045\ \mathrm{m}}$$

$$\underline{\underline{\alpha = 4{,}2\ \mathrm{s^{-2}}}}$$

Der Antriebskörper dieser Experimentierapparatur erreicht unter den Bedingungen der Aufgabe bei einer Beschleunigung von $0{,}19\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ eine Endgeschwindigkeit von $0{,}65\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Dabei wird eine Winkelgeschwindigkeit von $14{,}4\ \mathrm{s^{-1}}$ erreicht, und die Winkelbeschleunigung beträgt $4{,}2\ \mathrm{s^{-2}}$.



Dynamik von Translation und Rotation

Das Töpferhandwerk ist einer der ältesten Handwerkszweige in der Menschheitsgeschichte. Zugleich ist es auch das erste Handwerk, für das zur Fertigung von Massenprodukten eine mechanische Arbeitsvorrichtung erfunden wurde. Die Töpferscheibe, zunächst mit Handantrieb, später mit Fußantrieb, ist seit mehr als 5000 Jahren bekannt.

Die Töpferscheibe ist eine empirisch erfundene rotierende Arbeitsvorrichtung. Die Menschen der Sklavenhaltergesellschaft vor 5000 Jahren kannten noch keine physikalischen Gesetze der Rotation. Die Erfahrung lehrte sie aber, daß Durchmesser und Masse der drehbaren Teile der Scheibe und des Arbeitsgegenstandes auf der Scheibe in Abhängigkeit von z. B. der Fußkraft des Töpfers gewählt werden mußten, sollte ein günstiges Arbeitsergebnis erzielt werden.
Das alles wurde immer von neuem ausprobiert und dabei die Töpferscheibe so entwickelt, daß darin die Gesetze der Rotation zweckmäßig berücksichtigt sind.
Heute ist bekannt, daß sich die Gesetze der Rotation auf die allgemeinen Gesetze der Bewegung von Massepunkten zurückführen lassen. In der folgenden Darstellung sollen die Gesetze der Rotation mit Hilfe experimenteller Untersuchungen und durch Analogiebetrachtungen gefunden werden.

Einige Grundbegriffe der Mechanik 7

Zur Wiederholung soll zunächst ein knapper Überblick über wesentliche, bereits bekannte Begriffe und Gesetze gegeben werden.
Eine wesentliche Größe ist die **Kraft** $\vec{F}$, die zur Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Körpern dient und durch die eine Veränderung der Form oder des Bewegungszustandes (oder beides zugleich) der Körper bewirkt wird.
Die Gesetzmäßigkeiten der Kinematik und der Dynamik werden mit Hilfe des Modells *starrer Körper* untersucht. Dieses Modell schließt Betrachtungen über die Deformation von Körpern durch Kräfte aus. Es werden ausschließlich Bewegungszustände bzw. deren Veränderung betrachtet.

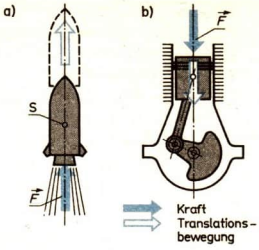
Veränderungen des Bewegungszustandes eines starren Körpers infolge einer Kraft sind verknüpft mit der **Trägheit**, die durch die Masse *m* des Körpers beschrieben wird. ⑦ ②

Geht die Wirkungslinie einer Kraft durch den Schwerpunkt S eines frei beweglichen Körpers oder wirkt die Kraft mit einer Komponente in Richtung der Führungsbahn eines geradlinig geführten Körpers, so bewirkt die **Kraft** eine **Translation** (Bild 26/1).

Geht die Wirkungslinie der Kraft dagegen nicht durch den Schwerpunkt bzw. nicht durch den Drehpunkt eines Körpers, so wirkt auf den Körper infolge der beiden physikalischen Größen Kraft $\vec{F}$ und Abstand der Wirkungslinie der Kraft vom Drehpunkt, Radius $\vec{r}$ (wobei $\vec{r} \perp \vec{F}$), ein **Kraftmoment**, das eine **Rotation** herbeiführt (Bild 26/2).

Man bezeichnet das Kraftmoment, durch das eine Rotation herbeigeführt wird, als

Drehmoment.



26/1 Translation infolge einer Kraft
a) durch den Schwerpunkt S
b) in Führungsbahnrichtung

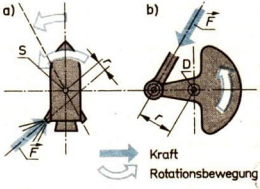
► **Das Drehmoment M_D ist gleich dem Produkt aus den physikalischen Größen Kraft *F* und einer Länge, dem Kraftarm *r*.**

$$M_D = F \cdot r \qquad (41)$$
$$\vec{r} \perp \vec{F}$$

Einheit des Drehmoments ist 1 N · m.

Die Einheit Newtonmeter ist auch Einheit der Größen Arbeit und Energie, doch dies bedeutet keine begriffliche Übereinstimmung dieser Größen mit dem Drehmoment. Die in der Definition des Drehmoments enthaltene Länge (Radius) erstreckt sich nicht in Richtung der Kraft (Bewegung), sondern sie steht senkrecht zu dieser Richtung. In dieser Richtung erhält man mit der entsprechenden Kraftkomponente keine Arbeit.

Es ist bekannt, daß jeder Körper seinen Bewegungszustand nur dann verändert, also eine Beschleunigung erfährt, wenn auf ihn eine Kraft wirkt. Bei der **Translation** ist diese Eigenschaft der Körper, die man als **Trägheit** bezeichnet, vollständig durch die Masse *m* des Körpers bestimmt. Newton hat aus der Erkenntnis dieses Sachverhaltes um 1685 daraus hergeleitet das bisher allgemein als Grundgesetz der Mechanik bezeichnete



26/2 Rotation infolge eines Drehmoments
a) Kraft nicht auf den Schwerpunkt S gerichtet (hierbei kann zusätzlich Translation auftreten)
b) Kraft nicht auf den Drehpunkt D gerichtet

► **Grundgesetz der Dynamik**

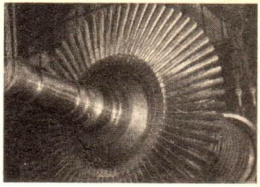
$$m \cdot a = F \qquad (42)$$

Einheit der Kraft ist 1 N = 1 kg · m · s^{-2}.

Im folgenden Abschnitt soll nun untersucht werden, welche Größen die Beschleunigung eines starren Körpers bei Rotation beeinflussen. Da hierbei ebenfalls eine Kraft *F* an einem starren Körper der Masse *m* angreift, wobei allerdings eine weitere Größe – der rechtwinklige Abstand *r* der Wirkungslinie der Kraft vom Drehpunkt – zu berücksichtigen ist,

liegt es nahe, eine Ähnlichkeit der entsprechenden Gesetzmäßigkeit zum Newtonschen Grundgesetz der Dynamik zu vermuten. Auf dieser Vermutung ist der gesamte folgende Erkenntnisgang aufgebaut. ③

Bei den nun notwendigen Untersuchungen richtet sich das Augenmerk aus Analogiegründen (vgl. S. 25) auf den Zusammenhang zwischen dem Drehmoment M_D und der Winkelbeschleunigung α.

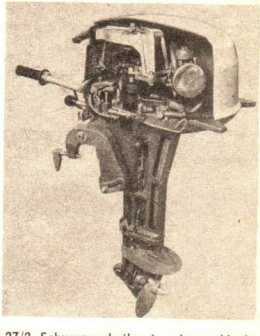


27/1 Laufräder einer Dampfturbine. Das schwere Laufrad setzt einer großen Beschleunigung einen großen Trägheitswiderstand entgegen. Solche Räder stark zu beschleunigen (beim Anlassen) würde zur Verformung bzw. sogar zum Bruch der Schaufeln führen. Das Modell starrer Körper kann infolge des mehr oder weniger stark elastischen Verhaltens der Werkstoffe nicht mehr uneingeschränkt angewendet werden.

Winkelbeschleunigung und Drehmoment 8

Große Kraftwerksdampfturbinen, aber auch die kleineren Flugzeuggasturbinen, können nur langsam angelassen werden. Sie erreichen ihre Höchstdrehzahl erst nach einigen Minuten. Offensichtlich setzen sie einer Bewegungsänderung einen Widerstand entgegen. ④

Ein Turbinenlaufrad ist für Untersuchungszwecke jedoch ein zu kompliziert geformter Körper (Bild 27/1).
Einfacher sind homogene scheibenförmige Rotationskörper, wie man sie in Maschinen als Schwungscheiben findet (Bild 27/2). Der Schwungkraftanlasser in Flugzeugen mit Kolbenmotoren (S. 36) ist ein Beispiel.
Für experimentelle Untersuchungen mit den dabei notwendigen Veränderungen der Untersuchungsbedingungen ist es nicht zweckmäßig, eine Kreisscheibe zu wählen. Man benutzt zwei miteinander verbundene rotierende Einzelkörper, deren gemeinsamer Schwerpunkt auf der Drehachse bzw. im Drehpunkt liegt (Bild 28/1). Man kann mit geringem Aufwand sowohl die Massen als auch ihre Radien, das sind ihre Abstände von der Drehachse, messen und verändern, und auch volle Umläufe genau beobachten und die Zeit hierfür leicht messen. Die beiden Körper werden vereinfachend als Massepunkte betrachtet.
Solch ein rotationsfähiger Körper, der etwa die Form einer Hantel hat, soll das Untersuchungsobjekt sein. Das Untersuchungsobjekt soll um eine körperfeste und zugleich auch raumfeste Drehachse rotieren (Bild 28/2).
Im Gegensatz dazu ist die Drehachse einer auf einer ebenen Fläche liegenden Kugel nicht körperfest und nicht raumfest. ⑤



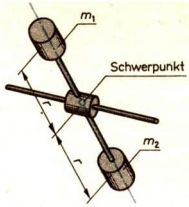
27/2 Schwungscheibe in einem Heckmotor

---

① Erläutern Sie an einem selbstgewählten Beispiel, warum in der Natur wie auch in der Technik beide Arten der Veränderung auftreten!
② Nennen Sie diese Beziehung!
③ Beschreiben Sie die Bedingungen für das Auftreten einer Radialkraft!
④ Stellen Sie fest, welche Zeit es dauert, bis eine Wäscheschleuder
a) leer und b) voll gepackt
ihre volle Drehzahl erreicht hat!
⑤ Suchen und beschreiben Sie je ein Beispiel für homogene, rotationssymmetrische starre Körper mit
a) nicht körperfester, b) nicht raumfester und c) nicht körperfester und nicht raumfester Drehachse!

Drehmoment und Winkelbeschleunigung. Es soll experimentell der Zusammenhang zwischen dem Drehmoment $M_D = f(F, r)$ und der Winkelbeschleunigung α untersucht werden. Die Masse und die Anordnung des Körpers werden konstant gehalten.

▼ Ein rotationsfähiger, hantelförmiger Körper mit einer körperfesten und raumfesten Drehachse wird durch eine Kraft F gleichmäßig beschleunigt (Bild 28/3).
Es wird die funktionale Abhängigkeit
$\alpha = f(F)$ bei r = konstant
$\alpha = f(r)$ bei F = konstant gesucht.
Im Experiment wirkt die Antriebskraft F stets auf der gleichen Ablaufstrecke s. Die zum Beschleunigen auf dieser Strecke erforderliche Zeit t wird gemessen und die Winkelbeschleunigung α errechnet.



28/1 Zwei gleiche, fest miteinander verbundene Einzelkörper, die im gleichen Abstand von einer drehbar gelagerten Achse angeordnet sind.

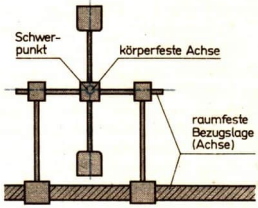
Die Tabelle 28/4 gibt ein Beispiel für die experimentellen Vorgaben und die rechnerische Auswertung des Experiments (vgl. Verbindliches Schülerexperiment M 1 im Heft Schülerexperimente)!

Tabelle 28/4
Meßwerte

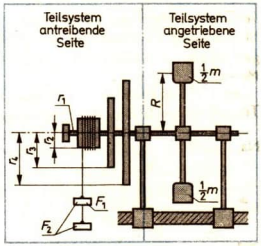
Belastung F in N	Ablaufstrecke s in m	Antriebsrolle r in m	Zeit t in s
1,0 1,0	1,1 1,1	0,03 0,09	7,4 2,5
2,0 2,0	1,1 1,1	0,03 0,09	5,2 1,7

Rechenwerte

Bahngeschwindigkeit $v_t = \frac{2s}{t}$ in $m \cdot s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit $\omega_e = \frac{v_t}{r}$ in s^{-1}	Winkelbeschleunigung $\alpha = \frac{\omega_e}{t}$ in s^{-2}	Drehmoment $M_D = F \cdot r$ in $N \cdot m$
0,30 0,88	9,9 9,8	1,3 3,9	0,03 0,09
0,42 1,29	14,1 14,4	2,7 8,4	0,06 0,18



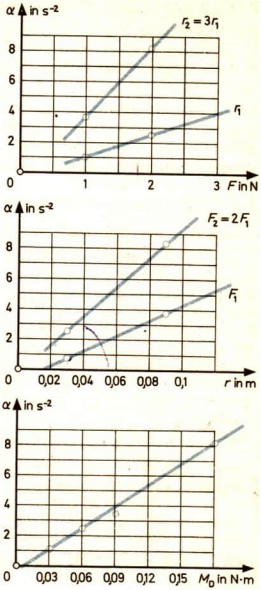
28/2 Körper mit körperfester und raumfester Achse



28/3 Aufbau einer Vorrichtung zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Drehmoment und Winkelbeschleunigung

Die Diagramme (Bild 29/1) zeigen bereits bei wenigen Ausgangs-Meßwerten eine erkennbare Abhängigkeit α von F und α von r auf der antreibenden Seite. Es besteht direkte Proportionalität. Aus dem Ergebnis des Experiments (vgl. auch Verbindliches Schülerexperiment M 1) läßt sich schließen, daß bei $\vec{r} \perp \vec{F}$
$\alpha \sim F$ für r = konstant und $\alpha \sim r$ für F = konstant.

Daraus ergibt sich
$\alpha \sim F \cdot r$, und mit (41) erhält man
$\alpha \sim M_D$ bei konstanter Anordnung der Massen.
In Abwandlung gegenüber dem Newtonschen Grundgesetz wurde hier nicht die Beschleunigung a, sondern die Winkelbeschleunigung α untersucht. Da die beiden Größen durch die Gleichung $a = \alpha \cdot r$ verknüpft sind, ist es nicht verwunderlich, daß bei der Rotation α sowohl von F als auch von r abhängt.



29/1 Grafische Darstellung der experimentell gewonnenen Meßergebnisse zur Kraftwirkung

Winkelbeschleunigung und Trägheitsmoment 9

Auf der antreibenden Seite ist die Winkelbeschleunigung direkt proportional dem Drehmoment M_D. Für die angetriebene Seite ist die Winkelbeschleunigung genau so groß. Davon ausgehend ist nun noch zu untersuchen, wie die an der benutzten Experimentiervorrichtung (Bild 28/3) auf der antreibenden und auf der angetriebenen Seite erzielte Winkelbeschleunigung α auch von der Trägheit der beiden beschleunigten Körper abhängt.
Experimentell wurde eine Proportionalität zwischen dem Drehmoment und der Winkelbeschleunigung festgestellt. Aus den letzten beiden Spalten der Tabelle 28/4 (Rechenwerte) geht hervor:
Der Quotient aus M_D und α ist konstant.
Im beschriebenen Beispiel beträgt er

$$\frac{M_D}{\alpha} = (0{,}022 \pm 0{,}001)\ \mathrm{N \cdot m \cdot s^2}.$$

Diese Konstante drückt die Eigenschaft der Trägheit des rotierenden Körpers aus. Sie ist nicht identisch mit der Masse. Auch hier ist zu berücksichtigen, daß durch die Winkelbeschleunigung der Radius der Rotationsbewegung in die Betrachtung einbezogen worden ist. Deshalb wird für die gefundene Konstante eine neue Größe eingeführt.
Man bezeichnet sie als das

Trägheitsmoment $\quad J = \dfrac{M_D}{\alpha}.$

Nach Umstellung erhält man daraus eine zur Gleichung für das

► **Grundgesetz der Dynamik der Translation**

$$F = m \cdot a \qquad (42)$$

analoge Gleichung. Sie lautet in formaler Übereinstimmung zu (42)

► **Grundgesetz der Dynamik der Rotation**

$$M_D = J \cdot \alpha \qquad (43)$$

Das Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Drehmoment M_D und Winkelbeschleunigung α unter der gegebenen Bedingung eines bestimmten Trägheitsmoments J.

Um nun festzustellen, wovon das bei der Rotation eines Körpers auftretende Trägheitsmoment abhängt, wird das Trägheitsmoment J eines rotierenden hantelförmigen Körpers experimentell bestimmt. Dazu wird ein weiteres Experiment durchgeführt (vgl. Verbindliches Schülerexperiment M 2 im Heft Schülerexperimente). Damit soll untersucht werden, welcher Zusammenhang zwischen der Trägheit und der Winkelbeschleunigung des rotationsbeschleunigten Körpers auf der angetriebenen Seite der Versuchseinrichtung besteht.

▼ Ein rotationsfähiger, hantelförmiger Körper der Gesamtmasse m (Bild 28/3) aus zwei punktförmig angenommenen Massen $\frac{m}{2}$ mit einer körperfesten und raumfesten Achse als Drehachse, die zugleich durch den Schwerpunkt des Rotationskörpers geht, wird durch ein Drehmoment M_D gleichmäßig beschleunigt. Die Winkelbeschleunigung α wird festgestellt.
Dieses Experiment wird unter folgenden Bedingungen durchgeführt:
M_D = konstant
m = nicht konstant, R = konstant
R = nicht konstant, m = konstant (vgl. Tabelle 30/1)

Tabelle 30/1

Meßwerte

Masse m in kg	Abstand R in m	Laufzeit t in s
2,0	0,141	6,5
2,0	0,190	8,2
2,0	0,190	8,2
4,0	0,190	11,7
6,0	0,190	14,2

Rechenwerte
(Konstante Größen: $F = 1{,}5$ N; $r = 0{,}045$ m; $s = 1{,}1$ m; $M_D = 0{,}0675$ N · m)

Bahngeschwindigkeit $v_e = \frac{2s}{t}$ in $m \cdot s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit $\omega_e = \frac{v_e}{r}$ in s^{-1}	Winkelbeschleunigung $\alpha = \frac{\omega_e}{t}$ in s^{-2}	$\frac{1}{\alpha}$ in s^2	R^2 in m^2	experimentell bestimmtes Trägheitsmoment $J_{ex} = \frac{F \cdot r}{\alpha}$ in $kg \cdot m^2$
0,34	7,5	1,18	0,862	0,0199	0,0582
0,27	5,96	0,73	1,37	0,0361	0,0925
0,27	5,96	0,73	1,37	0,0361	0,0925
0,19	4,2	0,36	2,78	0,0361	0,1875
0,16	3,4	0,24	4,17	0,0361	0,2813

Aus diesem Experiment erhält man folgende allgemeine Erkenntnisse:

– Vergrößert man die Masse $\frac{2m}{2}$ des Rotationskörpers, dann verringert sich die Winkelbeschleunigung α

$$\frac{1}{\alpha} \sim m$$

– Vergrößert man den Abstand R der Teilkörper von der Drehachse, dann verringert sich die Winkelbeschleunigung α. Diese Verringerung ist jedoch nicht zum Abstand R, sondern zum Quadrat des Abstandes R proportional.

$$\frac{1}{\alpha} \sim R^2$$

Man erhält (vgl. Tabelle 30/1)

$$\frac{1}{\alpha} \sim m \cdot R^2.$$

Da keine weiteren Einflußgrößen bei festgehaltenen Werten von m und R erkennbar sind und

$\frac{M_D}{\alpha}$ = konstant gefunden wurde, folgt nun

$$\frac{M_D}{\alpha} \sim m \cdot R^2 \quad \text{und}$$

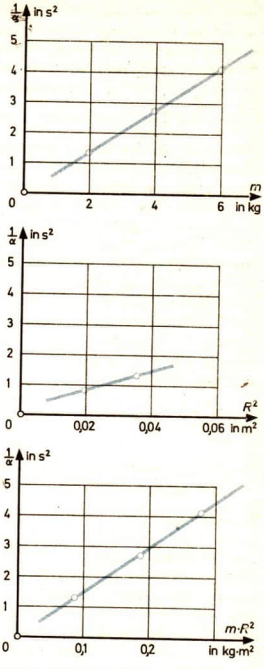
$$M_D \sim m \cdot R^2 \cdot \alpha. \qquad (44)$$

Vergleicht man Gleichung (43)

$$M_D = J \cdot \alpha$$

mit (44), dann findet man

$$J = m \cdot R^2. \qquad (45)$$



31/1 Grafische Darstellung der experimentell gewonnenen Meßergebnisse

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde bisher r dem Drehmoment und R der rotierenden Masse zugeordnet. Es ist zu beachten, daß im allgemeinen beide Radien unterschiedlich groß sind. Bei der weiteren Darlegung entfällt die Betrachtung von r auf der antreibenden Seite (Drehmoment), und deshalb soll von hier an, so wie das allgemein üblich ist (aber auch leicht zu Verwechslungen führt), für das im Experiment gewählte R nun das Zeichen r benutzt werden.
Das Produkt $m \cdot r^2$ der Masse m im Abstand r des Massemittelpunktes von der Drehachse dient zur Beschreibung des Trägheitsverhaltens eines Körpers bei Beschleunigung auf einer Kreisbahn. Man bezeichnet diese Größe als

Trägheitsmoment
bei Rotation eines Massepunktes

$$J = m \cdot r^2 \qquad (46)$$

Einheit des Trägheitsmoments ist 1 kg · m².

In vielen Fällen ist das rotierende Objekt nicht als ein Massepunkt zu betrachten, wie es vereinfachend in den Experimenten angenommen wurde, sondern stellt ein rotierendes System von mehreren Massepunkten dar. Um solch einen Fall erfassen zu können, geht man von folgender Betrachtung aus.

Die im Experiment eingesetzten Teilmassen $\frac{2m}{2} = m$ werden so verteilt, daß sie einen Hohlzylinder, Zylindermantel oder Reifen ergeben, die die gleiche Masse m und den gleichen Abstand r wie die beiden Teilmassen des hantelförmigen Körpers haben. Das Trägheitsmoment eines solchen Körpers ist gleich dem Trägheitsmoment des hantelförmigen Körpers. Davon ausgehend kann man jeden räumlich ausgedehnten Rotationskörper aus ineinandergefügten Hohlzylindern zusammengesetzt betrachten. Jedem dieser Hohlzylinder kann eine Masse m und ein (unterschiedlich großer) Abstand r von der Drehachse zugeordnet werden (Bild 32/1). Das Trägheitsmoment jedes einzelnen Hohlzylinders ist $J_K = m_K \cdot r_K^2$. Die Summe aller Trägheitsmomente ergibt das Gesamtträgheitsmoment, und es gilt

$$J = \sum_{k=1}^{n} (m_K \cdot r_K^2). \qquad (47)$$

Ist das rotierende Objekt ein ausgedehnter Körper, so daß $n \to \infty$ geht, dann gilt

$$J = \int r^2 \cdot dm \qquad (48)$$

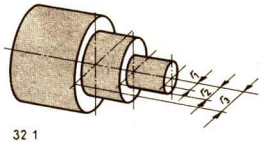
Da die Berechnung des Trägheitsmoments oft schwierig ist, wird es in solchen Fällen häufig experimentell bestimmt. In den Gleichungen (47) und (48) kommt zum Ausdruck, daß bei Rotation das Trägheitsmoment eines Körpers von der Verteilung der Masse abhängt. Die Masseverteilung wird bestimmt durch die jeweiligen Abstände r_K der Teilmassen m_K von der Drehachse des rotierenden Körpers (Bild 32/2).

Legt man durch einen rotationssymmetrischen Körper eine Schar paralleler Drehachsen, so ist das Trägheitsmoment des Körpers dann ein Minimum, wenn die Drehachse durch den Schwerpunkt geht (Bild 32/3).

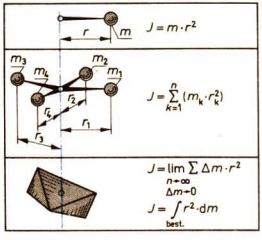
Liegt der Schwerpunkt außerhalb der Drehachse, etwa um den Abstand a entfernt (Bilder 32/4 und 32/5), dann vergrößert sich das Trägheitsmoment, so daß ein so rotierender Körper stets ein größeres Gesamtträgheitsmoment besitzt als der gleiche Körper mit durch den Schwerpunkt gehender Drehachse.

So gelagerte Rotationskörper haben eine „Unwucht", sie wirkt sich in verschiedener Hinsicht nachteilig aus.

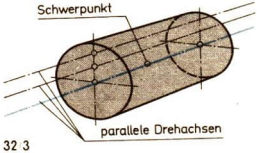
Diese Unwucht muß deshalb, vor allem bei schnell rotierenden Körpern, beachtet und nach Möglichkeit beseitigt werden. Das erfolgt entweder durch Anordnen von zusätzlichen Körpern, wie z. B. beim Auswuchten von Pkw-Rädern (Bild 33/1) und unsymmetrischen, schweren Werkstücken,



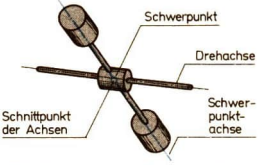
32 1



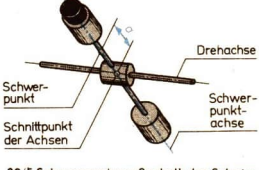
32 2



32 3



32 4 Schwerpunkt im Schnittpunkt von Drehachse und Schwerpunktachse



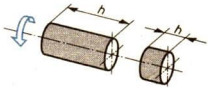
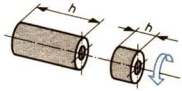
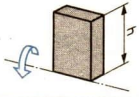
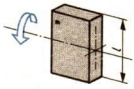
32/5 Schwerpunkt außerhalb des Schnittpunktes von Drehachse und Schwerpunktachse

die auf Drehmaschinen bearbeitet werden, oder durch Ausbohren (Masseverringerung) an der Unwuchtstelle.
Konstruktiv werden rotierende Körper, an denen zusätzlich Masseteile angeordnet sind, so geformt, daß durch Anordnung weiterer Massenteile eine Unwucht infolge der Rotation ausgeschaltet wird. Beispiele hierfür sind die Ausgleichskörper an Kurbelwellen (Bild 34/1) und an den Treibrädern von Lokomotiven.
In der Praxis werden Trägheitsmomente von Rotationskörpern experimentell bestimmt (vgl. letzte Spalte in Tabelle 30/1). Für geometrisch einfach geformte Rotationskörper kann man das Trägheitsmoment errechnen. Die hierfür erforderlichen Gleichungen sind für einige ausgewählte Formen in Tabelle 33/2 für die angegebenen Achsen aufgeführt. Die Masse wird mit Hilfe des Volumens und der Dichte errechnet bzw. direkt gemessen.

33/1 Pkw-Rad mit Auswuchtkörpern

Tabelle 33/2

Trägheitsmomente ausgewählter Körper

Zylinder Scheibe	$J = \frac{1}{2} m \cdot r^2$ (49) $m = \varrho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$ $J = \frac{1}{2} \varrho \cdot \pi \cdot r^4 \cdot h$	
Hohlzylinder Ring	$J = \frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2)$ (50) $m = \varrho \cdot \pi \cdot h(r_1^2 - r_2^2)$ $J = \frac{1}{2} \varrho \cdot \pi \cdot h(r_1^4 - r_2^4)$ (51)	
Kugel	$J = \frac{2}{5} m \cdot r^2$ (52) $m = \frac{4}{3} \varrho \cdot \pi \cdot r^3$ $J = \frac{8}{15} \varrho \cdot \pi \cdot r^5$ (53)	
Platte Stab	$J = \frac{1}{3} m \cdot h^2$ (54) $m = \varrho \cdot a \cdot b \cdot h$ $J = \frac{1}{3} \varrho \cdot a \cdot b \cdot h^3$ (55)	
Platte Stab	$J = \frac{1}{12} m \cdot l^2$ (56) $m = \varrho \cdot a \cdot b \cdot l$ $J = \frac{1}{12} \varrho \cdot a \cdot b \cdot l^3$ (57)	

ⓘ Entwickeln Sie selbständig die Gleichung (48)!

■ Es ist das Trägheitsmoment einer Schwungscheibe (Bild 34/2) aus Stahl mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Höhe von 25 mm zu errechnen.

Gegeben:

$\varrho = 7{,}8\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$

$d = 200\ \mathrm{mm}$

$h = 25\ \mathrm{mm}$

Gesucht:

J

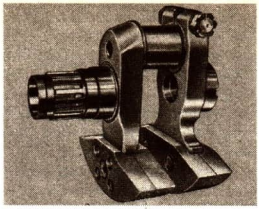
Lösung:

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

$$J = \frac{1}{2} \varrho \cdot \pi \cdot r^4 \cdot h$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot 7{,}8\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}} \cdot 3{,}14 \cdot 10^4\ \mathrm{cm^4} \cdot 2{,}5\ \mathrm{cm}$$

$$\underline{\underline{J = 30{,}63 \cdot 10^4\ \mathrm{g \cdot cm^2}}}$$



34/1 Kurbelwelle eines Motors mit Ausgleichkörpern

■ Wie kann man das Trägheitsmoment der Schwungscheibe (Bild 34/2) durch konstruktive Veränderung um 20% erhöhen, ohne Masse und Durchmesser zu vergrößern?

Gegeben:

$J_1 = 30{,}63 \cdot 10^4\ \mathrm{g \cdot cm^2}$

$\varrho_1 = \varrho_2$

$r_1 = r_1$

$J_2 = 1{,}2\, J_1$

Gesucht:

h_2

Lösung:

Es ist die Masse anders zu verteilen. Es wird gewählt eine Kreisringscheibe (Bild 34/3) mit einem Innenradius von $r_2 = 40$ mm.

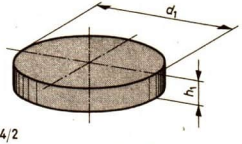
$$\frac{1}{2} \varrho_1 \cdot \pi \cdot h_2 (r_1^4 - r_2^4) = \frac{1{,}2}{2} \varrho_1 \cdot \pi \cdot r_1^4 \cdot h_1$$

$$h_2 = \frac{1{,}2\, J_1}{\frac{1}{2} \varrho_1 \cdot \pi \cdot (r_1^4 - r_2^4)}$$

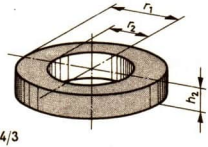
$$h_2 = \frac{36{,}756 \cdot 10^4\ \mathrm{g \cdot cm^2}}{11{,}936 \cdot 10^4\ \mathrm{g \cdot cm}}$$

$$h_2 = 3{,}0\ \mathrm{cm}$$

$$\underline{\underline{h_2 = 30\ \mathrm{mm}}}$$



34/2



34/3

① ② ③ ④ ⑤ ⑥

Rotationsenergie 10

Wird einem Körper Arbeit zugeführt, so daß eine Translation erfolgt, dann erhält er kinetische Energie. ⑦

Bei der Translation gilt

$$E_{tr} = \frac{1}{2} m \cdot v^2. \qquad (58)$$

Für einen drehbar gelagerten Körper gilt der gleiche Sachverhalt; auch dieser erhält – z. B. durch ein Drehmoment – kinetische Energie.

Bei der Rotation gilt für einen Massepunkt m mit den entsprechenden Größen $v = r \cdot \omega$ und $J = m \cdot r^2$

$$E_{rot} = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \cdot \omega^2. \qquad (59)$$

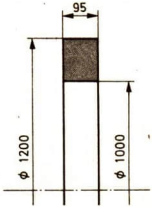
Bei einem ausgedehnten, nicht punktförmig angenommenen rotierenden Körper setzt sich die Gesamtenergie aus der Summe der Energien der Massenelemente des Körpers zusammen, und es gilt allgemein für die

► Rotationsenergie

$$E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \qquad (60)$$

Einheit der Rotationsenergie ist $1\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = 1\ N \cdot m$ und $1\ N \cdot m = 1\ J$.

■ Der Schwungradkranz eines Schiffsdieselmotors hat die im Bild 35/1 angegebenen Abmessungen. Er besteht aus Grauguß.
Es ist zu berechnen
a) das Trägheitsmoment
b) die Rotationsenergie bei $n = 360\ min^{-1}$.



35/1

a) $J = \frac{1}{2} \varrho \cdot \pi \cdot h(r_1^4 - r_2^4)$

$J = \frac{1}{2} \cdot 7{,}2\ g \cdot cm^{-3} \cdot 3{,}14 \cdot 9{,}5\ cm\ (60^4\ cm^4 - 50^4\ cm^4)$

$\underline{\underline{J = 72{,}1\ kg \cdot m^2}}$

b) $E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \qquad \omega = 2\pi \cdot n$

$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot 72{,}1\ kg \cdot m^2 \cdot 37{,}7^2\ s^{-2} \qquad \omega = 37{,}7\ s^{-1}$

$E_{rot} = 51\,237{,}5\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$

$\underline{\underline{E_{rot} = 51{,}24\ kJ}}$

■ Eine Kegelkugel mit einem Durchmesser von 180 mm und einer Masse von 3,4 kg bewegt sich auf der Kegelbahn mit einer Geschwindigkeit von $5\ m \cdot s^{-1}$. Es soll errechnet werden
a) die kinetische Energie der Translation,
b) das Trägheitsmoment der Kugel,
c) die Winkelgeschwindigkeit,
d) die kinetische Energie der Rotation,
e) die gesamte kinetische Energie,
f) der Anteil der Rotationsenergie an der gesamten kinetischen Energie.

a) $E_{tr} = \frac{m \cdot v^2}{2}$

$E_{tr} = 42{,}5\ J$

b) $J = \frac{2}{5} m \cdot r^2$

$J = 0{,}011\ kg \cdot m^2$

c) $\omega = \frac{v}{r}$

$\omega = 55{,}6\ s^{-1}$

d) $E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$

$E_{rot} = 17{,}0\ J$

e) $E_{ges} = E_{tr} + E_{rot}$

$E_{ges} = 59{,}5\ J$

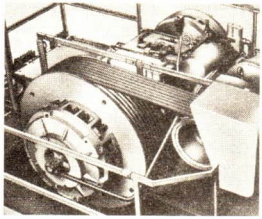
f) $E_{rot} = 28{,}6\%$ von E_{ges}

---

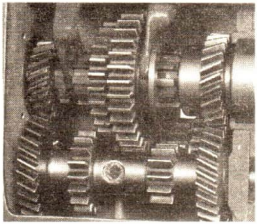
① Begründen Sie, warum eine ungleichmäßig gepackte Wäscheschleuder sehr langsam anläuft und offensichtlich auch nicht die Höchstdrehzahl erreicht!
② Welche nachteiligen Erscheinungen, vor allem technischer Art, treten bei Rotation nicht ausgewuchteter Teile auf?
③ Begründen Sie Ihre Antwort auf die Frage, ob ein Turmdrehkran für Drehbewegungen durch seinen Ausgleichskörper (Gegengewicht) ausgewuchtet ist!
④ Erklären Sie, warum eine Flugmodell-Luftschraube durchaus noch nicht ausgewuchtet zu sein braucht, auch wenn sie, auf eine Achse gesteckt und mit dieser auf zwei parallelen, waagerechten Kanten gelagert, in jeder Stellung im Gleichgewicht ist!
⑤ Begründen Sie den Unterschied zwischen der Gleichung (46) für das Trägheitsmoment und den Gleichungen (49), (52), (54) und (56)!
⑥ Schreiben Sie die Arbeitsschritte, die experimentell zu ermittelnden Größen und den Lösungsweg für die experimentelle Bestimmung des Trägheitsmoments eines Rotationskörpers auf!
⑦ Erläutern Sie die physikalische Größe Energie!

Anwendungsbeispiele zur Dynamik

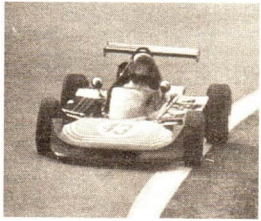
Schwungradantrieb. Kurbelpressen, Exzenterpressen und Reibspindelpressen werden über rotierende Getrieberäder und Schwungräder von einem Elektromotor mit relativ kleiner Leistung angetrieben. Den rotierenden Teilen wird während des Werkzeugrücklaufs vom Motor Rotationsenergie zugeführt. Im wesentlichen wird diese Energie im Schwungrad gespeichert (etwa 95%).
Während des kurzzeitigen Arbeitstaktes wird ein Teil der Rotationsenergie (etwa 15% bis 25%) zur Formung des Preßstückes genutzt.



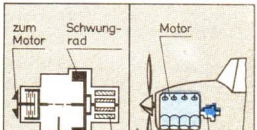
Trägheit rotierender Maschinenteile. Auch bei programmgesteuerten Werkzeugmaschinen machen die Schaltzeiten einen großen Teil der Herstellungszeit des Werkstückes aus. Je schneller eine solche Maschine geschaltet werden kann, um so produktiver ist sie. Kurze Schaltzeiten sind möglich, wenn die Rotationsenergie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



Trägheit von Fahrzeugrädern. Der Anteil der Rotationsenergie der Räder eines Fahrzeuges an der kinetischen Energie dieses Fahrzeuges kann mitunter sehr hoch sein. Solche Fahrzeuge lassen sich schlecht beschleunigen und verzögern.
Rennfahrzeuge und vor allem Personenkraftfahrzeuge, die im Stadtverkehr eingesetzt werden, sollen aber kurze Beschleunigungszeiten haben. Die Räder solcher Fahrzeuge werden deshalb konstruktiv so ausgelegt, daß sie bei Erhaltung guter Rolleigenschaften ein möglichst niedriges Trägheitsmoment besitzen.



Schwungkraftanlasser. Flugzeuge mit Kolbenmotoren, die auch von Flugplätzen ohne technische Hilfsanlagen starten, sind mit einem besonderen, sehr leichten und funktionssicheren mechanisch-elektrischen Motorenanlasser ausgestattet. Durch eine Handkurbel oder mit Hilfe eines kleinen 24 V-Elektromotors und der kleinen Bordbatterie wird ein Schwungrad auf eine Umdrehungszahl von etwa 12000 min^{-1} gebracht. Die Rotationsenergie eines solchen Anlassers reicht aus, um die Kurbelwelle eines Kolbenmotors von mehr als 735 kW Leistung soweit in Bewegung zu setzen, daß der Motor sicher anspringt. Bei Gasturbinentriebwerken bilden Turboverdichter und Turbinenlaufrad die Schwungmasse.



Problemfragen

- Durch welche konstruktiven Maßnahmen könnte man das Trägheitsmoment rotierender Maschinenteile verringern bzw. vergrößern?
- Welche volkswirtschaftlichen Nutzeffekte erreicht man durch die Verringerung der Durchmesser von
  a) Getrieberädern (bei Einhaltung der notwendigen Mindestzähnezahl)
  b) Fahrzeugrädern?
- Wann verringert sich der Energieaufwand zur Beschleunigung eines Rades mehr, bei
  a) Masseverringerung
  b) Durchmesserverringerung?
  Begründen Sie die Antwort!
- Beschreiben Sie den Energiefluß durch die abgebildete Maschine!

Zusammenfassung

11

1. Gewinnung der Problemsituation

In der Natur wie auch in der Technik gibt es die verschiedensten mechanischen Bewegungsvorgänge, die sich auf geradlinige oder kreisförmige Bewegungen zurückführen lassen.

2. Fragestellung

Dieser Sachverhalt veranlaßt zu der Frage, ob zwischen den relativ leicht erkennbaren Gesetzmäßigkeiten der Translation und den Gesetzmäßigkeiten der Rotation ein Zusammenhang besteht.

3. Formulierung einer Hypothese

Es lassen sich für die Rotation Beziehungen bestimmter Größen finden, die analog zu den Beziehungen entsprechender Größen bei Translation gelten.

4. Experimentelle Überprüfung

Mit Hilfe eines drehbar gelagerten hantelförmigen oder eines kreisringförmigen Körpers, der mit einer geradlinig wirkenden Antriebsvorrichtung gekuppelt ist, läßt sich experimentell nachweisen, daß analog zum Grundgesetz der Dynamik der Translation $F = m \cdot a$ ein Grundgesetz der Dynamik der Rotation $M_D = J \cdot \alpha$ formuliert werden kann. Es wurde experimentell die Abhängigkeit des Trägheitsmoments bestimmt:

$J = m \cdot r^2$

5. Folgerung

Entsprechend dem formulierten Grundgesetz der Dynamik der Rotation muß es möglich sein, drehbar gelagerte Körper mit möglichst großer Masse und möglichst großem Abstand zwischen Drehachse und Körper als Speicher für kinetische Energie zu nutzen.

6. Anwendung

Man kann Schwungräder an Arbeitsmaschinen als Energiespeicher benutzen; Räder an Fahrzeugen und Maschinen dagegen werden klein und leicht konstruiert, damit zur Änderung ihrer Bewegungsenergie möglichst wenig Arbeit notwendig ist.

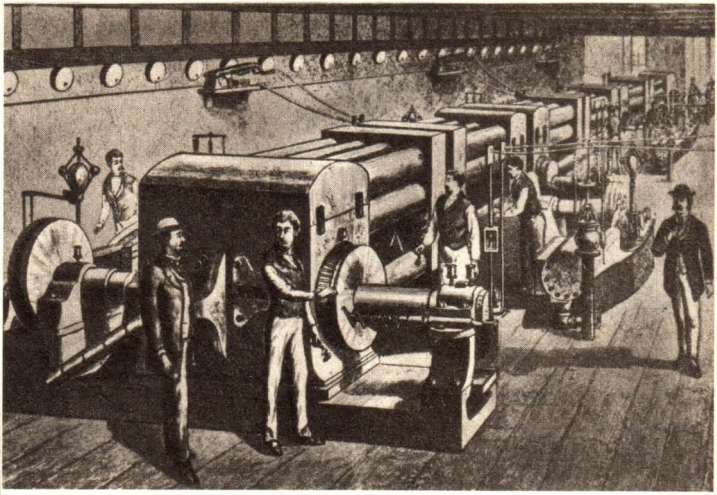
7. Systematisierung

Wenn man die physikalischen Größen und Gesetze der Translation und der Rotation zusammenstellt, so läßt sich eine analoge Bedeutung bzw. ein analoger Aufbau erkennen. Diese Analogie ist formal, sie erleichtert das Problemerkennen in den Bereichen Translation und Rotation.

Größen bei Verschiebung eines Massepunktes auf einer Geraden		Größen bei Drehung eines starren Körpers um eine feste Achse		Zusammenhang zwischen den Größen bei Kreisbewegung eines Massepunktes
Weg	s	Drehwinkel	σ	$\sigma = \frac{s}{r}$
Geschwindigkeit	$v = \frac{ds}{dt}$	Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \frac{d\sigma}{dt}$	$\omega = \frac{v}{r}$
Beschleunigung	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	Winkelbeschleunigung	$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\sigma}{dt^2}$	$\alpha = \frac{a}{r}$
Kraft	F	Drehmoment	M_D	$M_D = F \cdot r$ $\vec{r} \perp \vec{F}$
Masse	m	Trägheitsmoment	J	$J = \int r^2 \cdot dm$
Grundgesetz der Translation	$F = m \cdot a$	Grundgesetz der Rotation	$M_D = J \cdot \alpha$	

Arbeit bei Translation	$W = \int_{s_1}^{s_2} F_s \cdot ds$
Translationsenergie	$E_{tr} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

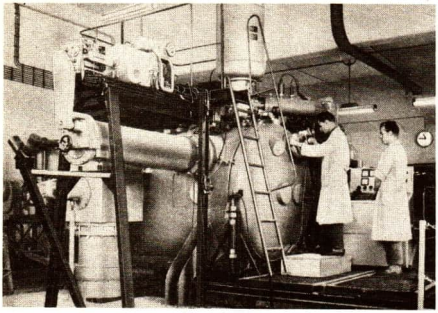
Arbeit bei Rotation	$W = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} M_D \cdot d\sigma$
Rotationsenergie	$E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$



ELEKTRODYNAMIK - FELDER

Das erste öffentliche Elektrizitätswerk wurde 1881 in New York in Betrieb genommen. Damit begann die umfassende technische Nutzung der elektrischen Energie. Die dafür wesentlichen physikalischen und technischen Grundlagen waren schon längere Zeit bekannt. Faraday entdeckte 1831 die elektromagnetische Induktion und entwickelte Vorstellungen über elektrische und magnetische Felder. Von 1861 bis 1864 faßte Maxwell die Erkenntnisse über Elektrizität und Magnetismus zur einheitlichen Theorie des Elektromagnetismus zusammen. Die Dynamomaschine wurde 1866 von Siemens entwickelt, und Edison schuf 1879 die erste gebrauchsfähige Glühlampe. Um die allgemeine Nutzung vieler Glühlampen zu ermöglichen, wurde von Edison das oben genannte Elektrizitätswerk errichtet. Bei der Übertragung elektrischer Energie traten Probleme auf, die es notwendig machten, die elektrischen Leitungsvorgänge zu untersuchen und geeignete Übertragungssysteme und -methoden zu entwickeln.

Elektrostatisches Feld

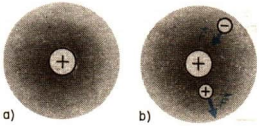


Die moderne Technik erfordert in zunehmendem Maße den Einsatz metallischer Werkstoffe mit besonders hohem Reinheitsgrad. Solche Werkstoffe können mit Hilfe der Hochvakuumtechnik in dem in der DDR im Forschungsinstitut „Manfred von Ardenne" entwickelten Elektronenstrahl-Mehrkammerofen gewonnen werden.

Elektrische Felder werden in der Technik häufig angewandt, weil mit ihrer Hilfe die Bewegung frei beweglicher, elektrisch geladener Teilchen gesteuert werden kann. So ist es zum Beispiel möglich, den Bahnverlauf und die Geschwindigkeit elektrisch geladener Teilchen für den jeweiligen Zweck weitgehend eindeutig festzulegen. Die Möglichkeit, die Bewegung von Elektronen zu steuern, wird genutzt in Fernsehbildröhren, Elektronenstrahlschmelzöfen, Elektronenmikroskopen, elektronischen Bauelementen.
Beim Elektronenstrahlschmelzofen nutzt man diese Möglichkeit der Steuerung des Elektronenstromes, um im Vakuum Metalle zu schmelzen oder umzuschmelzen, so daß ein hoher Reinheitsgrad der Schmelzprodukte erzielt wird.

Eigenschaften und Beschreibung elektrostatischer Felder 12

Im Physikunterricht der Klassen 8 bis 10 wurde Wissen über elektrische Felder erarbeitet, das im folgenden zusammengefaßt dargestellt wird:
Jeder elektrisch geladene Körper ist von einem elektrischen Feld umgeben (Bild 40/2a). Das elektrische Feld übt auf Ladungsträger, die sich im Feld befinden, Kräfte aus (Bild 40/2b).
Das elektrische Feld beschreibt einen besonderen Zustand des Raumes und ist Träger von Energie.
Veränderungen elektrischer Felder breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit $c \approx 300000\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ aus.
Elektrische Felder existieren objektiv.
Das elektrische Feld kann mit Hilfe der elektrischen Feldstärke E beschrieben werden.



40/2a Elektrisches Feld um eine positive Ladung

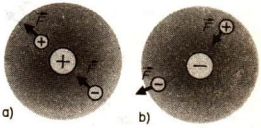
40/2b Kräfte auf elektrische Ladungen im elektrischen Feld

► **Die elektrische Feldstärke E in einem Punkte eines elektrischen Feldes ist der Quotient aus der Kraft F auf einen geladenen Probekörper und der Ladung Q des Probekörpers.**

$$E = \frac{F}{Q} \qquad (61)$$

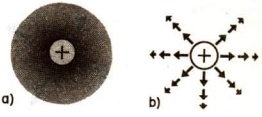
Einheit der elektrischen Feldstärke ist $1\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{A}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1}$, $1\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{A}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1} = 1\ \mathrm{V} \cdot \mathrm{m}^{-1}$.

Die elektrische Feldstärke ist eine vektorielle Größe. Die Richtung von $\vec{E}$ ist gleich der Richtung der Kraft $\vec{F}$, die auf einen positiv geladenen Körper wirkt (Bild 41/1).



41/1

Ein elektrisches Feld kann grafisch mit Hilfe von Vektorpfeilen der Feldstärke $\vec{E}$ (Bild 41/2) oder von Feldlinien veranschaulicht werden (Bild 41/3). In Übereinstimmung mit der Definition der Richtung von $\vec{E}$ ist festgelegt, daß Feldlinien von einer positiven zu einer negativen Ladung verlaufen.
Die Anzahl der gezeichneten Feldlinien ist willkürlich. Dem Feldlinienbild lassen sich zwei wichtige Informationen entnehmen:

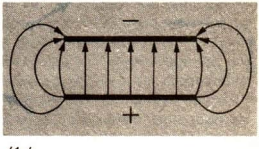


41/2

1. Legt man an einen Punkt einer Feldlinie eine Tangente, so liegt auf ihr der **Vektor der Feldstärke** in diesem Punkt (Bild 41/4) und damit auch der der Kraft.
2. Die Abstände zwischen den Linien eines Feldlinienbildes geben Aufschluß über die **Beträge der elektrischen Feldstärke** im betrachteten Bereich, ohne daß man daraus den absoluten Betrag ermitteln kann. Es gilt:
   kleinerer Abstand – größere Feldstärke,
   größerer Abstand – kleinere Feldstärke.

41/3

Der Verlauf von elektrischen Feldlinien kann auch experimentell, z.B. mit Hilfe von Gipskristallen, dargestellt werden.



41/4

Betrachtungsweisen bei der Erklärung von elektrischen Wechselwirkungen

Im zurückliegenden Physikunterricht wurden unter anderem Kräfte zwischen zwei Körpern betrachtet. Kräfte sind Ausdruck von Wechselwirkungen. So wirkten in einem Teil der bisher erläuterten Experimente die Kräfte infolge der direkten Berührung zweier Körper (z. B. beim Stoß), in anderen Fällen jedoch ohne unmittelbaren Kontakt (z. B. Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern). Der letztere Fall soll am Beispiel des elektrostatischen Feldes eingehender betrachtet werden.

---

① Führen Sie die Umrechnung der Einheit $\mathrm{N} \cdot \mathrm{A}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ in $\mathrm{V} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ durch!

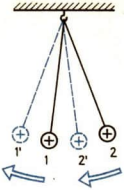
② In welcher Richtung wirkt die Kraft auf eine negative Ladung, wenn die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ vorgegeben ist?

③ Begründen Sie, weshalb das Feldlinienbild eines homogenen Feldes den Schluß zuläßt, daß die elektrische Feldstärke E im gesamten Feld gleich ist!

Ausgangspunkt der Betrachtung ist das in Bild 42/1 dargestellte Experiment.
Zur Beschreibung solcher oder ähnlicher Vorgänge gibt es zwei Betrachtungsweisen:

a) Kräfte zwischen elektrischen Ladungen – elektrische Ladungen sind immer an Körper oder Teilchen gebunden – treten als direkte und augenblickliche Wechselwirkungen zwischen diesen Ladungen auf. Die Kräfte werden übertragen, ohne daß der Raum daran beteiligt ist ($\Delta t = 0$).

b) Durch eine Ladung entsteht ein besonderer Zustand des Raumes, der die Wechselwirkung zwischen elektrischen Ladungen vermittelt. Die durch Bewegung von Ladungen hervorgerufenen Änderungen elektrischer Felder breiten sich von Ort zu Ort mit endlicher Geschwindigkeit aus. Die Wechselwirkungen treten nur zwischen elektrischen Feldern und Ladungen auf ($\Delta t > 0$).



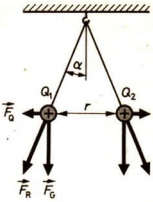
42/1 Wird ein elektrisch geladener Körper 1 mit einem Isolierstab vom Ort 1 an den Ort 1' gebracht, so bewegt sich Körper 2 vom Ort 2 zum Ort 2'.

Es ergibt sich die Frage, ob eine dieser Betrachtungsweisen der Realität besser angepaßt ist.
Geht man von ruhenden Ladungen aus, so läßt sich feststellen, daß alle zwischen diesen Ladungen auftretenden Kräfte sowohl mit a) als auch mit b) gleichwertig beschrieben werden können. Es gibt keinerlei experimentelle Befunde, die Anlaß dazu geben, eine der beiden Betrachtungsweisen zu bevorzugen.
Untersucht man jedoch die zeitliche Änderung der Lage von Ladungen (Bild 42/1), dann ist die unter b) genannte Betrachtungsweise der Realität besser angepaßt.
Würde man die Änderung der Ladungsverteilung mit der Betrachtungsweise a) erklären wollen, dann müßten sich die entsprechenden Kräfte unendlich schnell ausbreiten und sofort auf entferntere Ladungen wirken. Das steht aber im Widerspruch zu den experimentellen Erfahrungen. Es ist erwiesen, daß durch Ladungsänderungen bewirkte Kräfte erst nach einer meßbaren Zeit auf andere Ladungen wirken. Daraus läßt sich schließen, daß der Raum an der Wechselwirkung beteiligt ist.
Mit der unter b) genannten Betrachtungsweise wird eine wichtige Erscheinung der objektiven Realität widergespiegelt. Man spricht in diesem Zusammenhang vom Feld als einer Erscheinungsform der Materie.

Die historische Entwicklung des Feldbegriffs 14

Am Beispiel des elektrischen Feldes kann gezeigt werden, wie sich im Verlaufe der Forschung die beiden Betrachtungsweisen entwickelten. Dazu ist es angebracht, die Entwicklung der Elektrizitätslehre in die Betrachtungen einzubeziehen.
Im 17. Jahrhundert wurden die Erscheinungen der Reibungselektrizität näher untersucht und auch der Name „Elektrizität" eingeführt. Im darauffolgenden Jahrhundert wurde er-

kannt, daß die beobachteten anziehenden und abstoßenden Kräfte auf positive und negative Elektrizität zurückzuführen sind. 1785 führten die Untersuchungen von Coulomb zu dem nach ihm benannten Gesetz (Bild 43/1).



43/1 Zum Coulombschen Gesetz

▼ Zwei Pendelkörper gleicher Masse werden gleichnamig aufgeladen und stoßen sich danach ab. Aus dem Winkel α und der Gewichtskraft $\vec{F}_G$ des einen Pendelkörpers läßt sich die Kraft $\vec{F}_Q$ zwischen den geladenen Körpern bestimmen. Durch Berühren der geladenen Pendelkörper mit gleichartigen ungeladenen Körpern lassen sich die Ladungen Q_1 und Q_2 auf den Pendelkörpern nacheinander halbieren auf $Q/2$; $Q/4$; $Q/8$ usw. Die Messungen ergeben: $F_Q \sim Q_1 \cdot Q_2$ und $F_Q \sim 1/r^2$, zusammengefaßt:

$$F_Q \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}. \quad ①$$

► **Coulombsches Gesetz**

$$F_Q = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (62)$$

Dabei ist k ein konstanter Proportionalitätsfaktor, der sich für das Vakuum als universelle Naturkonstante erweist. In der heutigen Schreibweise wird er mit dem Wert $\frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0}$ angegeben. ε_0 heißt ②

► **elektrische Feldkonstante**

$$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{A \cdot s}}{\mathrm{V \cdot m}}$$

Das Coulombsche Gesetz war das erste Gesetz in der Elektrizitätslehre, das mathematisch formuliert wurde. Es ähnelt in seiner Form sehr stark dem von Newton erkannten Gravitationsgesetz: ③

► **Gravitationsgesetz**

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

Newton hatte angenommen, daß Gravitationswechselwirkungen sofort, ohne Zeitverzug zwischen beiden Körpern erfolgen, ohne daß der dazwischenliegende Raum beteiligt sei. Die Ähnlichkeit zwischen dem Coulombschen Gesetz und dem Newtonschen Gravitationsgesetz legte für die elektrischen Wechselwirkungen die gleiche Auffassung nahe. Diese herrschte bei den Physikern bis ins letzte Drittel des vorigen Jahrhunderts vor.
Eine andere Betrachtungsweise wurde um 1840 von Faraday durch die Einführung des Feldbegriffs eingeleitet. Er ging

① Interpretieren Sie das Coulombsche Gesetz!
② Führen Sie für ε_0 die Einheitenprobe durch!
③ Vergleichen Sie das Coulombsche Gesetz mit dem Gravitationsgesetz!

davon aus, daß durch eine Ladung ein besonderer Zustand des umgebenden Raumes entsteht, der die Wechselwirkungen zwischen Ladungen vermittelt. Obwohl Faraday zunächst das elektrische Feld nur als physikalischen Hilfsbegriff einführte, erwies sich der Gedanke als sehr fruchtbar. Auf dieser Idee aufbauend, konnte Maxwell 1864 eine Theorie des elektromagnetischen Feldes entwickeln, die 1888 von H. Hertz durch den Nachweis von elektromagnetischen Wellen bestätigt werden konnte. Durch diesen experimentellen Nachweis stand fest: Elektromagnetische Wellen breiten sich mit endlicher Geschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) aus. Sie transportieren Energie. Außerdem gelang es auch, experimentell nachzuweisen, daß von bewegten elektrischen Ladungen verzögerte Wirkungen auf andere Ladungen ausgehen.
Diese experimentellen Ergebnisse machten es notwendig, die Realität von elektrischen Feldern anzuerkennen.

Das homogene elektrische Feld in einem Plattenkondensator 15

Im Inneren eines Plattenkondensators ist die Feldstärke des elektrischen Feldes überall gleich. Es ist ein homogenes elektrisches Feld. Die Feldstärke des homogenen elektrischen Feldes eines Plattenkondensators läßt sich besonders einfach bestimmen.
Zur Einführung der elektrischen Spannung U wurde in Klasse 8 die Gleichung (63) benutzt.

$$U = \frac{W}{Q} \tag{63}$$

Bringt man zum Beispiel einen elektrisch negativ geladenen Körper in das Feld eines Plattenkondensators, so wirkt auf ihn in jedem Punkt des Feldes eine konstante Kraft F (Bild 44/1). Bewegt er sich infolge der konstanten Kraft in Richtung der Feldlinien von der negativen zur positiven Kondensatorplatte, dann ist der zurückgelegte Weg gleich dem Abstand s der Kondensatorplatten. An dem Körper wird dabei die Arbeit $W = F \cdot s$ (64) verrichtet. (64) in (63) ergibt

$$U = \frac{F \cdot s}{Q}. \tag{65}$$

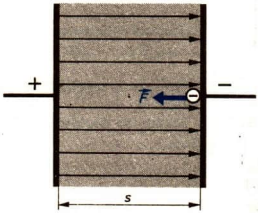
Die Kraft F kann mit Hilfe der Feldstärke ausgedrückt werden.

$$F = E \cdot Q \tag{66}$$

Durch Einsetzen von (66) in (65) und Umformung erhält man

$$E = \frac{U}{s}.$$

U und s lassen sich am Plattenkondensator einfach messen.



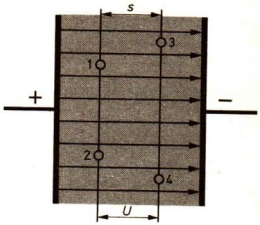
44/1 Bewegung einer negativen Ladung im homogenen Feld eines Plattenkondensators

► **Die elektrische Feldstärke E im homogenen Feld eines Plattenkondensators ist gleich dem Quotienten aus der angelegten Spannung U und dem Plattenabstand s.**

$$E = \frac{U}{s} \qquad (67)$$

Einheit der elektrischen Feldstärke ist $1\ \mathrm{V \cdot m^{-1}}$.

Die Gleichung gilt zunächst nur für den Kondensator. Allerdings gilt die Gleichung auch innerhalb eines jeden homogenen elektrischen Feldes. Man kann mit einem Elektroskop die Spannung zwischen zwei Punkten messen, die auf zwei Ebenen liegen, die senkrecht vom Feld durchsetzt werden und den Abstand s haben (Bild 45/1).
Unter Beachtung der genannten Bedingungen gilt auch: Zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes herrscht eine elektrische Spannung $U = E \cdot s$. ① ② ③



45/1 Zwischen den Punkten 1 und 3 oder 1 und 4 herrscht die gleiche Spannung wie zwischen den Punkten 2 und 3 oder 2 und 4

Arbeit bei der Beschleunigung von Elektronen im elektrischen Feld 16

In der Einleitung zu diesem Abschnitt wurde darauf hingewiesen, daß es für bestimmte technische Geräte oder Anlagen wichtig ist, den Teilchen (Elektronen, Protonen und Ionen) vorgegebene Geschwindigkeiten zu erteilen.
Es sei der einfachste Fall betrachtet: Ein Elektron soll im Vakuum in einem homogenen elektrischen Feld vom Zustand der Ruhe auf die Geschwindigkeit v ($v \ll c$) beschleunigt werden. In diesem Falle ist die verrichtete Arbeit gleich der kinetischen Energie, die das Elektron erlangt, also

$$W = \frac{m_e \cdot v^2}{2}. \qquad (68)$$

Es gilt außerdem $Q = e$ (e = Ladung des Elektrons) und nach Gleichung (63) $W = e \cdot U$ (69). Durch Gleichsetzen von (68) und (69) ergibt sich für die

Beschleunigungsarbeit $e \cdot U = \dfrac{m_e \cdot v^2}{2}$. (70)

Die kinetische Energie bzw. die Geschwindigkeit, die ein Elektron ($v_0 = 0$) durch Beschleunigung in einem elektrischen Feld erhält, ist **nur von der durchlaufenen Spannung abhängig**, da m_e (bei $v \ll c$) und e Konstanten sind. ④

---

① Der Energieerhaltungssatz ist ein wichtiges Kriterium für die Wahrheit physikalischer Aussagen. Weshalb wäre es ein Verstoß gegen den Energieerhaltungssatz, wenn trotz der experimentell gesicherten Aussagen die reale Existenz des elektrischen Feldes nicht anerkannt würde? Denken Sie an die endliche Zeit bei der Ausbreitung von Änderungen des elektrischen Feldes!
② Erläutern Sie die Gültigkeitsbedingungen für die Gleichungen (65) und (67)!
③ Zwischen welchen Punkten des homogenen elektrischen Feldes herrscht keine Spannung?
④ Weshalb wird die kinetische Energie von Elementarteilchen häufig mit der Einheit eV angegeben?

Bei Beachtung der entsprechenden Masse und Ladung gilt Gleichung (70) für alle elektrisch geladenen Teilchen.
Im folgenden soll vereinfacht gezeigt werden, wie die Ladung eines Elektrons durch Messungen bestimmt werden kann. (Auf eine Möglichkeit, die Masse des Elektrons zu bestimmen, wird später eingegangen.)

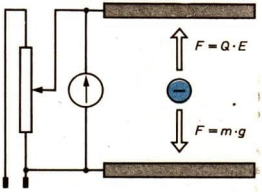
Bestimmung der Elementarladung 17

Millikan (1868 bis 1953) schuf 1909 eine geeignete Anordnung (Bild 46/1) zur Bestimmung kleinster Ladungen.
In das homogene Feld eines Plattenkondensators, dessen Feldlinien vertikal verlaufen, werden feinzerstäubte Öltröpfchen gespritzt, die sich beim Zerstäubungsvorgang elektrisch aufladen.
Die Bewegung eines beliebig ausgewählten Öltröpfchens im Feld wird mit dem Mikroskop beobachtet. Durch das Regulieren der Spannung und damit der Feldstärke wird das Öltröpfchen im Schwebezustand gehalten. Im Schwebefall herrscht Gleichgewicht der beiden Kräfte, die auf das geladene Öltröpfchen wirken:
Kraft des elektrischen Feldes = Gewichtskraft.

$$Q \cdot E = m \cdot g \qquad (71)$$

wobei Q die Ladung des Öltröpfchens ist.
Mit (67) ergibt sich

$$Q = \frac{m \cdot g \cdot s}{U}. \qquad (72)$$



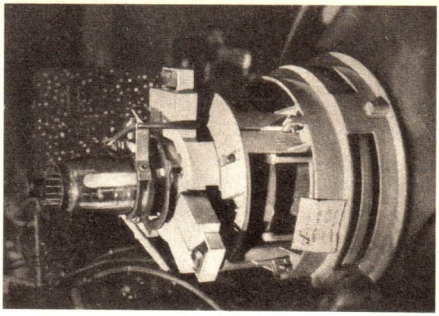
46/1 Schematische Darstellung der Meßanordnung zum Millikan-Versuch

Bis auf die Masse sind die Größen der rechten Seite dieser Gleichung bekannt oder können leicht gemessen werden. Die Bestimmung der sehr kleinen Masse des Öltröpfchens ist möglich (jedoch nicht mittels einer Wägung, sondern eines komplizierten Verfahrens). Millikan fand durch Vergleich der mit höchster Präzision ermittelten Ladungen, daß Q immer als ganzzahliges Vielfaches einer kleinsten positiven oder negativen Ladung, der Elementarladung e, auftritt ($Q = n \cdot e$; $n = 1, 2, 3 \ldots$).

► **Elektrische Elementarladung**
Die elektrische Elementarladung kann positiv und negativ auftreten.

$$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

Protonen und Positronen haben eine positive, Elektronen eine negative Elementarladung.
Mit dem Millikan-Versuch war die atomistische Struktur der elektrischen Ladung endgültig nachgewiesen.



Magnetostatisches Feld

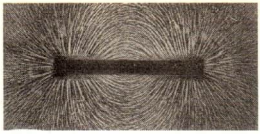
Magnetostatische Felder finden in der Technik vielfältige Anwendung. Beispielsweise hat das auf den Hals der Fernsehbildröhre gesteckte Spulensystem die Aufgabe, ein magnetisches Feld zu erzeugen, mit dessen Hilfe die Richtung des Elektronenstrahles so gesteuert werden kann, daß dieser zeilenweise über den Bildschirm läuft. Diese Aufgabe ist mit hoher Präzision nur lösbar, wenn die Gesetze der Wirkung magnetischer Felder auf bewegte elektrische Ladungen bekannt sind.

Als Magnet bezeichnete man ursprünglich einen Körper mit der Eigenschaft, Eisen anzuziehen und andere Magnete anzuziehen oder abzustoßen. Diese Erscheinungen waren schon im Altertum bekannt.
Im Zusammenhang mit den Forschungen auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre entdeckte der Physiker Christian Oersted (1777 bis 1851) die magnetische Wirkung elektrischer Ströme und untersuchte die Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus. Heute ist die Erkenntnis gesichert, daß Magnetismus nur im Zusammenhang mit elektrischen Strömen oder mit sich ändernden elektrischen Feldern auftritt.
Im folgenden Abschnitt sollen die bisherigen Kenntnisse über magnetische Felder erweitert werden.

Magnetische Felder von Dauermagneten und stromdurchflossenen Leitern 18

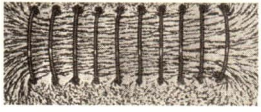
Magnetische Erscheinungen lassen sich besonders einfach an Stabmagneten (Dauermagnete) und stromdurchflossenen Spulen (elektrisch erregte Magnete) untersuchen. Beide Arten von Magneten besitzen einen magnetischen Nord- und einen Südpol. Nähert man die Pole zweier Magnete einander, dann beobachtet man bei gleichnamigen Polen abstoßende, bei ungleichnamigen Polen anziehende Kräfte. Genau wie der Raum um elektrisch geladene Körper einen besonderen Zustand hat, der sich durch Kräfte auf andere elektrisch geladene Körper oder Teilchen äußert, so hat auch der Raum um einen Magneten einen besonderen Zustand, der sich durch

Kräfte auf Körper aus Eisen (und einige andere Stoffe), andere Magnete oder auf stromdurchflossene Leiter äußert. Dieser besondere magnetische Zustand des Raumes wird als magnetisches Feld bezeichnet. Auch für das magnetische Feld gilt: An Wechselwirkungen zwischen Magneten ist der Raum beteiligt. Änderungen des magnetischen Feldes breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus. Magnetische Felder besitzen Energie. Sie existieren objektiv, d. h., sie sind eine Erscheinungsform der Materie.
Das magnetische Feld kann wie das elektrische Feld durch Feldlinien veranschaulicht werden (Bilder 48/1 und 48/2).



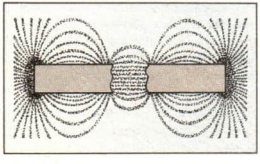
48/1 Feldbild eines Stabmagneten

Feldbilder eines magnetischen Feldes erhält man in einfacher Weise mit Hilfe von Eisenfeilspänen.
Die Feldlinie ist eine Modellvorstellung.
Die Feldlinien verlaufen von einem Pol zum anderen; es treten aus dem einen Pol genau so viele Feldlinien aus, wie in den anderen Pol eintreten. Die Feldlinien liegen an den Polen besonders dicht beieinander, was auf eine große Feldstärke an dieser Stelle hinweist. Durch den großen Abstand der Windungen der Spule gestattet das Bild 48/2 einen Blick in das Innere der Spule. Man erkennt, daß die Feldlinien im Innern der Spule parallel zur Spulenlängsachse verlaufen. Jede Feldlinie tritt aus einem Pol der Spule heraus, läuft außerhalb der Spule zum anderen Pol und im Inneren der Spule zu ihrem „Anfang" zurück, d. h., eine magnetische Feldlinie ist in sich geschlossen und besitzt keinen Anfang und kein Ende.



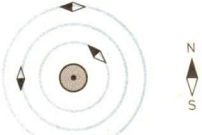
48 2 Feldbild im Innenraum einer Spule

Es ist noch zu untersuchen, ob dieser Sachverhalt auch für einen Stabmagneten zutrifft. In Bild 48/3 ist erkennbar, daß das magnetische Feld zwischen den Trennstellen, ähnlich wie in der Spule, parallel zur Längsrichtung des Stabmagneten verläuft. Man kann annehmen, daß auch beim Stabmagneten die Feldlinien in sich geschlossen verlaufen. Für diese Annahme spricht auch, daß bei der Teilung eines Magneten jedes beliebige Teilstück immer einen Nord- **und** einen Südpol hat. Es gelingt niemals, durch Teilung nur einen Südpol oder nur einen Nordpol zu erhalten. Wäre letzteres der Fall, dann könnten die Feldlinien nicht in sich geschlossen sein; auf solch einem Pol könnten sie nur beginnen oder enden, was aber im Widerspruch zur Erfahrung steht.



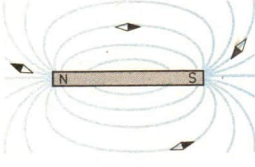
48/3 Feldbild eines in der Mitte aufgetrennten und etwas auseinandergezogenen Stabmagneten

Bisher wurde noch nicht die **Richtung der Feldlinien** festgelegt. Dazu kann man sich einer kleinen, drehbar gelagerten Magnetnadel bedienen.
Das in Bild 48/4 dargestellte Verhalten der Magnetnadel ermöglicht es, den Feldlinien eine Richtung zuzuordnen. Es wurde festgelegt: **Der Nordpol einer Magnetnadel zeigt in einem Punkt des magnetischen Feldes in die positive Richtung der entsprechenden Feldlinie.**



Feld um einen geraden stromdurchflossenen Leiter

Demzufolge verlaufen die Feldlinien außerhalb eines Dauermagneten oder einer stromdurchflossenen Spule vom Nord- zum Südpol, im Inneren entgegengesetzt.



48/4 Bestimmen der Richtung magnetischer Feldlinien mit Hilfe einer Magnetnadel

Kraft auf stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld 19

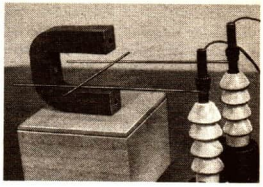
Aus Klasse 9 sind Versuche bekannt, mit deren Hilfe die Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld nachgewiesen wurde. Im folgenden soll ein einfacher Versuch dazu dienen, die Zusammenhänge zwischen der Richtung des magnetischen Feldes, der Stromrichtung und der Richtung der auftretenden Kraft aufzuzeigen (Bilder 49/1 bis 49/3). ③

▼ Wird der Schalter in der Versuchsanordnung geschlossen, so fließt ein Strom. Im gegebenen Falle bewegt sich das Leiterstück nach links.

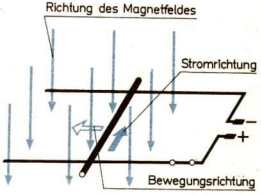
Wird die Spannungsquelle umgepolt, bewegt sich der Leiter nach rechts.

Wird die Richtung des Magnetfeldes umgekehrt, dann bewegt sich das Leiterstück entgegengesetzt wie in den Fällen 1. und 2.

Die Bewegung des stromdurchflossenen Leiterstückes im Magnetfeld kann nur durch eine Kraft bewirkt werden. Die Richtung der Kraft ist senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes und zur Stromrichtung.



49/1 Anordnung zur Untersuchung von Bewegungen stromdurchflossener Leiter im magnetischen Feld



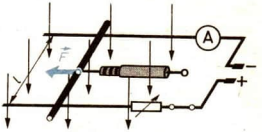
Die magnetische Flußdichte *B* 20

Die Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter wird zur Bestimmung einer magnetischen Feldgröße genutzt. Dazu wird die schon benutzte Versuchsanordnung (Bild 49/2) erweitert, indem ein Strommesser in den Stromkreis geschaltet und die Kraft auf den Leiter mit einem Federkraftmesser gemessen wird (Bild 49/3).

Die Versuchsbedingungen werden wie folgt präzisiert:

- Der Anteil des beweglichen Leiterstückes, der vom Strom durchflossen wird, muß gerade sein, sich vollständig im untersuchten homogenen magnetischen Feld befinden und senkrecht zu den magnetischen Feldlinien liegen.
- Die Stärke und die Richtung des untersuchten magnetischen Feldes sowie die Stromrichtung werden während der Versuche nicht geändert. ④

49/2 Zusammenhang zwischen den Richtungen des Stromes, der Feldlinien und Bewegung des Leiterstückes



49/3 Ergänzte Versuchsanordnung

---

① Vergleichen Sie die Aussagen zum magnetischen Feld mit denen auf Seite 40ff. zum elektrischen Feld!

② Welcher wesentliche Unterschied kommt zwischen den Feldbildern von elektrostatischen und magnetostatischen Feldern zum Ausdruck?

③ Beschreiben Sie den Versuchsaufbau
a) technisch
b) physikalisch!

④ Begründen Sie, weshalb diese Präzisierungen notwendig sind! (Zur Begründung arbeiten Sie auch den Inhalt des nachfolgenden Abschnitts durch!)

Bei den folgenden Messungen werden die Stromstärke und die Länge des stromdurchflossenen Leiters nacheinander bei Konstanz der jeweiligen anderen Größe variiert. Die Kraft auf das Leiterstück wird mit einem Federkraftmesser gemessen. (In den meisten Fällen ist die auftretende Kraft zu klein, um sie mit einem herkömmlichen Federkraftmesser zu messen. Man muß dann andere Meßmethoden für die Kraft verwenden.)

▼ Die Länge l des stromdurchflossenen Leiterstückes bleibt unverändert.
Es wird die Kraft F bei einer Anfangsstromstärke I gemessen. Dann wird die Stromstärke I nacheinander verdoppelt ($2\,I$) und verdreifacht ($3\,I$) und die jeweils wirkende Kraft gemessen.

Man erhält: $F \sim I$ bei $l =$ konstant.

▼ Die Stromstärke I bleibt unverändert.
Durch Verändern des Abstandes der Leiterschienen wird die Länge l des stromdurchflossenen Leiterstückes verändert. Es werden nacheinander die Kräfte bei l, $2\,l$ und $3\,l$ gemessen.

Man erhält:

$F \sim l$ bei $I =$ konstant.

Faßt man die Ergebnisse der beiden Versuche zusammen, dann erhält man:

$$F \sim I \cdot l \quad \text{oder} \quad \frac{F}{I \cdot l} = \text{konstant.}$$

Wiederholt man die Versuchsreihe in einem stärkeren Magnetfeld, so erhält man die gleichen Zusammenhänge, aber die Konstante hat einen größeren Betrag. Die Konstante $\frac{F}{I \cdot l}$ ist geeignet, eine magnetische Feldgröße zu definieren.
Im elektrischen Feld wurde der Quotient F/Q zur Definition der elektrischen Feldstärke E benutzt. Im Falle des magnetischen Feldes definiert man in analoger Weise eine magnetische Feldgröße; die
magnetische Flußdichte B.

► **Die magnetische Flußdichte B ist definiert als Quotient aus der Kraft F und dem Produkt aus der Stromstärke I und der Länge l eines geraden Leiters.**

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \qquad (73)$$

Einheit der magnetischen Flußdichte ist

$1\ \mathrm{N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}} = 1\ \mathrm{V \cdot s \cdot m^{-2}} = 1\ \mathrm{T}.$

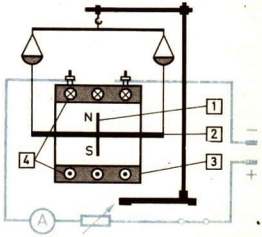
T ist das Einheitenzeichen für die Einheit Tesla. Die Einheit Tesla wurde zu Ehren des Elektroingenieurs Nicola Tesla (1856 bis 1943) gewählt. ①

Um eine Vorstellung zu erhalten, was z. B. 1 T bedeutet, kann man folgenden Vergleich anstellen: Der Zahlenwert der Größe B ist gleich dem Zahlenwert der Größe F unter der

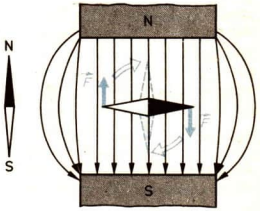
Voraussetzung, daß der Leiter 1 m lang ist und von einem Strom der Stromstärke 1 A durchflossen wird.
Der in Bild 49/2 dargelegte Zusammenhang zwischen Feld-, Strom- und Kraftrichtung ermöglicht es, für die magnetische Flußdichte eine Richtung anzugeben; die magnetische Flußdichte ist ein Vektor. Im Falle eines genügend kurzen Leiterstückes kann mit dem angegebenen Meßverfahren die magnetische Flußdichte $\vec{B}$ auch für einzelne Punkte eines inhomogenen magnetischen Feldes näherungsweise ermittelt werden. Das Meßverfahren ist völlig unabhängig davon, wie das magnetische Feld erzeugt wird. Im folgenden soll die Bestimmung der magnetischen Flußdichte für den speziellen Fall eines homogenen magnetischen Feldes im Inneren einer stromdurchflossenen Spule erarbeitet werden.

Magnetische Flußdichte für das homogene Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule 21

Zwischen der magnetischen Flußdichte B im Inneren einer Spule und der Windungszahl N, der Länge l der Spule sowie der Stromstärke I in der Spule besteht ein Zusammenhang. Wenn für diesen Zusammenhang ein Gesetz bekannt ist, braucht B nicht mehr nach dem oben behandelten Meßverfahren bestimmt zu werden, sondern man kann B aus den Daten der Spule und der Stromstärke berechnen. Anders ausgedrückt: Benötigt man in einer elektrischen Anlage eine bestimmte magnetische Flußdichte, so kann man eine Spule mit den oben angeführten Daten so konstruieren, daß in ihrem Inneren ein magnetisches Feld mit der gewünschten magnetischen Flußdichte entsteht.
Die Zusammenhänge zwischen den Größen B, N, I und l werden mit einer Versuchsanordnung entsprechend Bild 51/1 untersucht.
Der Versuchsanordnung liegt folgende Wirkungsweise zugrunde: Die Magnetnadel steckt rechtwinklig im Holzstab und steht rechtwinklig zum homogenen Magnetfeld der stromdurchflossenen Spule. Auf die Magnetnadel wirkt ein Drehmoment M_D (vgl. auch Bild 51/2), das der magnetischen Flußdichte B proportional ist ($M_D \sim B$). Das Drehmoment überträgt sich auf den Holzstab und bringt die Waage aus dem Gleichgewicht. Wird die Waage durch Auflegen von Wägestücken ins Gleichgewicht gebracht, dann kann die Gewichtskraft F_G bestimmt werden, die zur Erzeugung eines kompensierenden Drehmoments nötig ist. Das Drehmoment $M_D = F_G \cdot r_w$ ist wegen der konstanten Länge r_w eines Waagebalkens der Kraft F_G proportional ($M_D \sim F_G$), und daraus folgt $B \sim F_G$. Die letzte Beziehung wird bei der Messung der Größen benutzt, und anstelle von B wird F_G gemessen. ②



51/1 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Bestimmung der magnetischen Flußdichte im Inneren einer Spule
1 Magnetnadel
2 Holzstab
3 Spule
4 Spulenwindung (Schnitt)



51/2 Auf die beiden Pole der drehbar gelagerten Magnetnadel wirken Kräfte. Sie erzeugen so lange ein Drehmoment, bis beide Kräfte auf einer Wirkungslinie liegen und das Drehmoment Null wird.

---

② Weisen Sie nach, daß die Einheiten $1\ N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ und $1\ V \cdot s \cdot m^{-2}$ gleich sind!
③ Begründen Sie, weshalb dieses Vorgehen zu richtigen physikalischen Aussagen führt!

In einem Versuch können gemessen werden:

Teil-versuch	konstante Größen	stufenweise veränderte Größe	erkannte Abhängigkeit
1	l und N	I	$F_G \sim I$
2	I und l	N	$F_G \sim N$
3	I und N	l	$F_G \sim \frac{1}{l}$

Zusammenfassung:

$$F_G \sim \frac{I \cdot N}{l}$$

und wegen $B \sim F_G$ ist auch $B \sim \frac{I \cdot N}{l}$ (74)

Durch Einführen eines Proportionalitätsfaktors μ_0 geht die Proportionalität (74) über in die Gleichung

$$B = \mu_0 \frac{I \cdot N}{l}. \quad (75)$$

μ_0 heißt **magnetische Feldkonstante**. Sie ist eine universelle Naturkonstante und hat den Wert ①

$$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{V \cdot s \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}}.$$

Stoffe im magnetischen Feld der Spule. Aus Klasse 9 ist bekannt, daß die magnetische Wirkung einer Spule durch das Einbringen eines Eisenkerns wesentlich verstärkt wird. Stoffe, die solch eine Eigenschaft besitzen, nennt man ferromagnetische Stoffe. Der häufigste Stoff dieser Art ist Eisen mit seinen Legierungen.
Ferromagnetische Stoffe, die sich in der Spule befinden, verstärken die magnetische Flußdichte B. Neben Windungszahl N, Länge l und Stromstärke I hat auch der Stoff in der Spule einen Einfluß auf die Größe B. Deshalb muß in die Gleichung (75) eine Größe aufgenommen werden, die diesen Einfluß des Stoffes zum Ausdruck bringt. Dazu wird die **relative Permeabilität** μ_{rel} als reiner Zahlenfaktor eingeführt. Die relative Permeabilität ist eine Materialkenngröße, die angibt, um welchen Faktor sich die magnetische Flußdichte im Material gegenüber der magnetischen Flußdichte im Vakuum ändert. Im Vakuum ist $\mu_{rel} = 1$ (für Luft gilt: $\mu_{rel} \approx 1$).

► **Magnetische Flußdichte im stofferfüllten Raum im Inneren einer Spule**

$$B = \mu_{rel} \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l} \quad (76)$$

μ_{rel} ist nicht nur vom Material, sondern auch von der Stärke des Magnetfeldes abhängig. Für die jeweils in einer Spule herrschenden magnetischen Verhältnisse muß μ_{rel} einem Tafelwerk entnommen werden.

■ Eine Spule ohne Eisenkern mit 500 Windungen und einer Länge von 8 cm wird von einem Strom mit der Stromstärke 0,3 A durchflossen. Wie groß ist die magnetische Flußdichte?

Gegeben:

$N = 500$

$l = 0{,}08\ \text{m}$

$I = 0{,}3\ \text{A}$

$\mu_{rel} = 1$

$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$

Lösung:

$$B = \mu_{rel} \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l}$$

$$B = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0{,}3 \cdot 500}{0{,}08}\ \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$B = 2{,}36 \cdot 10^{-3}\ \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\underline{\underline{B = 2{,}36 \cdot 10^{-3}\ \text{T}}}$$

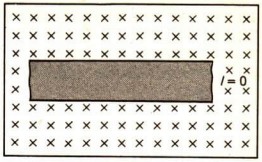
Gesucht:

B

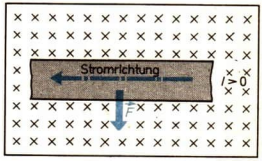
Wird in diese Spule zusätzlich ein Eisenkern mit der relativen Permeabilität $\mu_{rel} = 700$ geschoben, so wird

$$B = 700 \cdot 2{,}36 \cdot 10^{-3}\ \text{T}$$

$$\underline{\underline{B = 1{,}65\ \text{T}}}$$



53/1 Leiter im Magnetfeld; $I = 0$ – keine Kraft auf den Leiter



53/2 Leiter im Magnetfeld; $I > 0$ – Kraft auf den Leiter

Die Lorentzkraft

22

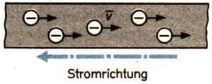
Im Text zum Bild 47/1 wurde darauf hingewiesen, daß es möglich ist, die Richtung von Elektronenstrahlen mit Hilfe magnetischer Felder zu beeinflussen.

Bisher wurde die Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld untersucht und aus (73) das Gesetz $F = B \cdot I \cdot l$ erkannt. Geht man davon aus, daß sich ein metallischer Leiter konstanter Länge in einem konstanten, homogenen Magnetfeld rechtwinklig zur Richtung der Feldlinien befindet, ergeben sich folgende Aussagen:

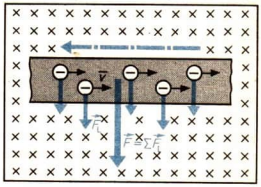
- Solange kein Strom durch den Leiter fließt, wirkt keine Kraft auf ihn (Bild 53/1).
- Fließt ein Strom durch den Leiter, dann ist eine Kraft F rechtwinklig zur Stromrichtung und zur Richtung der magnetischen Feldlinien feststellbar (Bild 53/2). Die Kraft ist nicht vom Stoff des Leiters abhängig, sondern nur von der elektrischen Stromstärke.

Diese Aussagen kann man sich im Modell des elektrischen Leitungsvorganges in metallischen Leitern folgendermaßen verdeutlichen:

- Der elektrische Strom in einem Leiter ist die geordnete Bewegung von Elektronen (Bild 53/3).
- Auf jedes einzelne bewegte Elektron wirkt im Magnetfeld eine Kraft F_L, die senkrecht auf der Richtung des Magnetfeldes und der Bewegungsrichtung der Elektronen steht. Die Summe der Kräfte F_L auf die Elektronen ist gleich der Kraft F, die auf den Leiter wirkt (Bild 53/4).



53/3 Elektronenfluß im Leiter – Richtung des Stromes



53/4 Summe der Kräfte auf die Elektronen gleich Kraft auf den Leiter

---

① Vergleichen Sie die Gleichungen $B = \frac{F}{I \cdot l}$ und $B = \mu_0 \frac{I \cdot N}{l}$ bezüglich ihres physikalischen Inhaltes und ihrer experimentellen Grundlagen! Gehen Sie auch auf die Größen I und l ein!

Die Kraft auf **ein** Elektron oder **ein** anderes elektrisch geladenes Teilchen wird **Lorentzkraft** F_L genannt.
Nach dieser Vorbetrachtung werden die quantitativen Zusammenhänge zwischen magnetischem Feld und Lorentzkraft dargelegt.

Es wird von der Gleichung (73) ausgegangen:

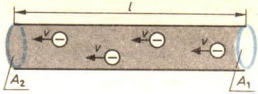
Die Stromstärke ist definiert: $I = \frac{Q}{t}$.

In Gleichung (73) eingesetzt, erhält man: $F = \frac{Q \cdot l \cdot B}{t}$.

Ersetzt man in der letzten Gleichung Q durch $n \cdot e$ und t durch $\frac{l}{v}$ (siehe Bild 54/1), dann ergibt sich die Gleichung:

$$F = n \cdot e \cdot v \cdot B. \qquad (77)$$

Für den Fall $n = 1$ erhält man die Gleichung für die Kraft auf **ein** Elektron, die
Lorentzkraft.



54/1 Ein Elektron, das sich zu einem bestimmten Zeitpunkt am Anfang A_1 des Leiters befindet und die mittlere Geschwindigkeit (in der Zeichnung und in der Ableitung vereinfacht v genannt) besitzt, benötigt bis zum Ende A_2 des Leiters die Zeit $t = l/v$. In der Zeit t haben sich alle n Elektronen, die sich zum betrachteten Zeitpunkt im Leiter befinden, durch den Querschnitt bei A_2 bewegt, das heißt, in der Zeit t ist durch den Querschnitt bei A_2 die Ladung $Q = n \cdot e$ transportiert worden.

► **Die Lorentzkraft tritt bei elektrisch geladenen Teilchen auf, die sich in einem magnetischen Feld bewegen.** Die Gleichung gilt nur, wenn sich die Teilchen rechtwinklig zu den Feldlinien des Magnetfeldes bewegen.

$$\mathbf{F_L = e \cdot v \cdot B} \qquad (78)$$

$\vec{F}_L \perp \vec{v}$

$\vec{F}_L \perp \vec{B}$

$\vec{v} \perp \vec{B}$

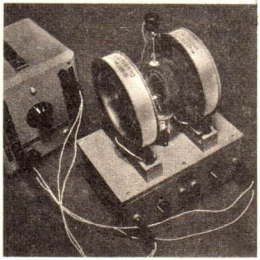
Gleichung (78) steht im engen Zusammenhang mit Gleichung (73).

Die Elementarladung e kann sowohl positiv als auch negativ sein. Wenn $\vec{v}$ und $\vec{B}$ unverändert bleiben, ist der Betrag der Lorentzkraft bei positiven Ladungen genauso groß wie der bei negativen. Die Kräfte sind einander entgegengesetzt gerichtet. 1

Bei Beachtung der Bedingungen lassen sich aus der Gleichung (78) folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Da die Kraft auf bewegte Elektronen im Magnetfeld immer rechtwinklig auf ihrer Bewegungsrichtung steht, kann diese Kraft nach den Gesetzen der Mechanik nur eine Änderung der Richtung der Geschwindigkeit bewirken, niemals aber die Änderung des Betrages der Geschwindigkeit.
- Bewegen sich Elektronen parallel zu den magnetischen Feldlinien, dann übt das magnetische Feld keine Kraft auf sie aus. 2 3

54/2 Wehnelt-Röhre zur Bestimmung der spezifischen Ladung von Elektronen



Die spezifische Ladung des Elektrons 23

Bei den Ausführungen zur Bestimmung der Elementarladung (↗ S. 46.) wurde darauf hingewiesen, daß es möglich ist, auch die Masse m_e eines Elektrons zu bestimmen. Es ist nicht möglich, die Masse des Elektrons direkt zu messen, es kann nur der Quotient e/m_e experimentell bestimmt werden, beispielsweise mit Hilfe der Wehnelt-Röhre (Bild 54/2).

▼ In der Wehnelt-Röhre wird ein Elektronenstrahl erzeugt. Die Geschwindigkeit der Elektronen hängt von der Spannung zwischen Katode und Anode ab (↗ S. 45). Der Elektronenstrahl verläuft rechtwinklig zur Richtung des magnetischen Feldes und erfährt eine Ablenkung (Bild 55/2), so daß sich die Elektronen auf einer Kreisbahn bewegen. Die Bahn der Elektronen ist durch ein schwaches Leuchten zu erkennen, das durch Zusammenstöße der Elektronen mit Gasmolekülen entsteht.

Gemessen werden:

- Der Durchmesser der so entstandenen Kreisbahn $d = 2r$,
- die Anodenspannung U,
- die Stromstärke I in den Spulen.

Die Elektronen werden im elektrischen Feld zwischen Katode und Anode auf die Geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}$ beschleunigt – siehe Gleichung (70).

Bei der Bewegung im homogenen magnetischen Feld wirkt auf sie die Lorentzkraft (78), und sie bewegen sich auf einer Kreisbahn. Die Lorentzkraft ist dabei die Radialkraft $F_R = \frac{m_e \cdot v^2}{r}$. Durch Gleichsetzen und Einsetzen von v aus (70) erhält man:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2}. \qquad (4)$$

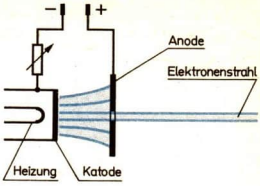
Der Quotient $\frac{e}{m_e}$ heißt spezifische Ladung des Elektrons.

► **Spezifische Ladung eines Elektrons**

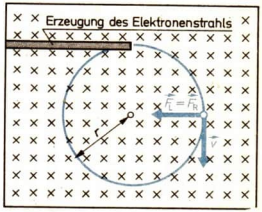
$$\frac{e}{m_e} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\ \mathrm{C \cdot kg^{-1}}$$

U und r lassen sich messen. B wird aus der Stromstärke und den Angaben des Herstellers der Spulen über Windungszahl und Länge berechnet.

Die Masse m_e läßt sich berechnen, da e bereits experimentell bestimmt wurde. (5)



55/1 Vereinfachtes Schema der Erzeugung eines Elektronenstrahls.
Aus der geheizten Katode treten Elektronen aus und werden im elektrischen Feld zwischen Katode und Anode beschleunigt. Durch ein Loch in der Anode tritt ein Elektronenstrahl.



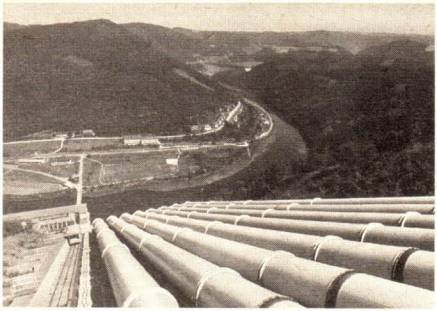
55/2 Schematische Darstellung der Ablenkung der Elektronen im Magnetfeld

---

(1) Erklären Sie mit Hilfe der Lorentzkraft die Ablenkung stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld!
(2) Begründen Sie mit Hilfe der Gesetze der Mechanik, weshalb sich die erste Schlußfolgerung in folgender Weise erweitern läßt: Die kinetische Energie elektrisch geladener Teilchen läßt sich durch magnetische Felder nicht ändern!
(3) Vergleichen Sie anhand Tabelle 56/1 magnetostatische und elektrostatische Felder hinsichtlich ihres Ursprungs, ihres Nachweises und ihrer Beschreibung durch Feldgrößen!
(4) Leiten Sie die Gleichung selbständig her!
(5) Berechnen Sie die Masse des Elektrons!

Merkmal	Elektrostatisches Feld	Magnetostatisches Feld
Ort der physikalischen Erscheinung	Raum um die ruhenden elektrischen Ladungen	Raum um stromdurchflossene Leiter oder um Dauermagnete
Feld wird hervorgerufen durch	ruhende elektrische Ladungen	bewegte elektrische Ladungen
Feldnachweis erfolgt über	Kraft auf Probeladung Q	Kraft auf geraden stromdurchflossenen Leiter ($I \cdot l$)
Feldbeschreibende Größe	$\vec{E}$	$\vec{B}$
Gleichung zur Bestimmung der Stärke des Feldes	$E = \frac{F}{Q}$ $\vec{F} \parallel \vec{E}$	$B = \frac{F}{I \cdot l}$ $\vec{F} \perp \vec{B}$ Kraft wirkt senkrecht zur Richtung des Stromes im Leiter
Feldkonstanten	ε_0	μ_0
Feldlinienverlauf	beginnen und enden an Ladungen	in sich geschlossene Linien
Besonderheit in der Analogiebetrachtung	Ladungen können einzeln auftreten	Magnetpole treten nur paarweise auf

Tabelle 56/1



Elektromagnetisches Feld

Pumpspeicherwerke, wie z. B. Hohenwarte, liefern in den Spitzenbelastungszeiten zusätzlich zu den übrigen Kraftwerken elektrische Energie. Die maximale Leistung aller Pumpspeicherwerke unserer Republik beträgt etwa 2000 MW. Damit tragen sie zur bedarfsgerechten Versorgung aller Bereiche der Volkswirtschaft und der Bevölkerung mit Elektroenergie bei.

Beim Pumpspeicherwerk ist die Energie in Form der potentiellen Energie des Wassers im Oberbecken gespeichert. Das Wasser strömt im Bedarfsfalle zu Tal und versetzt die Laufräder der Turbinen in Rotation. Sie treiben die Generatoren an, die die mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln. In Zeiten geringen Bedarfs wird elektrische Energie aus dem Netz entnommen und benutzt, um das Wasser wieder in das Oberbecken zu pumpen.
Sowohl bei der Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische als auch der mechanischen Energie in elektrische finden die gleichen elektrischen Maschinen Verwendung. Wie ist es möglich, daß diese Maschinen sowohl als Generatoren als auch als Motoren arbeiten können?
Motoren und Generatoren besitzen nicht nur den gleichen prinzipiellen Aufbau, ihnen liegen auch gleiche bzw. eng miteinander verknüpfte Gesetzmäßigkeiten zugrunde. Das Erkennen dieser Gesetzmäßigkeiten erfordert eine umfassende experimentelle Untersuchung der elektromagnetischen Induktion sowie ihre mathematische Beschreibung.

Die Induktionsspannung im zeitlich konstanten Magnetfeld

24

Die elektromagnetische Induktion ist eine der grundlegenden Erscheinungen im Bereich der Physik.
Wesentliche Erkenntnisse über die elektromagnetische Induktion wurden in Klasse 9 gewonnen:

- In einer Spule wird eine Spannung induziert, solange sich das von der Spule umschlossene Magnetfeld ändert.
- Die Induktionsspannung ist um so größer, je größer die Änderung der Stärke des Magnetfeldes, die Windungsanzahl und der Querschnitt der Induktionsspule sind.

Diese Aussagen beschreiben jedoch den Vorgang der elektromagnetischen Induktion noch nicht ausreichend.

Bedingungen für die Erzeugung einer Induktionsspannung. In den nachfolgend dargestellten Experimenten findet zunächst ein zeitlich konstantes Magnetfeld Verwendung.

▼ 1. In der im Bild 58/1 dargestellten Versuchsanordnung wird die Leiterschleife hin- und herbewegt. Der Zeiger des Meßinstruments schwingt in gleichem Rhythmus um die Nullage. Hört die mechanische Bewegung auf, so zeigt das Meßinstrument keine Induktionsspannung mehr an. ① ②

▼ 2. Die Spule im Bild 58/2 wird abwechselnd vom Schenkel des Magneten abgezogen und auf ihn aufgeschoben. Das Meßinstrument zeigt eine Wechselspannung an. Die Ausschläge sind größer als beim 1. Experiment. Die Induktionsspannung tritt nur so lange auf, wie die Bewegung anhält. ③ ④ ⑤

▼ 3. Die Leiterschleife im Bild 58/3 wird gedreht. Das Meßinstrument zeigt eine Wechselspannung an. Die Frequenz der Wechselspannung und die der Drehbewegung stimmen überein. Hört die Bewegung auf, so wird auch keine Spannung mehr angezeigt. ⑥

▼ 4. Die Spule im Bild 58/4 wird gedreht. Es tritt wie im 3. Experiment eine Wechselspannung auf. Die Ausschläge des Meßinstruments sind jedoch größer. ⑦

▼ 5. Die Leiterschleife im Bild 58/5 wird abwechselnd gehoben und gesenkt. Im Unterschied zum 1. Experiment (Bild 58/1) zeigt das Meßinstrument **keine** Induktionsspannung an. ⑧

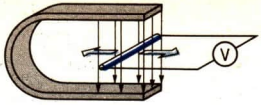
▼ 6. Die Leiterschleife im Bild 59/1 wird gedreht. Im Unterschied zum 3. Experiment (Bild 58/3) tritt **keine** Induktionsspannung auf. ⑨

▼ 7. In der im Bild 58/1 dargestellten Versuchsanordnung wird der Hufeisenmagnet durch einen Elektromagneten ersetzt. Beim Hin- und Herbewegen der Leiterschleife tritt wie im ersten Experiment eine Wechselspannung auf.

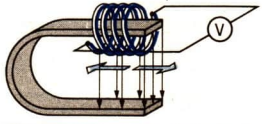
In gleicher Weise bleibt auch bei den in den Bildern 58/2 bis 59/1 dargestellten Anordnungen der Effekt unverändert, wenn anstelle des Dauermagneten ein Elektromagnet Verwendung findet.

▼ 8. Das 1. Experiment wird in folgender Form abgewandelt wiederholt: Anstelle der Leiterschleife wird der Hufeisenmagnet hin- und herbewegt (Bild 59/2). Wie im 1. Experiment tritt während der Bewegung eine Induktionsspannung auf.

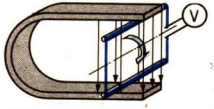
Wird im 2. Experiment statt der Spule der Hufeisenmagnet bewegt, so tritt ebenfalls das gleiche Versuchsergebnis auf. Entsprechendes gilt für die Experimente 3 bis 7 bei Translation bzw. Rotation des Magneten.



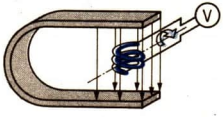
58/1 Translation eines Teils einer Leiterschleife im Feld eines Dauermagneten. Der linke Teil der Leiterschleife befindet sich im weitgehend homogenen Magnetfeld des Hufeisenmagneten, im Bereich des rechten Teils ist die magnetische Flußdichte vernachlässigbar klein.



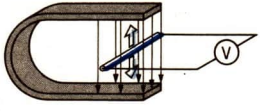
58/2 Translation einer Spule im inhomogenen Feld eines Dauermagneten



58/3 Rotation einer Leiterschleife im Feld eines Dauermagneten. Die Leiterschleife wird um eine Achse gedreht, die quer zu den magnetischen Feldlinien orientiert ist.

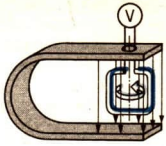


58/4 Rotation einer Spule im Feld eines Dauermagneten. Die Spule wird um eine Achse gedreht, die nicht parallel zu den Feldlinien verläuft.

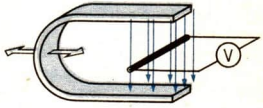


58/5 Translation eines Teils einer Leiterschleife im Feld eines Dauermagneten. Die Bewegung erfolgt parallel zu den magnetischen Feldlinien.

Die durchgeführten Experimente ermöglichen es, allgemeingültige Aussagen bez. der elektromagnetischen Induktion in einem zeitlich konstanten Magnetfeld zu treffen.
In allen Fällen, in denen eine Induktionsspannung nachgewiesen wurde, änderte sich das von der Leiterschleife bzw. Spule umschlossene magnetische Feld. Dieses Entstehen einer Induktionsspannung kann auch auf der Grundlage der Lorentzkraft erklärt werden. Man erkennt: In allen Fällen, in denen eine Induktionsspannung auftrat, bewegten sich Teile der Leiterschleife quer zu den magnetischen Feldlinien. Dabei unterliegen die Ladungsträger in der Leiterschleife der Lorentzkraft. Die wanderungsfähigen Elektronen werden unter dem Einfluß dieser Kraft zu einem Ende der Leiterschleife gedrängt. Dadurch tritt zwischen den Enden der Leiterschleife eine Spannung auf.
Die Spule kann in jedem Falle als eine Reihenschaltung einzelner Leiterschleifen betrachtet werden, wodurch sich die Teilspannungen zu einer wesentlich größeren Gesamtspannung addieren.
Die Experimente 5 und 6 zeigen, daß manche Relativbewegungen zwischen Leiterschleife und Magnetfeld zu keiner Induktionsspannung führen. Durch Vergleichen der Bedingungen in den verschiedenen Experimenten erkennt man die Ursache dieser Erscheinung: In diesen Fällen ändert sich das von der Leiterschleife umschlossene Magnetfeld nicht. Zwar bewegen sich im 6. Experiment Teile der Leiterschleife quer zu den magnetischen Feldlinien, die dadurch induzierten Teilspannungen sind aber gleich groß und einander entgegengerichtet, so daß sie sich kompensieren.



59/1 Rotation einer Leiterschleife im Feld eines Dauermagneten. Die Rotationsachse verläuft parallel zu den magnetischen Feldlinien.



59/2 Ruhende Leiterschleife und bewegtes Feld eines Dauermagneten. Der linke Teil der Leiterschleife befindet sich im weitgehend homogenen Teil des Magnetfeldes.

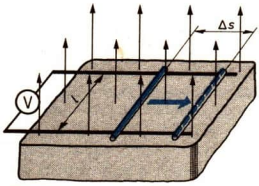
---

① Erklären Sie das Auftreten der Induktionsspannung nach Bild 58/1 auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse in Klasse 9!
② Deuten Sie das Auftreten der Induktionsspannung nach Bild 58/1 ausgehend von der Lorentzkraft, der die wanderungsfähigen Ladungsträger im linken Teil der Leiterschleife unterliegen!
③ Erklären Sie das Auftreten der Induktionsspannung auf der Grundlage der Untersuchungsergeb nisse von Klasse 9!
④ Deuten Sie das Auftreten der Induktionsspannung mittels der Lorentzkraft, der die Ladungsträger in Teilen der Spule unterliegen!
⑤ Geben Sie an, warum die Induktionsspannung bei der Spule wesentlich größer als die bei der Leiterschleife ist!
⑥ Erklären Sie das Auftreten einer Induktionsspannung beim Drehen einer Leiterschleife im magnetischen Feld auf der Grundlage sowohl der Untersuchungsergebnisse von Klasse 9 als auch der Lorentzkraft!
⑦ Erklären Sie das Auftreten einer Wechselspannung beim Drehen einer Spule im magnetischen Feld!
⑧ Begründen Sie sowohl unter Verwendung der Untersuchungsergebnisse aus Klasse 9 als auch auf der Grundlage Ihrer Kenntnisse über die Lorentzkraft, warum beim Heben und Senken der Leiterschleife in Bild 58/5 keine Induktionsspannung auftritt!
⑨ Erklären Sie auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse aus Klasse 9, warum beim Drehen einer Leiterschleife um eine Achse parallel zu den magnetischen Feldlinien keine Induktionsspannung auftritt! Wie läßt sich dieser Sachverhalt mit der Lorentzkraft erklären?
⑩ Erklären Sie das Entstehen einer Induktionsspannung beim Hin- und Herbewegen des Magneten in Bild 59/2 auf der Grundlage der in Klasse 9 geschaffenen Formulierungen und auf der Grundlage der Lorentzkraft!
⑪ Warum tritt keine Induktionsspannung auf, wenn sich eine kleine Leiterschleife in einem ausgedehnten homogenen magnetischen Feld quer zu den magnetischen Feldlinien bewegt? Beantworten Sie diese Frage auch unter Verwendung Ihrer Kenntnisse über die Lorentzkraft!

Die Experimente führen zu folgenden Ergebnissen:

- Im Falle eines zeitlich konstanten magnetischen Feldes ist eine Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter eine unabdingbare Voraussetzung für das Auftreten einer Induktionsspannung.
- Nicht jede Relativbewegung bedingt eine Induktionsspannung.
- Bewegt sich ein Teil einer Leiterschleife quer zu den magnetischen Feldlinien, so tritt an seinen Enden eine Induktionsspannung auf.

Mathematische Beschreibung des Induktionsvorganges. Bei der weiteren Untersuchung der elektromagnetischen Induktion in einem zeitlich konstanten Magnetfeld werden entsprechend dem Experiment nach Bild 58/1 die im Bild 60/1 dargestellte Anordnung und die dabei erzielten experimentellen Ergebnisse zugrunde gelegt. Zur Vereinfachung wird angenommen, daß sich nicht die ganze Leiterschleife, sondern nur das Leiterstück der Länge l bewegt, und zwar im homogenen Magnetfeld der magnetischen Flußdichte $\vec{B}$ senkrecht zu den Feldlinien um die Strecke Δs.



60/1 Bewegung eines Leiterstückes der Länge l im homogenen Magnetfeld der Flußdichte $\vec{B}$

Durch die Bewegung des Leiterstücks wird die von der Leiterschleife umschlossene Fläche verändert. Bewegt man das Leiterstück gleichförmig, so tritt eine konstante Spannung U_{ind} auf. Liegt ein geschlossener Stromkreis vor, so fließt ein Strom I. Wird ein Leiter in einem konstanten Magnetfeld von einem Strom der Stärke I durchflossen, so wirkt auf ihn die Kraft (vgl. S. 50)

$$F = B \cdot I \cdot l. \tag{79}$$

Diese Kraft ist der Bewegung des Leiterstückes entgegengerichtet. Demzufolge muß man eine im Betrag gleich große, aber entgegengerichtete Kraft zum Bewegen des Leiters aufwenden.

Bei dieser Bewegung des Leiterstücks im Magnetfeld wird mechanische Energie in elektrische umgewandelt. Aufgrund des Energieerhaltungssatzes gilt die Gleichheit beider Arbeiten.

mechanische Arbeit = elektrische Arbeit

$$W_{mech} = W_{el}. \tag{80}$$

Für die mechanische Arbeit gilt

$$W_{mech} = F \cdot \Delta s. \tag{81}$$

Hieraus folgt unter Berücksichtigung von (79)

$$W_{mech} = I \cdot B \cdot l \cdot \Delta s. \tag{82}$$

Die vom Leiterstück überstrichene Fläche ist

$$\Delta A = l \cdot \Delta s. \tag{83}$$

Deshalb kann für die mechanische Arbeit auch geschrieben werden

$$W_{mech} = I \cdot B \cdot \Delta A. \tag{84}$$

Für die elektrische Arbeit gilt die bekannte Gleichung

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

in der Form

$$W_{el} = U_{ind} \cdot I \cdot \Delta t. \tag{85}$$

Aus (80) ergibt sich mit (84) und (85) die Gleichung

$$I \cdot B \cdot \Delta A = U_{ind} \cdot I \cdot \Delta t. \tag{86}$$

Daraus folgt für die Induktionsspannung

$$U_{ind} = \frac{B \cdot \Delta A}{\Delta t}. \tag{87}$$

Durch Bilden des Grenzwertes dieses Differenzenquotienten erhält man den Momentanwert der in der Leiterschleife induzierten Spannung zu

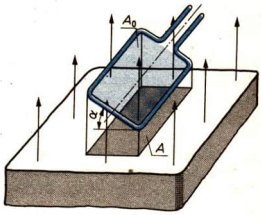
$$U_{ind} = B \cdot \frac{dA}{dt}. \tag{88}$$

Der Differentialquotient dA/dt ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich die wirksame Windungsfläche ändert. Bisher wurde angenommen (Bild 60/1), daß sich nur das Leiterstück der Länge l um die Strecke Δs nach rechts bewegt. Wie groß ist demgegenüber die Induktionsspannung, wenn sich die gesamte Leiterschleife um die gleiche Strecke bewegt? Auch in diesem Falle nimmt die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche um den gleichen Betrag $\Delta A = l \cdot \Delta s$ zu. Folglich führen die Bewegung der gesamten Leiterschleife und die alleinige Bewegung des Leiterstückes der Länge l zu der gleichen Induktionsspannung, da sich bei der Bewegung der gesamten Leiterschleife nur das hervorgehobene Leiterstück quer zu den magnetischen Feldlinien bewegt.
Findet anstelle der in Bild 60/1 gezeigten Leiterschleife eine Spule mit N Windungen Verwendung, so kann man diese als Reihenschaltung aus N Leiterschleifen auffassen. Die wirksame Fläche A wird auf das N-fache vergrößert. Ist A_0 die Fläche der einzelnen Windung, berechnet aus den geometrischen Abmessungen, so gilt

$$A = N \cdot A_0. \tag{89}$$

In der Skizze wurde angenommen, daß die Leiterschleife von den magnetischen Feldlinien senkrecht durchsetzt wird. Ein solcher Fall liegt jedoch nicht immer vor. So ändert sich z. B. bei der technisch bedeutungsvollen Drehbewegung die Lage der Leiterschleife zu den Feldlinien ständig. Gemäß Bild 61/1 wird dann nicht mehr die gesamte Windungsfläche A_0, sondern nur die Projektion dieser Fläche auf eine zu den Feldlinien senkrecht verlaufende Ebene wirksam. Deshalb gilt die Gleichung

$$A = N \cdot A_0 \cdot \cos \alpha. \tag{90}$$



61/1 Wirksame Fläche A, die bei beliebiger Lage der Windungsfläche A_0 den Betrag der Induktionsspannung beeinflußt. In der Zeichnung ist die Windungsanzahl $N = 1$.

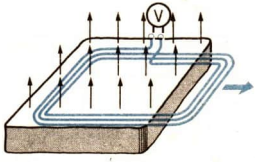
Das Ergebnis der mathematischen Herleitung läßt sich vereinfacht wie folgt formulieren:

► **Im zeitlich konstanten magnetischen Feld ist die induzierte Spannung der Änderungsgeschwindigkeit der wirksamen Windungsfläche proportional.**

$$U_{Ind} \sim \frac{dA}{dt} \qquad (91)$$

bei B = konstant $\neq 0$ und
$A = N \cdot A_0 \cdot \cos\alpha$

Die für die Induktionsspannung gewonnene Beziehung (91) stellt eine Präzisierung der in Klasse 9 gewonnenen und zu Beginn des Abschnittes formulierten Aussagen dar. Sie ermöglicht die einfache Erklärung der in den Experimenten 1 bis 8 beobachteten Effekte.
Das Experiment nach Bild 62/1 dient seiner Veranschaulichung. ① ② ③



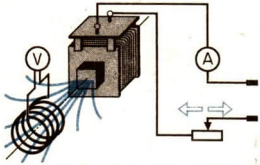
62/1 Untersuchung der Abhängigkeit der Induktionsspannung von der zeitlichen Änderung der Windungsfläche. Eine große Rahmenspule liegt auf den plattenförmigen keramischen Magneten, deren Nordpole sich auf der Oberseite befinden, so daß die magnetischen Feldlinien die Spule senkrecht durchsetzen. Das Feld ist weitgehend homogen.

▼ Eine Spule wird mit gleichbleibender geringer Geschwindigkeit aus dem Magnetfeld herausgezogen. Das Meßinstrument zeigt eine konstante Spannung an, solange sich noch ein Teil der Spule im Magnetfeld befindet. Erst wenn sich der hintere Teil der Rahmenspule von der Magnetfläche herunterbewegt, sinkt die Spannung auf Null ab. Zu diesem Zeitpunkt ist die wirksame Fläche, die sich vorher ständig verringert hat, auf Null abgesunken.
Das Experiment wird mit gleicher Geschwindigkeit, jedoch mit einer Spule doppelter Windungsanzahl wiederholt. Gegenüber dem ersten Teil des Experiments zeigt das Meßinstrument die zweifache Spannung an.
Nun wird das Experiment mit einer doppelt so großen Geschwindigkeit wiederholt. Wiederum tritt eine Verdoppelung der Spannung auf.

Durch den letzten Teilversuch wurde gezeigt, daß die Induktionsspannung unter bestimmten Bedingungen der Geschwindigkeit, mit der sich die Relativbewegung vollzieht, proportional ist.

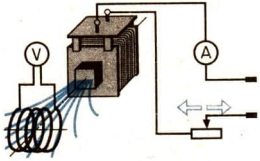
Die Induktionsspannung im zeitlich veränderlichen Magnetfeld 25

In den folgenden Experimenten wird versucht, eine Induktionsspannung ohne mechanische Bewegung zu erzeugen. Da sich in den Experimenten des voranstehenden Abschnittes Spule und Leiterschleife als prinzipiell gleichwertig erwiesen haben, werden die Experimente nur noch mit Spulen durchgeführt.



62/2 Induktionsspule im zeitlich veränderlichen magnetischen Feld eines Elektromagneten. Die Spulenachse verläuft in Richtung der magnetischen Feldlinien.

Bedingungen für die Erzeugung einer Induktionsspannung.
▼ Eine Induktionsspule befindet sich im Feld eines Elektromagneten (Bild 62/2). Die magnetische Flußdichte läßt sich durch Verändern der Stromstärke variieren.
Wird die Stromstärke vergrößert, dann schlägt der Zeiger des Meßinstrumentes nach der einen Seite aus. Wird die magnetische Flußdichte verringert, dann schlägt der Zeiger nach der anderen Seite aus. Solange sich die magnetische Flußdichte ändert, tritt eine Induktionsspannung auf.



62/3 Induktionsspule im zeitlich veränderlichen magnetischen Feld eines Elektromagneten. Die Spulenachse verläuft senkrecht zu den magnetischen Feldlinien.

▼ In der experimentellen Anordnung nach Bild 62/2 wird die Induktionsspule um 90° gedreht (Bild 62/3).
Die magnetische Flußdichte wird vergrößert und anschließend wieder verringert. Das Meßinstrument zeigt keine Induktionsspannung an. Das Ergebnis stimmt mit dem vom 6. Experiment auf S. 58 überein. In beiden Fällen ist die wirksame Fläche Null.

Die Experimente führen zu folgendem Ergebnis:
Bei nicht bewegter Leiterschleife kann nur dann eine Induktionsspannung auftreten, wenn sich die Stärke des Magnetfeldes zeitlich ändert und die wirksame Fläche von Null verschieden ist. An den Enden einer Leiterschleife tritt nur so lange eine Induktionsspannung auf, wie sich das Magnetfeld, das sie durchsetzt, ändert.

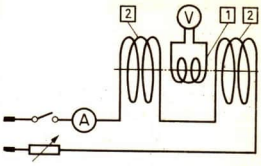
Mathematische Beschreibung des Induktionsvorganges.
Im Falle des zeitlich veränderlichen Magnetfeldes gilt analog zu Gleichung (88)

$$U_{\text{ind}} = A \cdot \frac{dB}{dt}, \qquad (92)$$

da die zeitliche Änderung der magnetischen Flußdichte die Ursache für das Auftreten der Induktionsspannung ist und die Fläche A konstant bleibt. Diese Beziehung läßt sich vereinfacht wie folgt formulieren:

► **Bei nicht bewegter Induktionsspule ist die induzierte Spannung der Änderungsgeschwindigkeit der magnetischen Flußdichte proportional.**

Die Veranschaulichung dieser Beziehung ist in Experimenten mit dem Induktionsgerät möglich (Bild 63/1). Die Versuchsanordnung entspricht dabei im Prinzip der im Bild 62/2. ④ ⑤



63/1 Nachweis der Abhängigkeit der Induktionsspannung von der zeitlichen Änderung der magnetischen Flußdichte und der wirksamen Windungsfläche. Die Induktionsspule (1) befindet sich im homogenen Magnetfeld der Feldspulen (2). Die magnetische Flußdichte wird durch Betätigen eines Schalters kurzzeitig um einen bestimmten Betrag geändert. Deshalb tritt nur ein Stoßausschlag des Spannungsmessers auf. Er ist aber unter diesen Bedingungen der mittleren Induktionsspannung proportional. Sowohl eine Vergrößerung der Magnetfeldänderung wie auch der wirksamen Windungsfläche bedingt jeweils eine proportionale Vergrößerung der Induktionsspannung.

$$U_{\text{ind}} \sim \frac{dB}{dt} \qquad (93)$$
bei A = konstant $\neq 0$

---

① Beschreiben Sie die nacheinander auftretenden Induktionsspannungen, wenn sich die Rahmenspule im Bild 62/1 zunächst der Magnetfläche nähert, dann sie mehr und mehr bedeckt und sich schließlich von ihr entfernt! Deuten Sie die Effekte auf der Grundlage der Beziehung (91)!

② Beschreiben Sie die aufeinanderfolgend auftretenden Induktionsspannungen bei einer Versuchsanordnung entsprechend Bild 62/1, bei der die Spule kürzer als die Magnetfläche ist! Nehmen Sie eine gleichförmige Bewegung der Spule an, und beginnen Sie Ihre Betrachtungen mit der Annäherung der Spule an die Magnetfläche!
Begründen Sie Ihre Aussagen unter Verwendung der Beziehung (91)!

③ Entwerfen Sie unter Verwendung von Spulen und Eisenkernen eine experimentelle Anordnung, die die Untersuchung des in Beziehung (91) dargestellten Zusammenhanges ermöglicht! Beschreiben Sie die Versuchsdurchführung und die erwarteten Versuchsergebnisse!

④ Beschreiben Sie die Demonstration der Abhängigkeit der Induktionsspannung von der zeitlichen Änderung der magnetischen Flußdichte und der wirksamen Windungsfläche mit dem Induktionsgerät!

⑤ Entwerfen Sie unter Verwendung von Spulen und Eisenkernen eine experimentelle Anordnung, die die Untersuchung des in Beziehung (93) dargestellten Zusammenhanges ermöglicht! Beschreiben Sie die Versuchsdurchführung und die erwarteten Versuchsergebnisse!

Das Induktionsgesetz

26

Die Ergebnisse der Untersuchungen in den letzten beiden Abschnitten werden durch folgende Gleichung vollständig beschrieben:

$$U_{ind} = \frac{d\,(A \cdot B)}{dt}. \qquad (94)$$

Sie beschreibt sowohl die Erzeugung einer Induktionsspannung im zeitlich konstanten (91) als auch im zeitlich veränderlichen Magnetfeld (93).

Zur Vereinfachung der Gleichung (94) wird eine physikalische Größe, der magnetische Fluß Φ, eingeführt. Er ist das Produkt aus der magnetischen Flußdichte B und der wirksamen Windungsfläche A.

$$\Phi = B \cdot A \qquad (95a)$$

Diese Gleichung läßt die enge Verknüpfung von magnetischem Fluß und magnetischer Flußdichte erkennen, die auch in der Wortbildung ihren Niederschlag gefunden hat. Die magnetische Flußdichte ist in sinnvoller Weise der Quotient aus magnetischem Fluß und senkrecht dazu liegender Fläche.

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad (95b)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (95a) ergibt sich aus Gleichung (94) das **Induktionsgesetz**.

► **Die Induktionsspannung U_{ind} ist gleich dem Differentialquotienten des magnetischen Flusses Φ, der die Leiterschleife bzw. Spule durchsetzt, nach der Zeit t.**

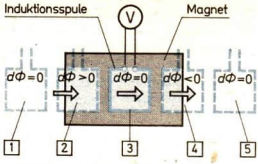
$$U_{ind} = \frac{d\Phi}{dt} \qquad (96)$$

Dieses Gesetz gilt sowohl für die mannigfaltigen experimentellen Anordnungen wie auch für die verschiedenartigen technischen Anwendungen. Das Induktionsgesetz beschreibt dabei auch alle die Fälle, bei denen sich sowohl eine Bewegung vollzieht als auch die magnetische Flußdichte ändert. ① ②

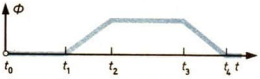
Stellt man den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses, der eine Induktionsspule durchsetzt (Bild 64/1), grafisch dar (Bild 64/2), so ermöglicht der Graph Aussagen bezüglich der auftretenden Induktionsspannung. Sie ist immer dann verschieden von 0, wenn eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses vorliegt.

Im Bild 64/2 ist der magnetische Fluß, der die Rahmenspule wie in der Versuchsanordnung im Bild 62/1 durchsetzt, in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Die Magnetfläche ist dabei länger als die Rahmenspule (siehe Bild 64/1). ③

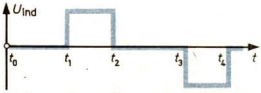
▼ Zunächst befindet sich die Spule noch vor der Magnetfläche (Lage 1). In diesem Zeitraum (t_0 bis t_1) ist der magnetische Fluß, der die Spule durchsetzt, 0 (vgl. Bild 64/2). Ab t_1 bewegt sich die Spule teilweise im Magnetfeld (Lage 2). Der magnetische Fluß nimmt linear zu. Zum Zeitpunkt t_2 ist die Spule vollständig vom magnetischen



64/1 Eine Rahmenspule wird mit konstanter Geschwindigkeit über eine magnetische Polfläche bewegt



64/2 Magnetischer Fluß Φ, der die Rahmenspule in Bild 64/1 durchsetzt, als Funktion der Zeit



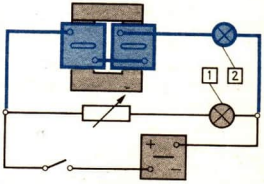
64/3 Induktionsspannung an der Rahmenspule von Bild 64/1 als Funktion der Zeit

Fluß durchsetzt (Lage 3). Im Zeitraum t_2 bis t_3 bleibt dieser Fluß konstant und nimmt erst nachfolgend wieder bis auf 0 ab (Lage 4). Im Zeitraum danach ist er 0.

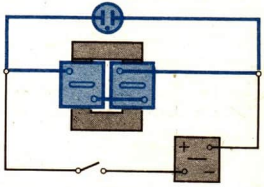
Die Induktionsspannung in der Rahmenspule ist in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dargestellt (Bild 64/3). In der Zeit von t_0 bis t_1 ist sie 0, da der magnetische Fluß und damit seine zeitliche Änderung 0 ist. Im Zeitraum t_1 bis t_2 tritt eine konstante Induktionsspannung auf, da der magnetische Fluß linear zunimmt. Von t_2 bis t_3 ist die Spannung 0, da sich der magnetische Fluß in der Spule nicht ändert, usw.

Die Induktivität einer Spule 27

Bei den Untersuchungen mit zeitlich veränderlichen magnetischen Feldern wurde bisher die Aufmerksamkeit nur auf die Induktionsspule gerichtet. Das sich ändernde magnetische Feld durchsetzt jedoch nicht nur die Induktionsspule, sondern auch die Spule, in der das Magnetfeld erzeugt wird. Es liegt deshalb die Frage nahe: Wenn sich das magnetische Feld in der Erregerspule ändert, wird dann nicht auch in der Erregerspule eine Induktionsspannung erzeugt?
Dieser Frage wurde bereits in Physik, Klasse 9, nachgegangen. Die Untersuchungen wurden anhand der in den Bildern 65/1 und 65/2 dargestellten Versuchsanordnungen durchgeführt und führten zu einer Erscheinung, die **Selbstinduktion** genannt wurde. Nach dem Schließen des Schalters in Bild 65/1 leuchtet die Glühlampe 1 sofort, die Glühlampe 2 jedoch später auf.
Nach dem Öffnen des Schalters in Bild 65/2 blitzt die Glimmlampe kurzzeitig auf. ④ ⑤



65/1 Versuchsanordnung zum Nachweis der Selbstinduktion beim Einschalten des Spulenstromes


65/2 Versuchsanordnung zum Nachweis der Selbstinduktion beim Ausschalten des Spulenstromes

Die Induktionsspannung ist so gerichtet, daß sie den Aufbau bzw. den Abbau des Magnetfeldes verzögert. Das wird verständlich, wenn man berücksichtigt, daß das Magnetfeld Träger von Energie ist. Beim Einschaltvorgang wird das Magnetfeld aufgebaut. Die dazu erforderliche Energie wird der Spannungsquelle entnommen. Beim Ausschaltvorgang steht dann die magnetische Feldenergie noch zur Verfügung, auch wenn die Kontakte des Schalters bereits geöffnet sind. Sie wird in elektrische Energie umgewandelt.

---

① Geben Sie den physikalischen Inhalt der Gleichung $U_{ind} = \frac{d\Phi}{dt}$ an!

② Geben Sie, ausgehend vom Induktionsgesetz, einige experimentelle Möglichkeiten zur Erzeugung einer Induktionsspannung an!

③ Erläutern Sie den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses und der Induktionsspannung in den Abbildungen 64/2 und 64/3 im Zeitraum t_3 bis t_4!

④ Geben Sie Geräte an, bei denen beim Ein- und Ausschalten Selbstinduktionsspannungen auftreten!

⑤ Geben Sie Beispiele der Verwendung bzw. Berücksichtigung von Selbstinduktionsspannungen an, und erklären Sie die dabei auftretenden Vorgänge!

Das Experiment zum Ausschaltvorgang (Bild 65/2) führt zu dem verblüffenden Ergebnis, daß bei einer angelegten Spannung von nur wenigen Volt eine Selbstinduktionsspannung von mehr als 100 Volt auftritt. Wie ist das möglich?
Ausgangspunkt für die Herleitung einer Gleichung zum Berechnen der Selbstinduktionsspannung ist das Induktionsgesetz in Form der Gleichung (94)

$$U_{ind} = \frac{d(B \cdot A)}{dt}.$$

Nach Gleichung (76) gilt

$$B = \mu_0 \cdot \mu_{rel} \cdot \frac{N}{l} \cdot I.$$

Hieraus folgt für die Selbstinduktionsspannung

$$U_{ind} = \frac{d\left(\mu_0 \cdot \mu_{rel} \cdot \frac{N}{l} \cdot I \cdot A\right)}{dt}. \qquad (97)$$

Da sich nur die Stromstärke in der Erregerspule ändert, können alle übrigen, unveränderlichen Größen vor den Differentialquotienten gesetzt werden.

$$U_{ind} = \mu_0 \cdot \mu_{rel} \cdot \frac{N}{l} \cdot A \cdot \frac{dI}{dt} \qquad (98)$$

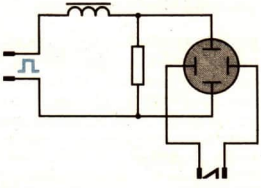
Die wirksame Fläche A ist nach Gleichung (89) das Produkt aus der Windungsanzahl N und der Fläche einer Windung A_0.

$$A = N \cdot A_0$$

Unter Berücksichtigung dieser Gleichung ergibt sich

$$U_{ind} = \mu_0 \cdot \mu_{rel} \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A_0 \cdot \frac{dI}{dt}. \qquad (99)$$

Die vor dem Differentialquotienten stehenden Größen charakterisieren die Spule. Deshalb ist es sinnvoll, sie zu einer Größe zusammenzufassen, die Induktivität L genannt wird.



66/1 Schaltplan zur oszillografischen Darstellung des I-t-Diagramms beim Ein- und Ausschalten einer Spule. Die Rechteckspannung bewirkt ein ständiges Ein- und Ausschalten des Stromes. Die an den Enden des ohmschen Widerstandes abgegriffene Spannung ist entsprechend dem Ohmschen Gesetz ein Maß für den Strom, der durch die Spule fließt. Sie wird dem Oszillografen zugeführt. Dadurch wird der zeitliche Verlauf der Stromstärke auf dem Oszillografenschirm sichtbar.

► **Induktivität**

$$L = \mu_0 \cdot \mu_{rel} \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A_0 \qquad (100)$$

Einheit der Induktivität ist $1\ V \cdot s \cdot A^{-1} = 1\ H$ (1 Henry).

Sie wird zu Ehren des Physikers J. Henry so genannt.
Die Induktivität charakterisiert das elektrische Verhalten einer Spule bei Stromstärkeänderung.
Mit (100) kann die Gleichung (99) wie folgt geschrieben werden:

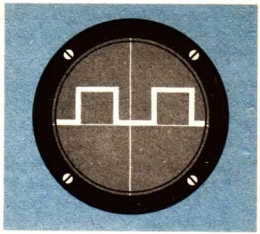
► **Die Selbstinduktionsspannung U_{ind} ist gleich dem Produkt aus der Induktivität L der Spule und der Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke I in der Spule.**

$$U_{ind} = L \cdot \frac{dI}{dt} \qquad (101)$$

Die Gleichung (101) läßt erkennen, daß der Wert der Selbstinduktionsspannung nur von den Spulenparametern und von der zeitlichen Änderung der Stromstärke abhängt.
Die angelegte Spannung geht in die Gleichung für die Selbstinduktionsspannung nicht ein, sondern nur die Stromstärke. Dieses Ergebnis ist für die Lösung des eingangs formulierten Problems wichtig. ①

Die Abhängigkeit der Induktivität von einigen Daten der Spule läßt sich mit der in Bild 66/1 angegebenen Versuchsanordnung demonstrieren.

▼ Die Spule wird kurzgeschlossen. Auf dem Bildschirm wird der zeitliche Verlauf der Rechteckspannung sichtbar (Bild 67/1). Danach wird der Kurzschluß beseitigt, so daß der Strom durch die Spule mit großer Windungsanzahl und geschlossenem Eisenkern fließt.
Es ergibt sich der in Bild 67/2 dargestellte Kurvenverlauf. Schließlich wird der I-Kern entfernt. Es tritt eine Kurve gemäß Bild 67/3 auf. Die Kurvenverläufe entsprechen den nach Gleichung (99) erwarteten Ergebnissen. ② ③



67/1 Zeitlicher Verlauf der Rechteckspannung, die gemäß Bild 66/1 an die Spule angelegt wird

67/2 *I-t*-Diagramm einer Spule großer Induktivität beim wiederholten Ein- und Ausschalten

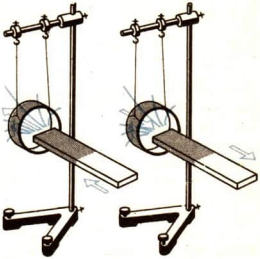
67/3 *I-t*-Diagramm einer Spule kleiner Induktivität beim wiederholten Ein- und Ausschalten

Das Lenzsche Gesetz

28

Bei den Experimenten zur elektromagnetischen Induktion fiel auf, daß je nach den Bedingungen Induktionsspannungen verschiedener Polarität auftreten. Dieser Tatsache wurde in den vorangegangenen Betrachtungen nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. So wurde z. B. bei der grafischen Darstellung der Induktionsspannung (Bild 64/3) berücksichtigt, daß je nach Zunahme oder Abnahme des magnetischen Flusses die Polarität der induzierten Spannung unterschiedlich ist. Es ist jedoch in jedem Falle möglich, die Polarität der erwarteten Induktionsspannung anzugeben. Diesbezügliche Experimente und Überlegungen wurden in Klasse 9 am Beispiel eines pendelartig aufgehängten Aluminiumringes, der mit einem bewegten Magneten in Wechselwirkung tritt (Bild 67/4), durchgeführt.

▼ Untersuchung der Bewegung eines hängenden Aluminiumringes infolge der induzierten Spannung beim Hineinstoßen und Herausziehen eines Magneten. Beim Hineinstoßen und Herausziehen des Magneten ändert sich der den Ring durchsetzende magnetische Fluß. Dadurch wird in dem Ring eine Spannung induziert, die infolge der guten Leitfähigkeit einen starken Strom verursacht.



67/4

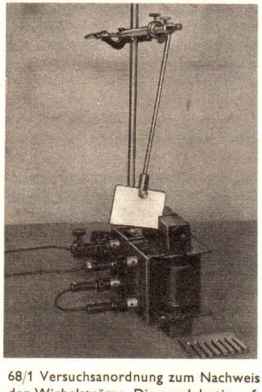
① Beantworten Sie die eingangs formulierte Fragestellung!
② Beschreiben und erklären Sie die Kurvenverläufe in den Bildern 67/1 bis 67/3!
③ Wie würde sich der Kurvenverlauf im Bild 67/2 ändern, wenn unter sonst unveränderten Bedingungen eine Spule geringerer Windungsanzahl Verwendung fände?

Bezüglich der Polarität der Induktionsspannung und damit der Richtung des Stromes im Ring bestehen prinzipiell zwei Denkmöglichkeiten:

1. Beim Hineinstoßen des Magneten in den Ring ist der Strom so gerichtet, daß das Magnetfeld eine Abstoßung des Ringes bewirkt und damit den Prozeß des Eindringens behindert.
2. Beim Hineinstoßen des Magneten in den Ring ist der Strom so gerichtet, daß das Magnetfeld eine Anziehung des Ringes bewirkt und damit den Prozeß des Eindringens fördert.

Im ersten Falle muß Arbeit verrichtet werden, um den Magneten in den Ring zu bringen. Die aufgewandte Energie wird in elektrische Energie (Strom im Ring) und schließlich Wärme (infolge des ohmschen Widerstandes) umgewandelt. Im zweiten Falle würde der Magnet in den Ring hineingezogen. Die dadurch bedingte größere Eindringgeschwindigkeit hätte eine Vergrößerung der Induktionsspannung und damit des Stromes zur Folge, der sich wiederum förderlich auf die Bewegung auswirken würde usw. Es würde also sowohl mechanische als auch elektrische Energie (und damit Wärme) frei. Das Durchdenken der beiden Möglichkeiten führt zu dem Ergebnis, daß die zweite Möglichkeit den mannigfaltigen Erfahrungen widerspricht, die im Energieerhaltungssatz ihren Niederschlag gefunden haben.
Es bestätigt das **Lenzsche Gesetz**, das bereits in Klasse 9 formuliert wurde: **Die Induktionsspannung besitzt eine solche Polarität, daß der durch sie hervorgerufene Strom der Ursache des Induktionsvorganges entgegenwirkt.** ①

Die Betrachtung zeigte weiterhin, daß das Lenzsche Gesetz unmittelbar aus dem Energieerhaltungssatz folgt.
Das Experiment (Bild 68/1) dient zur Veranschaulichung des Lenzschen Gesetzes. ②

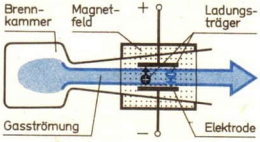


68/1 Versuchsanordnung zum Nachweis der Wirbelströme. Die pendelartig aufgehängte Aluminiumscheibe kann sich im Feld des Elektromagneten quer zu den magnetischen Feldlinien bewegen. Die dabei induzierte Spannung bedingt infolge des geringen ohmschen Widerstandes in der Scheibe starke Ströme.

▼ Bei eingeschaltetem Spulenstrom wird die Aluminiumscheibe angestoßen. Dabei tritt ein spürbarer Widerstand auf. Die Aluminiumscheibe kehrt, ohne hin- und herzupendeln, so in die Ruhelage zurück, als würde sie sich in einer zähen Flüssigkeit bewegen.
Dieses Verhalten wird durch die Wirbelströme bedingt, die der Ursache des Induktionsvorganges entgegenwirken.

Physikalisches Wirkungsprinzip von Generator, Motor und Transformator 29

Die elektromagnetische Induktion findet in zahlreichen Geräten praktische Anwendung. Fast die gesamte Elektroenergie wird auf der Grundlage der elektromagnetischen Induktion erzeugt. Das erfolgt in den Generatoren der Wasser-, Wärme- und Kernkraftwerke. Dabei finden neben den her-



68/2 MHD-Generator

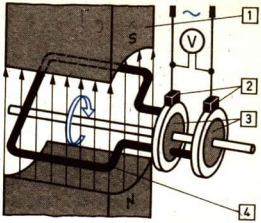
kömmlichen Generatoren auch bereits magnetohydrodynamische Generatoren (MHD-Generatoren) Verwendung (Bild 68/2), deren Wirkungsweise ebenfalls auf der elektromagnetischen Induktion beruht. Weiterhin ist die Übertragung und Anpassung der elektrischen Energie ebenfalls an die elektromagnetische Induktion gebunden (Transformatoren). Mittels der elektromagnetischen Induktion ist die bequeme Erzeugung von sinusförmiger Wechselspannung möglich. Ihre Vorzüge bestehen u. a. in der leichten Umformbarkeit, in der Möglichkeit der Strombegrenzung durch induktive Widerstände, die eine vernachlässigbar kleine Wirkleistung besitzen, und in der Möglichkeit, kollektorlose Motoren zu bauen, die wartungsfrei sind.
Schließlich sind die Spulen aufgrund ihrer Induktivität wichtiger Bestandteil des elektrischen Schwingkreises, der für die Erzeugung elektromagnetischer Schwingungen bzw. Wellen und die drahtlose Nachrichtenübermittlung (Erzeugen, Senden, Empfangen und Aussondern bestimmter Frequenzen) unentbehrlich ist.

Im **Motor** wird die Kraft, der ein stromdurchflossener Leiter im magnetischen Feld unterliegt, zur Erzeugung eines Drehmoments genutzt.

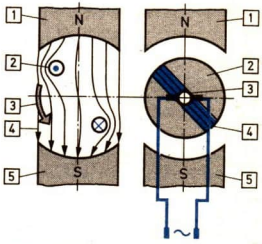
Im **Generator** wird die Relativbewegung eines Leiters im zeitlich konstanten magnetischen Feld zur Erzeugung einer Induktionsspannung genutzt.

Im **Transformator** wird mit Hilfe eines zeitlich veränderlichen Magnetfeldes eine Induktionsspannung erzeugt.
Im einzelnen spielen sich komplizierte Vorgänge ab.

Der Generator. Der Generator besteht im Prinzip aus einer Spule, die zwischen den Polen eines Magneten gedreht wird (Bild 69/1). Die Enden der Spule sind mit je einem Schleifring verbunden. Von diesen wird die Spannung mittels Schleifkontakten abgegriffen. In dieser einfachen Anordnung erzeugt der Generator infolge der ständigen Änderung des magnetischen Flusses (Bild 70/1) in der Spule eine Wechselspannung (Bild 70/2). Wird anstelle der induzierten Wechselspannung Gleichspannung benötigt, dann ist üblich, unmittelbar auf der Welle des Generators einen mechanischen Gleichrichter anzubringen. Anstelle der beiden Vollringe finden dann zwei gegeneinander isolierte Halbringe Verwendung, die mit den Enden der Ankerwicklung verbunden sind (Bild 70/3). Die beiden einander gegenüberliegenden Schleifkontakte gleiten nach jeder halben Drehung von dem einen auf den anderen Halbring über.
Das geschieht gerade immer zu dem Zeitpunkt, zu dem die induzierte Spannung gleich 0 ist. Dieses Umpolen führt in den



69/1 Prinzipieller Aufbau eines Wechselstromgenerators. Zum besseren Verständnis der Vorgänge besteht der Anker aus einer einfachen Leiterschleife. Bei der Rotation dieser Leiterschleife verändert sich ständig der magnetische Fluß, der sie durchsetzt (vgl. Bild 70/1).
1 Feldmagnete
2 Bürsten
3 Schleifringe
4 Leiterschleife



69/2 Wechselstromgenerator

Physikalisches Prinzip	*Technischer Aufbau*
1, 5 Polschuhe	1, 5 Polschuhe
2 Rotorspule	2 Rotor
3 Drehbewegung	3 Schleifkontakt
4 Feldlinien	4 Rotorspule

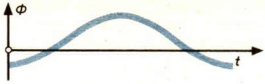
Beim belasteten Generator (siehe auch Bild 70/4) verlaufen die magnetischen Feldlinien nicht mehr parallel.

---

① Stellen Sie in analoger Weise Betrachtungen zu den Vorgängen beim Herausziehen des Magneten aus dem Ring an!

② Erläutern Sie, inwiefern das experimentelle Ergebnis das Lenzsche Gesetz bestätigt!

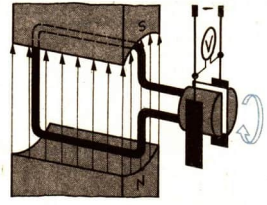
wegführenden Leitungen zu einer Gleichspannung, auch wenn in der Spule eine Wechselspannung induziert wird. Bild 71/1 gibt den zeitlichen Verlauf der Spannung des Gleichstromgenerators nach Bild 70/3 wieder. ①



70/1 Zeitlicher Verlauf des magnetischen Flusses im Anker eines Wechselstromgenerators

Der Gleichstrommotor. Der Gleichstrommotor besitzt den gleichen prinzipiellen Aufbau wie der Gleichstromgenerator (Bild 70/3). Vereinfacht läßt sich die Wirkungsweise des Motors wie folgt beschreiben: Legt man an die beiden Schleifkontakte Spannung an, so fließt durch die Leiterschleife ein Strom. Die einzelnen Teile der stromdurchflossenen Leiterschleife unterliegen im magnetischen Feld Kräften. Die resultierende Kraft bewirkt die Drehung des Ankers.
Da diese Kraft senkrecht zum Verlauf der magnetischen Feldlinien gerichtet ist, dreht sich die Leiterschleife in Bild 70/3 zunächst nur um 90°. Sie befindet sich dann in einer Stellung, in der sie infolge ihrer Befestigung an der Welle des Motors dem Einfluß der Kraft nicht weiter folgen kann. In dieser Lage gleiten jedoch die Schleifkontakte auf den jeweils gegenüberliegenden Halbring über, wodurch die Veränderung der Stromrichtung in der Leiterschleife bedingt wird. Die Kraft ist danach so gerichtet, daß sie ein Weiterdrehen des Ankers bewirkt usw. ②

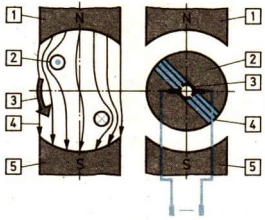
70/2 Zeitlicher Verlauf der induzierten Spannung beim Wechselstromgenerator



70/3 Prinzipieller Aufbau eines Gleichstromgenerators. Zum besseren Verständnis der Vorgänge besteht der Anker aus einer einfachen Leiterschleife.

Zusammenhang zwischen elektromotorischem Prinzip und Generatorprinzip 30

Aufgrund des gleichen prinzipiellen Aufbaus kann jeder Gleichstrommotor auch als Generator betrieben werden und jeder Gleichstromgenerator als Motor. Im Prinzip unterscheidet beide Geräte nur, daß dem Motor elektrische Energie zugeführt und mechanische entnommen wird, während beim Generator mechanische Energie zugeführt und elektrische entnommen wird (Bilder 69/2, 70/4 und 71/2).
Aus der Sicht der sich vollziehenden Energieumwandlung ist folglich das dem Generator zugrunde liegende **Generatorprinzip** die **Umkehrung des** dem Motor zugrunde liegenden **elektromotorischen Prinzips**. Dabei vollziehen sich in beiden Geräten gleichartige Vorgänge. Einerseits werden in jedem laufenden Motor wie in einem Generator Induktionsspannungen erzeugt. Sie sind nach dem Lenzschen Gesetz der angelegten Spannung entgegengerichtet. Andererseits werden in jedem unter Last betriebenen Generator durch den elektrischen Strom (wie in einem Motor) Drehmomente hervorgerufen. Entsprechend dem Lenzschen Gesetz wirken sie der Drehbewegung entgegen.
Das soll durch die folgenden beiden Experimente verdeutlicht werden.



70/4 Gleichstromgenerator

Physikalisches Prinzip		*Technischer Aufbau*	
1, 5	Polschuhe	1, 5	Polschuhe
2	Rotorspule	2	Rotor
3	Drehbewegung	3	Schleifkontakt
4	Feldlinien	4	Rotorspule

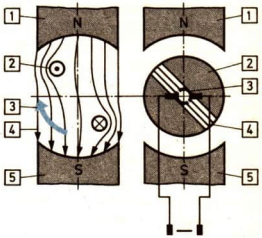
▼ Der Anker des gemäß Bild 71/3 geschalteten Gleichstromgenerators wird über einen Riementrieb in schnelle Drehbewegung versetzt. Hierfür ist ein leicht aufzubringendes Drehmoment erforder-

lich. Der Schalter im Ankerstromkreis wird geschlossen und der Widerstand bis auf 0 verringert. Je geringer der Widerstand ist, um so mehr Energie muß aufgewandt werden, um die Bewegung aufrechtzuerhalten.
Dem belasteten Generator muß mehr mechanische Energie zugeführt werden, damit er mehr elektrische Energie abgeben kann. Mit wachsender elektrischer Belastung, d. h. wachsender Energieabgabe, nimmt deshalb das erforderliche Drehmoment zu.

71/1 Zeitlicher Verlauf der Spannung beim Gleichstromgenerator

Im zweiten Experiment soll der Einfluß der mechanischen Belastung eines Motors auf den Ankerstrom untersucht werden.

▼ Der Motor wird mit der Spannungsquelle verbunden. Der Strommesser im Ankerstromkreis zeigt eine große Stromstärke an. Die Drehzahl des Motors erhöht sich allmählich. Die Stromstärke nimmt dabei ab. Jetzt wird der Motor mechanisch zunehmend abgebremst. Je größer die Belastung ist, um so größer ist auch der Ankerstrom.
Die beim Motor infolge der Drehung des Ankers induzierte Spannung ist der angelegten Spannung entgegengerichtet. Dadurch wird die Ankerstromstärke und damit die aufgenommene elektrische Leistung verringert. Wird die entnommene mechanische Leistung vergrößert, so sinkt die Drehzahl und damit die induzierte Gegenspannung. Dadurch erhöht sich die aufgenommene elektrische Leistung.



71/2 Gleichstrommotor

Physikalisches Prinzip	*Technischer Aufbau*
1, 5 Polschuhe	1, 5 Polschuhe
2 Rotorspule	2 Rotor
3 Drehbewegung	3 Schleifkontakt (geteilt als Stromwender)
4 Feldlinien	4 Rotorspule

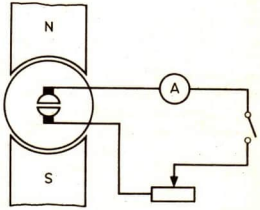
Die Experimente mit Generator und Motor machen die **Gegensätzlichkeit** beider Vorgänge deutlich:

- Der Motor nimmt elektrische Energie auf und gibt mechanische Energie ab.
- Der Generator nimmt mechanische Energie auf und gibt elektrische Energie ab.

Die Experimente haben aber gleichzeitig belegt, daß neben diesen gegensätzlichen Vorgängen auch ausgeprägte Übereinstimmungen auftreten.

Im **Motor und Generator** treten mechanische Kräfte auf, da sich stromdurchflossene Leiterschleifen im Magnetfeld befinden. Beim Motor bedingen die Kräfte die Drehbewegung, beim Generator wirken sie hemmend.

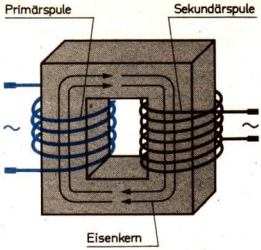
Im **Motor und Generator** treten Induktionsspannungen auf, da sich Leiterschleifen im Magnetfeld drehen. Beim Generator werden diese Spannungen mit dem Ziel der praktischen Nutzung erzeugt, beim Motor bewirken sie, daß sich die Ankerstromstärke und damit die aufgenommene Leistung verringert. ③ ④ ⑤



71/3

① Erklären Sie das Zustandekommen des in Bild 71/1 dargestellten Spannungsverlaufs beim Gleichstromgenerator!
② Erklären Sie die Wirkungsweise eines Gleichstrommotors in einzelnen Schritten!
③ Beim Motor und Generator treten mechanische Kräfte (Drehmomente) auf. Wodurch werden sie bedingt, und wie wirken sie?
④ Im Motor und Generator treten Induktionsspannungen auf. Wodurch werden sie bedingt, und wie wirken sie, bzw. wie wirkt der durch sie bedingte Strom?
⑤ Planen Sie eine Versuchsanordnung, mit der im Experiment die Wirkungsweise einer Kurzschlußbremse demonstriert werden soll!

Der Transformator. Der Transformator besteht aus einer Primärspule und einer Sekundärspule, die sich auf einem gemeinsamen, geschlossenen Eisenkern befinden (Bild 72/1). Wird die Primärspule mit einer Wechselspannungsquelle verbunden, so tritt ein zeitlich sich änderndes Magnetfeld auf. Bedingt durch den Eisenkern, wird auch die Sekundärspule vom gleichen magnetischen Fluß durchsetzt, der sich in Betrag und Richtung zeitlich ständig ändert. Dadurch tritt auch in der Sekundärspule eine Wechselspannung auf. Liegt an der Primärspule des Transformators eine sinusförmige Wechselspannung an, so ist auch die Sekundärspannung sinusförmig. Dadurch kann sinusförmige Wechselspannung beliebig oft transformiert werden, ohne daß sich ihr zeitlicher Verlauf ändert. Das Induktionsgesetz läßt sich für diesen Fall in der vereinfachten Form (93) schreiben



72/1 Aufbau eines Transformators

$$U_{\text{ind}} \sim \frac{dB}{dt} \quad \text{bei} \quad A = \text{konstant} \neq 0.$$

In Klasse 10 wurde auf experimentellem Wege festgestellt, daß bei Verwendung sinusförmiger Wechselspannung für den unbelasteten Transformator gilt:

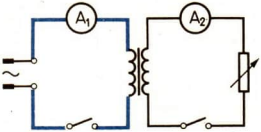
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \qquad (102)$$

Dabei sind U_1 die Primärspannung, U_2 die Sekundärspannung, N_1 die Primärwindungsanzahl und N_2 die Sekundärwindungsanzahl. ①

In Klasse 10 wurde weiterhin ermittelt, daß beim belasteten Transformator zwischen der Primärstromstärke I_1, der Sekundärstromstärke I_2 und der Anzahl der Windungen die folgende Beziehung besteht: ② ③

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}. \qquad (103)$$

Wie beim Generator und Motor Rückwirkungen der elektrischen bzw. mechanischen Belastung auf die mechanische bzw. elektrische Energieaufnahme auftreten, so treten beim Transformator induktive Rückwirkungen des Sekundärstromes auf den Primärstrom auf. Zu ihrer Untersuchung dient das folgende Experiment (Bild 72/2).



72/2 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Rückwirkung des Sekundärstromes beim Transformator auf den Primärstrom
Ein Transformator wird über einen Schalter mit einer Wechselspannungsquelle verbunden. Im Sekundärkreis ist über einen Schalter ein veränderlicher Widerstand eingeschaltet. Strommesser 1 zeigt die Primärstromstärke, Strommesser 2 die Sekundärstromstärke an.

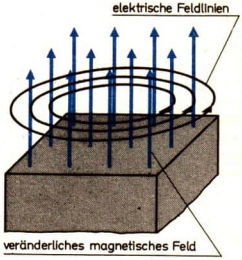
▼ Der Primärstromkreis wird geschlossen. Bei geöffnetem Schalter im Sekundärstromkreis fließt ein kleiner Primärstrom. Beim Schließen des Sekundärkreises tritt ein Sekundärstrom auf. Beim Verringern des Widerstandes vergrößert sich die Sekundärstromstärke. In etwa gleichem Maße wächst auch der Primärstrom an und mit ihm die aufgenommene Leistung des Transformators.

Nach dem Einschalten bedingt die Induktivität der Primärspule zu jedem Zeitpunkt eine Selbstinduktionsspannung, die der anliegenden Wechselspannung entgegengerichtet ist. Die Selbstinduktionsspannung bewirkt, daß beim unbelasteten Transformator nur ein kleiner Primärstrom fließt. Wird der

Sekundärspule Strom entnommen, so ist dieser mit einem Magnetfeld verknüpft, das sich dem Magnetfeld des Primärstromes überlagert.
Der den Sekundärstrom begleitende magnetische Fluß ist nach dem Lenzschen Gesetz dem primären magnetischen Fluß entgegengerichtet. Dadurch wird der Gesamtfluß im Eisenkern verringert und damit auch die in der Primärspule induzierte Induktionsspannung. Je kleiner aber diese der angelegten Spannung entgegenwirkende Selbstinduktionsspannung ist, um so größer ist der Primärstrom. Das Magnetfeld des Sekundärstromes bewirkt damit, daß sich die Energieaufnahme des Transformators der sekundärseitigen Belastung anpaßt. ④

Die Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder 31

Die vorangegangenen Betrachtungen haben zu neuen Erkenntnissen über die elektromagnetische Induktion geführt und die Einsicht vertieft, daß diese eine vielfältige praktische Anwendung erfährt. Die Bedeutung der elektromagnetischen Induktion liegt jedoch nicht nur im Bereich der Praxis. Die elektromagnetische Induktion hat zu neuen Vorstellungen über das Wesen des elektrischen und magnetischen Feldes und über ihre gegenseitige Verknüpfung geführt.
Bei den Experimenten zur elektromagnetischen Induktion fanden stets Leiterstücke, Leiterschleifen oder Spulen Verwendung. An ihren Enden wurde die Induktionsspannung nachgewiesen. Bei den Experimenten mit ruhendem Leiter ist dieser jedoch nicht Voraussetzung, sondern nur ein bequemes Hilfsmittel zum Nachweis. Verändert sich der magnetische Fluß in einem bestimmten Bereich (Bild 73/1), so tritt in diesem Bereich ein elektrisches Feld auf. Es ist durch den ringförmigen Verlauf der elektrischen Feldlinien gekennzeichnet. Dieses Feld ist das Primäre. Befindet sich in ihm eine Leiterschleife, so tritt an ihren Enden eine Spannung auf.
Die Experimente zur Induktion mit einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld können damit auch als Nachweis des elektrischen Feldes gedeutet werden, das mit ihm verknüpft ist. Das elektrische Feld läßt sich jedoch auch unmittelbar nachweisen. Dazu dient das Experiment nach Bild 75/1.



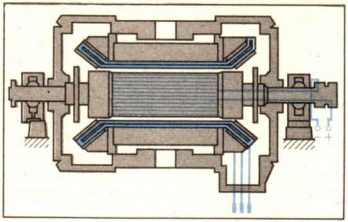
73/1 Untrennbare Verknüpfung eines sich verändernden magnetischen Feldes mit einem elektrischen Feld

---

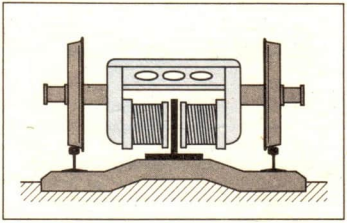
① Nennen Sie praktische Beispiele für die Anwendung von Transformatoren! Versuchen Sie, diese nach einem wichtigen Gesichtspunkt zu klassifizieren!
② Welche Energieumwandlungen vollziehen sich im Transformator? Wodurch werden die Verluste an elektrischer Energie bedingt?
③ Begründen Sie, warum in der Sekundärspule eines Transformators eine sinusförmige Wechselspannung induziert wird, wenn an der Primärspule eine sinusförmige Wechselspannung anliegt!
④ Welche Bedeutung hat die Erscheinung der Selbstinduktion für den Transformator?

Anwendungsbeispiele zu den Feldern

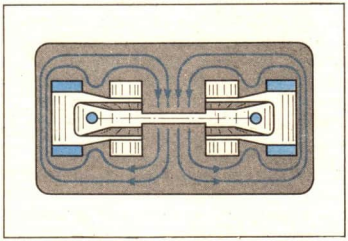
Generator. In den Wärmekraftwerken unserer Republik (z. B. Boxberg III) sind 500-MW-Turbinen-Generatoren-Blöcke installiert. Während Generatoren früher von langsam laufenden Dampfmaschinen angetrieben wurden, ist bei modernen Anlagen der Anker eines Turbogenerators mit einer Dampfturbine hoher Drehzahl gekuppelt. Damit der Anker durch die auftretenden Kräfte nicht zerrissen wird, darf die Umfangsgeschwindigkeit einen bestimmten Betrag nicht überschreiten. Der Durchmesser muß klein gehalten werden. Um eine hohe Leistung zu erreichen, muß der Generator sehr lang gebaut werden.



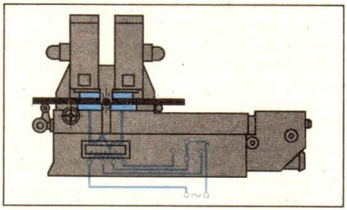
Linearmotor. Soll eine geradlinige Bewegung durch eine elektrische Maschine erzielt werden, dann ist es unzweckmäßig, zunächst elektrisch eine Drehbewegung zu erzeugen und dann diese in eine Linearbewegung umzuwandeln.
Der Linearmotor erzeugt diese Bewegung direkt. Er arbeitet wie ein Dreiphasenwechselstrommotor. Feldspulen und Anker sind jedoch nicht ringförmig, sondern geradlinig angeordnet. Magnetkissen-Schwebebahnen mit Linearmotorantrieb ermöglichen Geschwindigkeiten bis zu 500 km · h^{-1}.



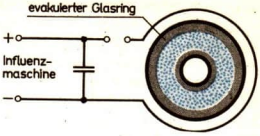
Betatron. Es ist ein Teilchenbeschleuniger, in dem Elektronen großer kinetischer Energie erzeugt werden. Das Prinzip des Betatrons gleicht dem eines Transformators. Anstelle der Sekundärspule findet eine Hochvakuum-Ringröhre Verwendung, in die Elektronen eingeschossen werden. Die beim Betrieb mit Wechselspannung zeitweilig anwachsende magnetische Flußdichte dient einerseits der Beschleunigung der Elektronen infolge des Transformatoreffektes, andererseits ihrer Führung auf einer Kreisbahn, bedingt durch die Lorentzkraft.



Schweißmaschine. Zum Stumpfschweißen von Werkstücken mit großer Querschnittsfläche werden Maschinen verwendet, bei denen eine Primärspule aus dem Netz je Quadratmillimeter Schweißfläche eine elektrische Leistung von 25 W aufnimmt. Die Sekundärspule aus wenigen Windungen liefert bei sehr geringer Spannung ($U < 10$ V) einen Schweißstrom von einigen tausend Ampere.
An der Berührungsstelle der unter hohem Druck ($p \approx 50$ MPa) zusammengedrückten Werkstückteile entsteht infolge des hohen Übergangswiderstandes die zum Schmelzen und Verschweißen erforderliche Temperatur.



▼ Der Kondensator wird laufend mit der Influenzmaschine aufgeladen. Immer dann, wenn er sich über die Spule entlädt, leuchtet das Gas im ringförmigen Entladungsgefäß auf. Das sich stark verändernde magnetische Feld ist mit einem ringförmigen elektrischen Feld so großer elektrischer Feldstärke verknüpft, daß das Gas teilweise ionisiert und zum Leuchten angeregt wird. Damit ist der Nachweis erbracht, daß das elektrische Feld auch ohne Anwesenheit eines Leiters auftritt. Außerdem wird hierbei noch ein wesentlicher Unterschied zwischen dem elektrischen Feld, das mit einem sich verändernden magnetischen Feld verknüpft ist, und dem elektrostatischen Feld deutlich: Beim elektrostatischen Feld **enden** die elektrischen Feldlinien an den Ladungen. Im Falle des sich verändernden magnetischen Feldes kann ein elektrisches Feld mit ringförmig **geschlossenen** elektrischen Feldlinien auftreten.



75/1 Nachweis des elektrischen Feldes, das untrennbar mit einem sich verändernden magnetischen Feld verbunden ist. Der mit der Influenzmaschine aufgeladene Kondensator entlädt sich bei einer Spannung von einigen 10 000 V über die Funkenstrecke und eine Spule von wenigen Windungen. Dabei ändert sich das magnetische Feld der Spule kurzzeitig sehr stark. Zum Nachweis des damit verknüpften elektrischen Feldes dient das ringförmige Glasrohr, das teilweise evakuiert ist.

► **Jedes sich verändernde magnetische Feld ist untrennbar mit einem elektrischen Feld verknüpft.**

Diese Erkenntnis wurde, ausgehend von den experimentellen Untersuchungen M. Faradays, durch J. C. Maxwell gewonnen und mathematisch dargestellt.
Analog dazu wird in der **Maxwellschen Theorie** die Bedeutung zeitlich veränderlicher elektrischer Felder erfaßt. Danach gilt folgende physikalische Aussage:

► **Elektrische Ströme und sich verändernde elektrische Felder sind untrennbar mit einem magnetischen Feld verknüpft.**

Es ist bekannt, daß gestreckte stromdurchflossene Leiter von einem magnetischen Feld umgeben sind, dessen Feldlinien konzentrische Kreise bilden. Im Bild 75/2 bewirkt der Strom das Aufladen eines Plattenkondensators. Die Zuleitungen sind von einem magnetischen Feld umgeben. Tritt dieses magnetische Feld nun nur in der Umgebung der Leitungen auf, in denen der Ladestrom fließt, oder auch in dem Bereich, der von den Kondensatorplatten abgegrenzt ist?

75/2 Zur Verknüpfung veränderlicher elektrischer Felder mit magnetischen Feldern: Das magnetische Feld umgibt alle Teile eines Stromkreises, auch den Innenraum eines Plattenkondensators.

Problemfragen

- Noch 150 Jahre nach der Entdeckung der elektromagnetischen Induktion werden neue Anwendungsmöglichkeiten gefunden. Nennen Sie Beispiele!
- Magnetostatisches und elektromagnetisches Feld bieten Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung vieler Bereiche des Transportwesens.
  Welche Entwicklungstendenzen deuten sich an?
- Welche Möglichkeiten sehen Sie, die Wärmeenergie bzw. mechanische Energie mit noch größerem Wirkungsgrad in elektrische Energie umzuwandeln?

Der Leitungsstrom endet an den Kondensatorplatten, indem er ihre Ladung erhöht. Dadurch ändert sich jedoch das elektrische Feld zwischen den Platten, und auch dieses sich verändernde elektrische Feld ist von ringförmig geschlossenen magnetischen Feldlinien umgeben. In einer hinreichenden Entfernung vom Leiter tritt damit längs der gesamten Versuchsanordnung ein magnetisches Feld konstanter Stärke auf.

Die von J. C. Maxwell gefundenen und mathematisch formulierten Grundgesetze beinhalten ähnlich wie die Newtonschen Gesetze Erfahrungen, die nicht theoretisch ableitbar sind. Die Gesetze sind von so umfassender Gültigkeit, daß sie die Grundlage der Theorie aller elektromagnetischen Erscheinungen bilden. So gelangte J. C. Maxwell, ausgehend von seinen Gleichungen, u. a. zur Vorhersage der Existenz elektromagnetischer Wellen. Davon angeregt, wies H. Hertz diese Wellen experimentell nach und bestätigte damit die Maxwellsche Theorie.

Zusammenfassung

32

1. Experimentelle Untersuchung

Aus der großen Bedeutung der elektromagnetischen Induktion ergab sich die Notwendigkeit, sie tiefgründiger zu untersuchen. Im Falle eines konstanten magnetischen Feldes erwies sich eine Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter als unabdingbare Voraussetzung für das Auftreten einer Induktionsspannung. Liegt keine Relativbewegung zwischen Magnet und Leiter vor, so kann nur dann eine Induktionsspannung auftreten, wenn sich das Magnetfeld zeitlich ändert.

2. Mathematische Beschreibung des Induktionsvorganges

Die Einführung des magnetischen Flusses ermöglichte es, das Induktionsgesetz einfach und allgemeingültig zu formulieren:

$$U_{\text{ind}} = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}.$$

3. Deduktive Herleitung der Gleichung für die Selbstinduktionsspannung

Ausgehend vom Induktionsgesetz wurde das Auftreten der Selbstinduktionsspannung begründet und ihre Größe berechnet.

$$U_{\text{ind}} = L \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}.$$

4. Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse

Die praktische Bedeutung der gewonnenen Erkenntnisse wurde am Beispiel von Generator, Motor und Transformator belegt.

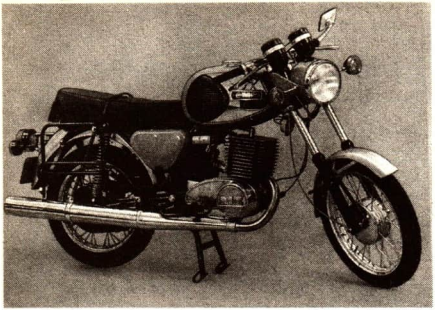
5. Verallgemeinerung der Ergebnisse

Neben der großen praktischen Bedeutung der elektromagnetischen Induktion wurde ihre Bedeutung bez. der Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder herausgearbeitet (Maxwellsche Theorie). So sind elektrische Ströme und sich verändernde elektrische Felder untrennbar mit einem magnetischen Feld verknüpft, und jedes sich verändernde magnetische Feld ist untrennbar mit einem elektrischen Feld verbunden.

ELEKTRISCHE LEITUNGSVORGÄNGE

Wenn in einem leitenden Stoff ein elektrisches Feld erzeugt wird, dann fließt ein elektrischer Strom. Im Raum um den stromdurchflossenen Leiter besteht ein magnetisches Feld. Die Temperatur des Leiters steigt infolge des fließenden Stromes, außerdem können Leuchterscheinungen oder chemische Reaktionen auftreten.

Elektrische Leitungsvorgänge ermöglichen die Übertragung und Umwandlung von Energie. Sie kommen in außerordentlich großer Vielfalt vor und finden breiteste Anwendung in allen Bereichen der Wissenschaft und Technik sowie des täglichen Lebens. Dabei kann die Befriedigung des großen Bedarfs an Energie in der Produktion im Vordergrund stehen, wie bei der Versorgung eines Industriebetriebes mit Elektroenergie. Elektrische Leitungsvorgänge helfen aber auch, Informationen zu verarbeiten, zu übertragen und zu speichern. Diese Vorgänge besitzen vorzugsweise in der Nachrichtentechnik, der BMSR-Technik und in der Datenverarbeitung Bedeutung.



Leitungsvorgänge im zeitlich konstanten elektrischen Feld

Jedes Fahrzeug besitzt eine elektrische Anlage, das Bordnetz. Für den Betrieb der zahlreichen elektrischen Geräte in den Kraftfahrzeugen wird stets Gleichstrom verwendet, der von der Batterie, unabhängig vom Betrieb des Motors, bereitgestellt wird. Die Spannung des Bordnetzes beträgt meist 12 V, bei Kleinwagen und Motorrädern 6 V. Für die während der Fahrt notwendige Aufladung der Batterie müssen elektrische Wechselvorgänge genutzt werden.

Elektrische Leitungsvorgänge können in sehr unterschiedlicher Weise systematisiert werden. Es kommt eine Einteilung in Hoch-, Mittel- und Kleinspannung in Betracht, aber auch in Gleich- und Wechselstrom. Auch die Art der Energiequellen ist von Interesse; so können Kraftwerksgeneratoren, Fahrraddynamos, elektrochemische Elemente oder Akkumulatoren als Ausgangspunkte genommen werden. Schließlich spielt auch die Beschaffenheit der elektrischen Leiter eine wesentliche Rolle. Aus physikalischer Sicht stehen die allen Leitungsvorgängen gemeinsamen Merkmale im Vordergrund, die einerseits durch unterschiedliche elektrische Felder, andererseits durch unterschiedliche elektrische Leiter in Erscheinung treten.

Allgemeines Modell elektrischer Leitungsvorgänge 33

Die zahlreichen Einzelerfahrungen, die sich aus der Untersuchung elektrischer Leitungsvorgänge ergeben, lassen sich zu einem allgemeinen Modell zusammenfassen, das durch folgende wesentliche Merkmale gekennzeichnet ist:

Voraussetzungen für elektrische Leitungsvorgänge sind:

1. Ein elektrisches Feld,
2. wanderungsfähige Ladungsträger im betrachteten Raumbereich.

Beim elektrischen Leitungsvorgang wird **elektrische Feldenergie umgewandelt**:

1. Die in ständiger ungeordneter Bewegung befindlichen Ladungsträger werden zusätzlich in Feldrichtung beschleunigt; elektrische Feldenergie wird in kinetische Energie der Ladungsträger und in magnetische Feldenergie umgewandelt.

2. Bei **Leitungsvorgängen in Stoffen** treten Stöße mit den Teilchen des Stoffes auf; Beschleunigungen und Verzögerungen wechseln ab.
3. Dadurch kann die Zusatzbewegung der Ladungsträger in Feldrichtung bei konstantem Feld angenähert durch eine zeitlich konstante Durchschnittsgeschwindigkeit beschrieben werden.
4. Die durch Stöße an die Stoffteilchen übertragene Energie führt zu einer Vergrößerung der inneren Energie des Stoffes, die sich vor allem als Temperaturerhöhung zeigt.
5. Zur Aufrechterhaltung des elektrischen Feldes während des Leitungsvorganges ist eine ständige Nachlieferung der umgewandelten Energie notwendig. Geeignete Quellen (Lichtnetz, Stromversorgungsgeräte, Batterien u. ä.) werden als gegeben vorausgesetzt.

Das allgemeine Modell beruht auf dem Wissen über den Aufbau der Stoffe aus Teilchen, über die Atome und Moleküle, ihre Eigenschaften, ihr Zusammenwirken und ihre Wechselwirkung mit Feldern.

Bei seiner Anwendung auf Leitungsvorgänge in verschiedenen Medien (Stoffe, Vakuum) treten typische Fragestellungen auf:

- Liegt ein zeitlich konstantes oder veränderliches Feld vor?
- Sind von vornherein wanderungsfähige Ladungsträger vorhanden?
- Durch welche Maßnahmen können wanderungsfähige Ladungsträger bereitgestellt werden?
- Gilt für den Leiter das Ohmsche Gesetz?
- Lassen sich charakteristische Merkmale bzw. Bedingungen angeben?

Das elektrische Feld wird zunächst als zeitlich konstant vorausgesetzt. Dann kann der Anteil der magnetischen Feldenergie an der gesamten Energieumwandlung vernachlässigt werden. Es gilt folgende Übersicht:

Medium	Wanderungsfähige Ladungsträger	Ohmsches Gesetz	Charakteristische Merkmale
Metalle	Elektronen sind vorhanden $I = I_-$	gilt für ϑ = konstant	Kupfer und Aluminium sind die technisch wichtigsten metallischen Leiter.
Halbleiter	Elektronen bzw. Defektelektronen sind vorhanden $I = I_+ + I_-$	gilt für ϑ = konstant und für homogenes Material	Die Eigenschaften sind stark von der Herstellung des Materials abhängig. Der Einfluß der Temperatur auf die Leitfähigkeit ist groß.

Medium	Wanderungsfähige Ladungsträger	Ohmsches Gesetz	Charakteristische Merkmale
wäßrige Lösungen	Ionen sind durch Dissoziation vorhanden $I = I_+ + I_-$	gilt für ϑ = konstant und für homogene Anordnungen	Starke Dissoziation tritt nur bei Lösungen von Salzen, Säuren und Basen auf; sie ist u. a. von der Konzentration abhängig.
Gase	Ionen und Elektronen werden durch Ionisation bei Energiezufuhr bereitgestellt	gilt nicht	Starke Abhängigkeit der Leitungsvorgänge vom Druck des Gases
Vakuum	Elektronen werden durch Emission aus Elektroden durch Energiezufuhr bereitgestellt	gilt nicht	Wegen fehlender Wechselwirkung mit Stoffteilchen erreichen die Ladungsträger sehr große Geschwindigkeiten.

Aus dem Modell folgt unmittelbar, daß die **Stromstärke** durch den Quotienten aus allen Ladungen, die durch einen herausgegriffenen Leiterquerschnitt hindurchwandern, und der dazu benötigten Zeit erfaßt wird:

$$I = \frac{Q}{t} \qquad (104)$$

mit $I = I_+ + I_-$ und $Q = Q_+ + Q_-$.

Sie ist bei konstantem Feld in stofflichen Leitern mit konstanter Temperatur zeitlich konstant.

Darüber hinaus gilt, daß die Stromstärke im unverzweigten Stromkreis an allen Stellen gleich ist, da andernfalls Ladungen verschwinden bzw. hinzutreten müßten.

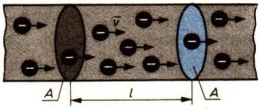
Für quantitative Formulierungen kann Bild 80/1 als Ansatz dienen, das auf Metalle eingeschränkt ist. ① ② ③ ④ ⑤

Aus dem Modell folgt weiterhin, daß die Beschaffenheit des Feldes für den Leitungsvorgang wesentlich ist.

Es kann mit Hilfe der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$ beschrieben werden, die auf der Messung von Kräften und Ladungen beruht. Derartige Messungen sind bei elektrischen Leitungsvorgängen, vor allem in Stoffen, schwer durchführbar. Deshalb wird das elektrische Feld mit Hilfe der **Spannung** U beschrieben, für die es leicht handhabbare Meßgeräte gibt. Elektrische Feldstärke und Spannung lassen sich ineinander umrechnen (↗ S. 45).

Für das Verständnis der Merkmale des Spannungsbegriffs sind energetische Betrachtungen notwendig:

Bei der Wanderung von Ladungsträgern mit der Gesamtladung Q zwischen zwei Punkten des elektrischen Feldes wird die Arbeit W verrichtet. Aus der Sicht, daß diese Arbeit aus dem Energievorrat des elektrischen Feldes stammt, stellt sie eine elektrische Arbeit dar.



80/1 In einem metallischen Leiter wandern in der Zeit t alle die Elektronen durch den markierten Querschnitt, die sich zu Beginn der Zeitspanne in dem Bereich mit der Länge $l = \bar{v} \cdot t$ befinden ($\bar{v}$ ist die mittlere Wanderungsgeschwindigkeit unter den konkreten Bedingungen). Die durch den Querschnitt hindurchtretende Gesamtladung ist $Q = n \cdot V \cdot e$, wobei n die Konzentration (Anzahl je Volumen) der Leitungselektronen, V das Volumen des Leiterstücks ($V = l \cdot A = \bar{v} \cdot t \cdot A$ mit A als Querschnitt des Leiters) und e die Elementarladung des Elektrons bedeuten.

Aus diesen Angaben läßt sich z. B. $\bar{v}$ errechnen. Für eine Abschätzung kann angenommen werden, daß Kupfer je Atom ein Leitungselektron enthält. Daraus erhält man $\bar{v} < 1\ \mathrm{mm \cdot s^{-1}}$, also einen verblüffend kleinen Wert. Das überaus schnelle Reagieren der Stromkreise auf Schaltvorgänge erklärt sich durch die hohe Geschwindigkeit, mit der sich das elektrische Feld bzw. Feldänderungen im Leiter ausbreiten.

Die Größen Q und W lassen sich nicht unmittelbar messen. Die Ladung Q wird zugänglich, wenn die Zeit t des Leitungsvorgangs einbezogen wird. Dann gilt die Gleichung (104).
Die Stromstärke I und die Zeit t sind direkt meßbar. Die Arbeit W läßt sich über die Vergrößerung der inneren Energie des Leiters messen, da bei den Energieumwandlungen der Energieerhaltungssatz gilt. Aus systematisch durchgeführten Meßreihen hat sich ergeben, daß der Quotient W/Q bei elektrischen Leitungsvorgängen zwischen zwei festen Punkten in einem konstanten elektrischen Feld konstant ist. Er ist von der Feldstärke und von der Lage der beiden Punkte im Stromkreis abhängig.
Dieser Quotient ist deshalb zur Definition der elektrischen Spannung geeignet:

$$U = \frac{W}{Q}. \tag{105}$$

Bei Anwendung der sehr allgemeingültigen Gleichung für die Leistung

$$P = \frac{W}{t} \tag{106}$$

ergibt sich anstelle von (105) mit $Q = I \cdot t$ die Form

$$U = \frac{P}{I}. \tag{107}$$

Durch den Spannungsbegriff wird die Übertragung der Feldenergie auf die wandernden Ladungsträger in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt. Dadurch wird bestätigt, daß in Leitern ein elektrisches Feld nur durch ständige Energiezufuhr aufrechterhalten werden kann.
Die Spannung ist stets auf zwei Punkte des Feldes (des Leiters) bezogen. Quellen der Elektroenergie werden durch Angabe der Spannung zwischen ihren beiden Anschlußklemmen charakterisiert.
Die Angabe gilt stets für die unbelastete Quelle. Bei Stromentnahme sinkt die Spannung an den Klemmen mit steigender Stromstärke. Durch die Auswahl einer geeigneten Quelle kann dieser Einfluß vernachlässigbar klein gehalten werden.

---

① Verdeutlichen Sie sich die Bildunterschrift zu Bild 80/1, indem Sie die folgende Frage durchdenken: Wie weit darf ein Elektron höchstens von dem rechten markierten Querschnitt des Leiters entfernt sein, wenn es innerhalb der Zeit t diesen Querschnitt gerade noch passieren soll?

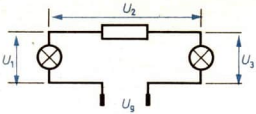
② Für die in Bild 80/1 angegebene Abschätzung werden folgende Angaben benötigt:
1 Mol Kupfer enthält $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ Atome. Es besitzt die Masse $m = 63{,}54$ g.
Die Dichte beträgt $\varrho = 8{,}92\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.
Führen Sie die Rechnung durch!

③ Wie muß sich bei konstanter Stromstärke die Wanderungsgeschwindigkeit verändern, wenn der Querschnitt größer bzw. kleiner wird?

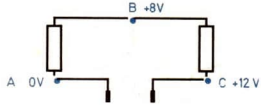
④ Wenden Sie das allgemeine Modell auf die Leitung in verdünnter Salzsäure an (chemische Umsetzungen an den Elektroden sollen außer Betracht bleiben)!

⑤ Erläutern Sie an einem Beispiel den elektrischen Leitungsvorgang im Vakuum!

Die Spannung tritt nicht nur an den Klemmen auf; es kommen beliebige Punkte des Leiters für Spannungsmessungen in Betracht. Dann ist zwischen der Gesamtspannung im Stromkreis, die von der Quelle geliefert wird, und den Teilspannungen zu unterscheiden. Aus energetischen Gründen muß die Summe der Teilspannungen gleich der Gesamtspannung sein (Bild 82/1); nur dann ist die an den wandernden Ladungen verrichtete Gesamtarbeit gleich der Summe der Teilarbeiten, wie es dem Energieerhaltungssatz entspricht.
Zur Erfassung der Gerichtetheit elektrischer Felder wird der Spannung eine Polarität (plus oder minus) zugeordnet (Bild 82/2). Die Richtung der elektrischen Feldlinien wird von plus nach minus festgelegt. Außerdem wird eine abstrakte Stromrichtung ohne Bindung an das allgemeine Leitungsmodell verabredet; sie ist von plus nach minus gerichtet. ①



82/1 In einem Stromkreis können zwischen beliebigen Punkten Teilspannungen angegeben werden.
Es gilt $U_1 + U_2 + U_3 = U_g$



82/2 Beispiel für Spannungsangaben in einem unverzweigten Stromkreis mit 2 Widerständen.
Bei Schaltungen, die mehrere Bauelemente enthalten, wird häufig ein Pol der Spannungsquelle (hier der Minuspol) als Bezugspunkt für Teilspannungen festgelegt. Aus dem Beispiel lassen sich ablesen:
Spannung zwischen A und B: 8 V
Spannung zwischen A und C: 12 V
Spannung zwischen B und C: 4 V
Die Teilspannungen an den Verbindungsdrähten können vernachlässigt werden.

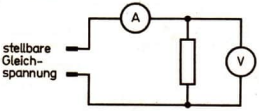
Ohmsches Gesetz und Widerstandsbegriff 34

Wenn die Bedingungen des allgemeinen Modells erfüllt sind und ein Strom fließt, stellt sich die Stromstärke nicht zufällig ein, sondern sie hängt außer von den Eigenschaften des Feldes auch von denen des Leiters ab.
Experimente mit metallischen Leitern (Bild 82/3) liefern als Ergebnis das **Ohmsche Gesetz**:

1. Für einen bestimmten Draht sind bei konstanter Temperatur Stromstärke und Spannung einander proportional;

$$I \sim U \text{ bzw. } \frac{U}{I} = \text{konstant für } \vartheta = \text{konstant.}$$

2. Bei Drähten mit anderen Abmessungen oder aus anderem Metall kehrt die Proportionalität wieder (Bild 82/4); der Quotient erhält jedoch einen anderen Zahlenwert, der für den benutzten Draht charakteristisch ist.

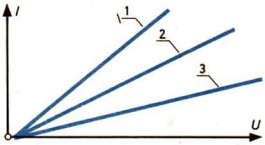


82/3 Prinzipschaltung zur Aufnahme des I-U-Zusammenhanges

Aus diesen Erfahrungsaussagen ergibt sich die Berechtigung, für metallische Drähte den **elektrischen Widerstand** als charakteristische Größe einzuführen und mit Hilfe der Gleichung

$$R = \frac{U}{I} \qquad (108)$$

zu definieren. ②



82/4 Grafische Darstellung mehrerer Meßreihen zum Ohmschen Gesetz. Die Graphen kennzeichnen verschiedene Drähte. Der Anstieg der einzelnen Graphen liefert eine eindeutige Aussage über den Widerstand des jeweiligen Drahtes.

Es ist üblich, mit dem Begriff Widerstand die durch (108) definierte physikalische Größe, die Eigenschaft des Leiters, und auch den Leiter als Gegenstand, als elektrisches Bauelement, zu benennen.
Eine systematische Erweiterung der Meßreihen führt zu der Erkenntnis, daß der Widerstand eines metallischen Drahtes von der Länge, dem Querschnitt, dem Material und der

Temperatur abhängt. Der Zusammenhang wird erfaßt durch das

► **Widerstandsgesetz**

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{A} \qquad (109)$$

$$\vartheta = \text{konstant}$$

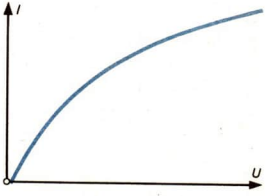
Es wird bei der Konstruktion stellbarer Widerstände (Dreh- oder Schiebewiderstand) angewendet. Ein Gleitkontakt ermöglicht die Änderung der Länge des stromführenden Leiters.

Eine Verknüpfung der Gleichungen (108) und (109) zeigt, daß bereits in einem einfachen Stromkreis zahlreiche Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen physikalischen Größen bestehen. So kann z. B. eine konstante Spannung an einen stellbaren Widerstand gelegt werden. Dann gilt $I \sim \frac{1}{R}$.

Bei Temperaturänderungen treten weitere Abhängigkeiten auf. Als besonders wichtig für die Eigenschaften des Leiters erweisen sich die Konzentration (Anzahl je Volumen, vgl. Bild 80/1) und die Beweglichkeit der wanderungsfähigen Ladungsträger (diese drückt aus, welche durchschnittliche Wanderungsgeschwindigkeit die Ladungsträger im jeweiligen Stoff bei gegebener Feldstärke erlangen).

Jedes Metall weist eine charakteristische konstante Konzentration der Ladungsträger auf. ③ ④ ⑤ ⑥

Nimmt die Temperatur zu, dann werden die Wärmebewegungen (Gitterschwingungen) im Metall heftiger, die Wanderung der Leitungselektronen wird erschwert, ihre Beweglichkeit sinkt. Dadurch wird die *I-U*-Beziehung beeinflußt.



83/1 Grafische Darstellung des *I-U*-Zusammenhanges bei einer Glühlampe. In diesem Falle ist der Graph keine Gerade. Das Ohmsche Gesetz gilt nur für konstante Temperatur des Leiters.

▼ Eine handelsübliche Glühlampe, die einen metallischen Leuchtdraht besitzt, wird an eine veränderliche Spannungsquelle geschaltet. Spannungen und Stromstärken werden gemessen. Die Schaltung entspricht Bild 82/3. Das Ergebnis ist in Bild 83/1 dargestellt.

---

① Wählen Sie in Bild 82/2 nicht den Punkt A, sondern zunächst C und dann B als Bezugspunkt der Spannungsangaben!
Wie ändern sich dadurch Polung (Vorzeichen) und Betrag der Spannungsangaben in den einzelnen Punkten?

② Vergleichen Sie die Anstiege der Graphen in Bild 82/4, und formulieren Sie präzise den Zusammenhang zwischen Anstieg und Widerstand!

③ Geben Sie zum Widerstandsgesetz Schaltungen an, mit denen die jeweilige Abhängigkeit des Widerstandes durch Messungen bestätigt werden kann!

④ Wenn in laborpraktischen Übungen ein Schiebewiderstand an eine konstante Spannung anzuschließen ist, kommt es häufig zu Schäden an den Geräten durch zu große Stromstärken. Suchen Sie nach einer Erklärung dafür!

⑤ Wie muß die Spannung geändert werden, wenn die Drahtlänge durch einen Schieber verändert wird und die Stromstärke konstant bleiben soll?

⑥ Schaffen Sie sich einen Überblick über technisch wichtige Metalle zur Leitung des elektrischen Stromes! Welche besondere Eigenschaft besitzt Konstantan?

Gesetze des Stromkreises mit mehreren Widerständen

35

Die in Kl. 8 bereits behandelten einfachsten Beispiele stellen Stromkreise aus zwei Widerständen dar, die entweder in Reihe (unverzweigter Stromkreis) oder parallel (verzweigter Stromkreis) geschaltet sind.

Unverzweigter Stromkreis. Die Gleichung (108) wird sowohl auf die einzelnen Widerstände als auch auf den Stromkreis als Ganzes angewendet (Bild 84/1).

$$\frac{U_g}{I_g} = R_g, \qquad (110)$$

wobei durch R_g alle im Stromkreis vorhandenen Widerstände zusammengefaßt werden.
Aus dem allgemeinen Modell konnte bereits gefolgert werden (↗ S. 80), daß die Stromstärke in allen Teilen des Stromkreises gleich ist; es gilt

$$I_1 = I_2 = I_g.$$

Unter Anwendung der Gleichung $U = I \cdot R$ auf die einzelnen Widerstände folgt daraus

$U_1 = I_g \cdot R_1$ und

$U_2 = I_g \cdot R_2$ sowie nach Addition beider Gleichungen

$$U_1 + U_2 = I_g \cdot (R_1 + R_2). \qquad (111)$$

Aus dem allgemeinen Modell (↗ S. 80) ergibt sich außerdem:

$$U_1 + U_2 = U_g; \qquad (112)$$

es bildet sich eine Spannungsteilung aus, so daß die Summe der Teilspannungen gleich der Gesamtspannung ist.
Durch Verknüpfung von (110), (111) und (112) folgt

$$R_1 + R_2 = R_g; \qquad (113)$$

die beiden Widerstände beeinflussen den Stromkreis genauso, als ob an ihrer Stelle ein einziger Widerstand $R_g = R_1 + R_2$ eingeschaltet wäre. ① ②

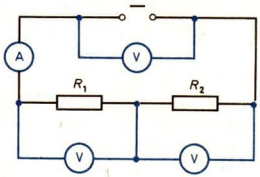
Da diese Überlegungen durch die experimentellen Erfahrungen bestätigt werden, erweist sich der Ansatz, daß die Gesetze des Stromkreises auch für dessen Teile gelten, als berechtigt. Zugleich werden die Aussagen des allgemeinen Modells bestätigt.

Verzweigter Stromkreis. Da keine Ladungen verschwinden bzw. hinzutreten können, muß gelten (Bild 84/2)

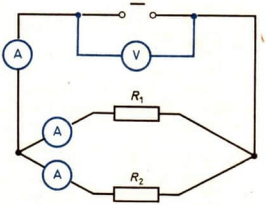
$$I_g = I_1 + I_2. \qquad (114)$$

Da sich zwischen den Enden der Widerstände und den Verzweigungspunkten nur die Verbindungsdrähte ($R \to 0$) befinden, gilt

$$U_g = U_1 = U_2. \qquad (115)$$



84/1 Schaltung eines unverzweigten Stromkreises mit zwei Widerständen sowie Spannungs- und Strommesser



84/2 Schaltung eines verzweigten Stromkreises mit zwei Widerständen

Die Division von (114) durch U_g und Anwendung von (115) liefert

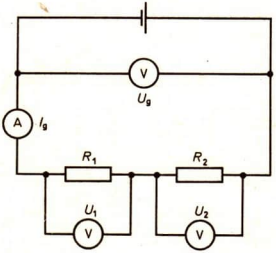
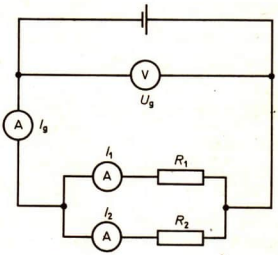
$$\frac{I_g}{U_g} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2}.$$

Übersichtlicher und häufiger ist die Schreibweise

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \qquad (116)$$

Die nachfolgenden Übersichten fassen die Gesetze des unverzweigten (Bild 85/1) und des verzweigten Stromkreises (Bild 85/2) zusammen. Sie wurden für jeweils zwei Widerstände erarbeitet. Sie lassen sich auf mehrere Widerstände verallgemeinern. ③

Zusammenfassung 36

Unverzweigter Stromkreis (Reihenschaltung)	Verzweigter Stromkreis (Parallelschaltung)
	
Energiewandler liegen in Reihe	Energiewandler liegen parallel
$U_g = U_1 + U_2$ $I_g = I_1 = I_2$	$U_g = U_1 = U_2$ $I_g = I_1 + I_2$
$R_g = R_1 + R_2$ $U_1 : U_2 = R_1 : R_2$	$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$

① Geben Sie die im Text nicht genannten Zwischenschritte bei der Herleitung der Gleichung (113) an!
② Wie können die Gleichungen (112) und (113) experimentell geprüft werden?
③ Suchen Sie nach einer allgemeinen Aussage für den Fall, daß zwei gleiche Widerstände parallel geschaltet werden!

Innenwiderstand. Bei der Verwendung von Meßgeräten muß berücksichtigt werden, daß alle Spannungs- und Strommesser für die Anzeige eines Meßwertes eine Spannung zwischen ihren Eingangsklemmen und einen sie durchfließenden Strom benötigen. Sie besitzen somit einen elektrischen Widerstand. Dieser wird als **Innenwiderstand** des Meßgerätes bezeichnet und beeinflußt in allen Fällen den Gesamtwiderstand und damit die Stromstärke-Spannung-Verhältnisse im Stromkreis, wie aus den Bildern 86/2 bis 86/4 hervorgeht.

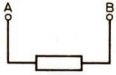
▼ Zum Widerstand R ist in Reihe ein Strommesser geschaltet. Bild 86/2a zeigt die reale Schaltung, Bild 86/2b eine idealisierte Abwandlung, die den Innenwiderstand R_{MA} des Strommessers hervorhebt.
Der Strommesser muß von dem zu messenden Strom durchflossen werden. Deshalb ist er mit den zu untersuchenden Widerständen in Reihe zu schalten. Für den Widerstand zwischen den Punkten A und B gilt $R_{AB} = R + R_{MA}$.

▼ Zum Widerstand R ist parallel ein Spannungsmesser geschaltet (Bild 86/3).
Der Spannungsmesser muß mit den beiden Leiterpunkten verbunden werden, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll. Deshalb ist er den zu untersuchenden Widerständen parallel zu schalten.
Jetzt gilt $\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{MV}}$.

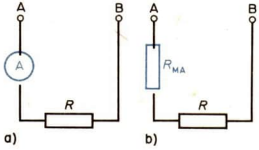
Meßgerechte Schaltung. In der Schaltung nach Bild 86/4 wird der Stromkreis durch beide Meßgeräte beeinflußt. In Bild 86/4b sind die Widerstände in den Vordergrund gerückt. Es zeigt sich, daß die Stromstärke im Widerstand R_{MA} gleich der Summe der Stromstärken in den Widerständen R und R_{MV} ist.
Es wird mit dem Strommesser also nicht der durch den Widerstand R fließende Strom gemessen, obwohl gerade das beabsichtigt ist. **Die Stromstärkemessung weist durch das Vorhandensein des Spannungsmessers prinzipiell einen Fehler auf.** Die am Widerstand R anliegende Spannung wird dagegen im Rahmen der Meßunsicherheit des Spannungsmessers richtig gemessen. Die Schaltung nach Bild 86/4 wird deshalb **spannungsrichtige Meßschaltung** genannt. Dementsprechend gibt es auch eine **stromrichtige Meßschaltung,** die in Bild 87/1 dargestellt ist. ①

Aus den in den Bildern 86/2 bis 87/1 enthaltenen Angaben läßt sich die folgende Regel ableiten, die für Abschätzungen oft ausreicht:
Bezogen auf den Widerstand des Bauelements, an dem die Messungen ausgeführt werden sollen, muß

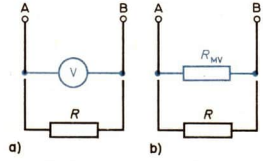
- der Innenwiderstand des Spannungsmessers möglichst groß,
- der Innenwiderstand des Strommessers möglichst klein sein.



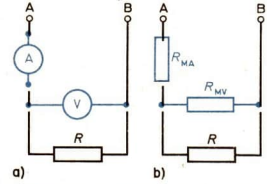
86/1 Beliebiger Widerstand R als Teil eines Stromkreises, mit dem er in den Punkten A und B verbunden ist. Die Stromstärke im Widerstand und die Spannung zwischen seinen Anschlußklemmen sind zu messen. Sie sollen durch das Einschalten der Meßgeräte möglichst wenig verändert werden.



86/2 Strommesser im Stromkreis



86/3 Spannungsmesser im Stromkreis



86/4 Strom- und Spannungsmesser sind gleichzeitig eingeschaltet.
Es liegt eine spannungsrichtige Meßschaltung vor.

Der Innenwiderstand ist am Meßgerät entweder direkt ablesbar oder kann aus den ablesbaren Daten berechnet werden.

Veränderliche Widerstände im Stromkreis 38

Oft ergibt sich die Notwendigkeit, trotz konstanter Betriebsspannung willkürliche Beeinflussungen in Stromkreisen vorzunehmen. Bekannt sind Stellmöglichkeiten an Beleuchtungs- oder Heizgeräten, an Motoren oder elektronischen Geräten, für Lautstärke oder Helligkeit beim Fernsehapparat. Da die technisch bedeutsamen Schaltungen relativ kompliziert sind, soll hier das Wesentliche an einer einfachen Schaltung betrachtet werden (Bild 87/2).
Es ist zu untersuchen, wie sich die Veränderungen von R_s auf die einzelnen Daten des Stromkreises auswirken.
Da die Gesetze des unverzweigten Stromkreises bekannt sind, führen theoretische Überlegungen zum Ziel:

1. Die Spannung der Quelle U_g ist konstant.
2. Der Gesamtwiderstand beträgt

$$R_g = R_k + R_s, \tag{117}$$

er ist nicht konstant.

3. Die Stromstärke ist in allen Teilen des Stromkreises gleich, sie beträgt

$$I_g = \frac{U_g}{R_k + R_s}, \tag{118}$$

sie ist nicht konstant.

4. Die Teilspannungen betragen

$$U_k = I_g \cdot R_k \quad \text{und} \quad U_s = I_g \cdot R_s. \tag{119}$$

Mit dem in 3. gefundenen Term für I_g ergibt sich

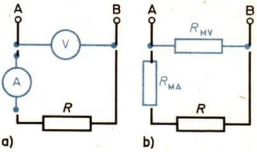
$$U_k = \frac{R_k}{R_k + R_s} \cdot U_g \quad \text{und} \tag{120}$$

$$U_s = \frac{R_s}{R_k + R_s} \cdot U_g. \tag{121}$$

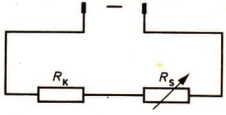
Beide Teilspannungen sind nicht konstant. ② ③ ④

Die einzelnen Aussagen können nun weiter theoretisch diskutiert sowie experimentell überprüft werden.

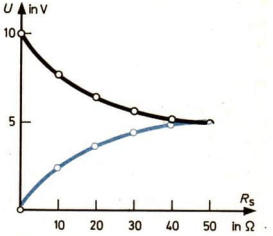
▼ Gemäß Bild 87/2 wird für $R_k = 50\,\Omega$ und $0 < R_s \leqq 50\,\Omega$ und $U_g = 10$ V für 6 Werte von R_s die Stromstärke und die Teilspannung U_s gemessen. Die Ergebnisse sind grafisch darzustellen.
In Bild 87/3 sind beide Teilspannungen unter diesen Bedingungen dargestellt. Die Messungen bestätigen die theoretischen Überlegungen.



87/1 Stromrichtige Meßschaltung
Der Spannungsmesser ist unmittelbar mit den Punkten A und B verbunden. Er zeigt deshalb zwar die Spannung zwischen ihnen richtig an, aber nicht die am Widerstand R liegende Spannung. Dagegen wird die Stromstärke richtig gemessen, da die Reihenschaltung der Bauelemente mit den Widerständen R und R_{MA} keine Verzweigung aufweist.



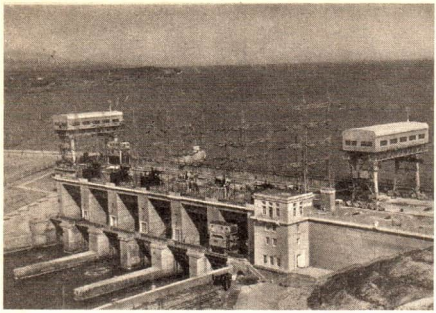
87/2 Unverzeigter Stromkreis mit einem konstanten und einem stellbaren Widerstand bei konstanter Spannung U_g der Quelle



87/3 Abhängigkeit der Teilspannungen U_k (schwarz) und U_s (blau) vom Wert des stellbaren Widerstandes R_s
$R_k = 50\,\Omega \quad 0 < R_s \leqq 50\,\Omega \quad U_g = 10$ V

---

① Welche Schaltung ist zu bevorzugen, wenn sehr kleine Stromstärken gemessen werden sollen?
② Begründen Sie jede Teilaussage in den Punkten 2. bis 4.!
③ Weisen Sie in allgemeiner Form nach, daß $U_k + U_s = U_g$ gilt!
④ Weisen Sie in allgemeiner Form nach, daß $U_k : U_s = R_k : R_s$ gilt!



Leitungsvorgänge im elektrischen Wechselfeld

Umspannwerke (auf dem Bild oberhalb des Wasserkraftwerkes) sind unentbehrliche Anlagen für die Fernleitung elektrischer Energie. Zur Überbrückung großer Entfernungen bei ausreichend geringen Verlusten sind hohe Spannungen notwendig, die mit Hilfe von Transformatoren erreicht werden. Da nur Wechselstrom transformiert werden kann, ist seine Bedeutung für die Volkswirtschaft viel größer als die des Gleichstroms.

Für die Energieversorgung der Haushalte ist eine sinusförmige Wechselspannung mit einem Effektivwert von 220 V und einer Frequenz von 50 Hz üblich. Die einzelnen Wohnungen sind technisch für eine maximale Leistung von etwa 2 ... 3 kW ausgerüstet; die mittlere tatsächlich umgesetzte Leistung liegt weit niedriger, die in Industriebetrieben nötige Leistung weit höher.
Elektrische Wechselvorgänge sind jedoch nicht nur bei der Energieversorgung unentbehrlich, sondern auch in der Nachrichtentechnik und den damit verwandten Gebieten. Die Umwandlung von Sprache oder Musik in elektrische Erscheinungen führt zwangsläufig zu Wechselspannungen bzw. -strömen.
Während in der Energieversorgung meist konstante Spannungen und Frequenzen sowie große Leistungen in Betracht kommen, treten in der Nachrichtentechnik vorwiegend kleine Leistungen, aber außerordentlich vielfältige Spannungen, Stromstärken und Frequenzen auf.

Allgemeines Leitungsmodell bei zeitlich veränderlichen Feldern 39

Das allgemeine Leitungsmodell ist auch auf periodische Vorgänge voll anwendbar. Während das magnetische Feld bei den Darlegungen zum Gleichstromkreis nicht betrachtet wurde, muß es im Wechselstromkreis wegen der gesetzmäßigen Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder bei Wechselvorgängen (↗ S. 75) beachtet werden.
Da sich alle charakteristischen Merkmale des Wechselstroms am Beispiel der metallischen Leiter erörtern lassen, werden nur diese betrachtet.
Bei Anlegen einer Wechselspannung an einen geschlossenen Stromkreis führt die geordnete Bewegung der Leitungselektronen nicht mehr zu einer Wanderung, sondern zu einer periodischen Hin- und Herbewegung wie bei einer Schwingung.

88/2 Schirmbild eines Oszillografen bei anliegender Wechselspannung

Die dabei zurückgelegten Wege sind weit kleiner als die der ohnehin stattfindenden ungeordneten Bewegung.

Zeitverlauf und Kenngrößen des Wechselstroms 40

Der Zeitverlauf von Wechselspannungen kann auf dem Schirm von Oszillografen sichtbar gemacht (Bild 88/2) und grafisch dargestellt werden (Bild 89/1).

Die **Phase** eines periodischen Vorgangs drückt aus, welchen zeitlichen Abstand ein herausgegriffener Punkt des Vorgangs vom festgelegten Nullpunkt besitzt. Phasenangaben dienen vorrangig dazu, den Zeitablauf verschiedener periodischer Vorgänge gleicher Frequenz zu vergleichen.
So verlaufen Prozesse, die durch

$$y = y_0 \cdot \sin \omega \cdot t \quad \text{und} \quad z = z_0 \cdot \sin \omega \cdot t$$

beschrieben werden, gleichphasig. Für $y = y_0 \cdot \sin \omega \cdot t$ und $z = z_0 \cdot \cos \omega \cdot t$ gilt, daß eine Phasenverschiebung von einer Viertelperiode oder $\pi/2$ vorliegt (Bilder 90/2b und 90/2c). Soweit keine Phasenbetrachtungen notwendig sind, können Wechselspannungen und -stromstärken wahlweise mit der Sinus- oder Kosinusfunktion beschrieben werden.

Gleich- und Wechselstromvorgänge können aus energetischer Sicht miteinander verglichen werden.
Für die elektrische Leistung im Gleichstromkreis gilt die Gleichung $P = U \cdot I$, für den Wechselstromkreis gilt

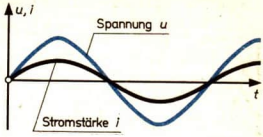
$$P = \tfrac{1}{2} \cdot u_{max} \cdot i_{max}.$$

Mit den **Effektivwerten**

$$U = \tfrac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot u_{max} \quad \text{und} \qquad (125)$$

$$I = \tfrac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot i_{max} \qquad (126)$$

wird die Gleichung $P = U \cdot I$ allgemeingültig für Gleich- und Wechselstrom (Abweichungen treten bei Phasenverschiebungen auf).
Es ist üblich, Meßgeräte für Wechselstrom in Effektivwerten zu eichen und Zahlenangaben ohne Zusatz als Effektivwerte zu verstehen. Das gilt auch für die Haushaltnetzspannung von 220 V. Der Maximalwert beträgt demzufolge $u_{max} = \sqrt{2} \cdot U$, das sind etwa 300 V, was für den Arbeitsschutz von Bedeutung ist. ① ②



89/1 Grafische Darstellung einer Wechselspannung und eines Wechselstroms.

Die wichtigsten Kenngrößen sind **Momentan- und Maximalwert** (mit Kleinbuchstaben bezeichnet) sowie **Frequenz f und Periode $T = \frac{1}{f}$**

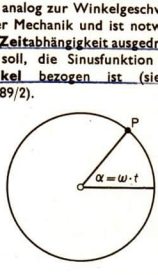
Die mathematischen Formulierungen lauten

$$u = u_{max} \cdot \sin \omega \cdot t \qquad (122)$$

$$i = i_{max} \cdot \sin \omega \cdot t \qquad (123)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \qquad (124)$$

Die Einführung der Kreisfrequenz erfolgt analog zur Winkelgeschwindigkeit in der Mechanik und ist notwendig, da eine Zeitabhängigkeit ausgedrückt werden soll, die Sinusfunktion aber auf **Winkel** bezogen ist (siehe auch Bild 89/2).



89/2 Der Zusammenhang zwischen Winkel und Zeit ergibt sich anhand einer Bewegung eines Punktes auf dem Umfang des Einheitskreises.
Ein Punkt P umläuft gleichförmig den Einheitskreis. Der Radius überstreicht in der Zeit t den Winkel α. Zum Vollwinkel 2π gehört die Umlaufzeit T. Dann gilt

$$\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{t}{T} \text{ oder } \frac{\alpha}{t} = \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

---

① Berechnen Sie i_{max} für eine Glühlampe 220 V, 60 W und für einen Tauchsieder 220 V, 1000 W!

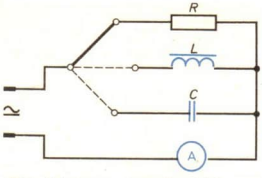
② In einem Wechselstromkreis wurden einige Größen gemessen und in die Tabelle eingetragen. Vervollständigen Sie die Tabelle! (Die Werte sind real für den Anschluß eines Lautsprechers an ein hochwertiges Rundfunkgerät.)

U	I	u_{max}	i_{max}	R	P
10 V				4 Ω	

Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis 41

Weitere Besonderheiten des Wechselstromkreises lassen sich durch Experimente erkennen:

▼ Ein Stück Widerstandsdraht, eine Spule und ein Kondensator werden nacheinander an eine Gleichspannungs- und eine Wechselspannungsquelle geschaltet (Bild 90/1). Die Spannungen sollen in allen Fällen gleich sein, die Stromstärke wird jeweils gemessen. Der Zeitverlauf von u und i wird am Oszillografen beobachtet. ①



90/1 Schaltung zum Vergleich von Gleich- und Wechselstromkreis

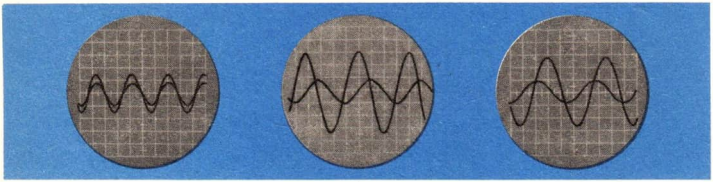
Das Experiment liefert folgende Ergebnisse:
- Beim Widerstandsdraht ist die Stromstärke im Gleich- und Wechselstromkreis gleich groß.
- Bei der Spule ist die Stromstärke im Gleichstromkreis deutlich größer als im Wechselstromkreis.
- Beim Kondensator fließt im Gleichstromkreis kein Strom, wohl aber im Wechselstromkreis.
- Bei Spule und Kondensator treten im Wechselstromkreis Phasenverschiebungen auf.

Ein Widerstand, der im Gleich- und Wechselstromkreis zu gleichen Erscheinungen führt, wird als **ohmscher Widerstand *R*** bezeichnet; er wird durch die bereits genannten Gleichungen (108) und (109) vollständig beschrieben. Außerdem zeigt der Oszillograf: Die Maxima und Nullstellen der Spannungskurve fallen auf dieselben Zeitpunkte wie in der Stromstärkekurve, zwischen Spannung und Stromstärke tritt keine Phasenverschiebung auf (Bild 90/2a).
In den Bildern 90/2b und 90/2c ist der Verlauf der entsprechenden Kurven bei einer Spule und bei einem Kondensator zu erkennen.

90/2a Schirmbild eines Oszillografen mit u-t-Verlauf (große Amplitude) bzw. i-t-Verlauf (kleine Amplitude) bei einem ohmschen Widerstand

90/2b Schirmbild entsprechend Bild 90/2a bei einer Spule

90/2c Schirmbild entsprechend Bild 90/2a bei einem Kondensator



Kondensator im Wechselstromkreis 42

Die für den Kondensator charakteristische physikalische Größe ist die Kapazität.

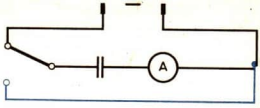
► **Kapazität** eines Kondensators

$$C = \frac{Q}{U} \qquad (127)$$

Einheit der Kapazität ist 1 F (Farad). $1\ \mathrm{F} = 1\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{V}^{-1}$

Träger der Energie des geladenen Kondensators ist das elektrische Feld.

▼ Beim Anschalten eines Kondensators (Bild 91/1) an eine Gleichspannung fließt ein sehr kurzdauernder Ladestrom (Bild 91/2), bis zwischen den Platten die gleiche Spannung wie an den Klemmen der Quelle besteht. Dann hört der Stromfluß auf, da das Dielektrikum ein Isolator ist (Bild 91/3).

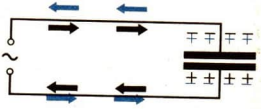


91/1 Schaltung eines Kondensators

Beim Anlegen einer Wechselspannung an einen Kondensator fließt dagegen ständig ein Wechselstrom. Zur Erklärung dieses Unterschiedes wird wieder das allgemeine Leitungsmodell herangezogen. ②

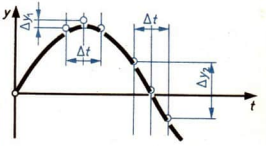
91/2 Grafische Darstellung zum Lade- und Entladevorgang

Infolge der fortwährenden Änderung der Wechselspannung sowohl hinsichtlich des Betrages als auch der Polarität kommt es zu einer ständigen Auf- und Entladung, zu einer periodischen Umladung des Kondensators, die sich im ganzen Stromkreis auswirkt. An jeder beliebigen Stelle führen die Elektronen analoge periodische Hin- und Herbewegungen aus, wie sie stattfinden, wenn sich anstelle des Kondensators z. B. eine Glühlampe im Wechselstromkreis befindet. Der Strommesser zeigt einen beständigen Ausschlag. Nur im Kondensator selbst gibt es Unterschiede gegenüber dem ohmschen Widerstand. Da die Elektronen nicht in das Dielektrikum wandern können, ändert sich auf den Platten ständig deren Anzahl. Derartige Ladungsänderungen kommen im ohmschen Widerstand nicht vor.



91/3 Schematische Darstellung der Elektronenbewegung im Wechselstromkreis mit Kondensator

Aus diesen Überlegungen läßt sich auch die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke ableiten. Dazu werden markante Werte der Spannung bzw. Stromstärke betrachtet. Bei ihrem Vergleich ist zu beachten, daß sich eine zeitlich sinusförmig veränderliche Größe unterschiedlich schnell ändert (Bild 91/4).



91/4 Änderung einer sinusförmigen Zeitfunktion y bei gegebenem Δt
Die Änderung von y ist in der Umgebung des Maximums am kleinsten, in der Umgebung der Nullstelle am größten.

Aus dem allgemeinen Modell folgt somit: ③ ④ ⑤ ⑥

- Die Spannung erreicht ihre Maximalwerte, wenn die Kondensatorplatten gegenpolig maximal geladen sind. In diesem Zeitpunkt fließt weder ein Lade- noch ein Entladestrom, die Stromstärkekurve durchläuft die Nullstelle.
- Die Spannungskurve durchläuft die Nullstelle, wenn die Ladungen auf den Kondensatorplatten kurzzeitig gleichverteilt sind. Die Umladung ist in vollem Gange, die Stromstärke erreicht ihr Maximum.

---

① Wiederholen Sie die Abhängigkeit des ohmschen Widerstandes R von den Eigenschaften des Leiters und die Abhängigkeit der Kapazität C von den Eigenschaften des Kondensators!

② Warum verlaufen die Kennlinien des Lade- und Entladestromes im Bild 91/2 gekrümmt?

③ Zeichnen Sie je eine Sinus- und Kosinuskurve auf Millimeterpapier in ein y-t-Koordinatensystem!

④ Nennen Sie die markanten Punkte der Sinuskurve, die mit den Nullstellen der Kosinuskurve zeitlich zusammenfallen, und umgekehrt!

⑤ Analysieren Sie den Zeitverlauf der Kurven in Frage 3, und geben Sie an, ob die positiven Maxima der Sinuskurve früher oder später durchlaufen werden als die der Kosinuskurve!

⑥ Charakterisieren Sie die Bereiche der Sinus- und Kosinusfunktion, in denen die Funktion
a) kurzzeitig nahezu konstant bleibt bzw.
b) sich besonders schnell ändert!

Der vollständige Zeitablauf ist für Kondensator und Spule in Bild 90/2b und 90/2c dargestellt.
Die Vorgänge müssen auch vom energetischen Gesichtspunkt aus eingeschätzt werden:
Es findet eine ständige Umwandlung von Energie der Quelle in elektrische Feldenergie des Kondensators statt und umgekehrt. Umwandlungen in andere Energieformen sind wenig ausgeprägt, da nur schwache Magnetfelder auftreten und der ohmsche Widerstand der Leiter meist sehr klein ist.

▼ **Kapazitiver Widerstand des Kondensators.** Ein Kondensator und ein Strommesser werden in Reihe an eine Quelle konstanter Wechselspannung geschaltet (Bild 92/1). Dann wird systematisch die Frequenz f verändert. Danach werden die Messungen wiederholt, wobei der Kondensator durch solche mit anderer Kapazität ersetzt wird.

92/1 Schaltplan zum Experiment

Es ergibt sich:

– Die Stromstärke wird mit steigender Frequenz größer.
– Die Stromstärke wird mit steigender Kapazität größer.

Genaue Messungen zeigen, daß lineare Zusammenhänge vorliegen.

$I \sim f$ und $I \sim C$.

Die beiden Aussagen lassen sich zu $I \sim f \cdot C$ zusammenfassen. Dieses Ergebnis läßt sich auf theoretischem Wege auswerten. Hierzu muß die Gleichung $I = Q/t$ berücksichtigt werden. Sie ist zwar in dieser Form nur für konstante Stromstärken zutreffend, kann aber so verallgemeinert werden, daß sie auch für Momentanwerte von Wechselströmen gültig ist. Das geschieht mit Hilfe der Differentialrechnung in mathematischer Analogie zur Momentangeschwindigkeit der Mechanik (↗ S. 14):

$$i = \frac{dQ}{dt}. \qquad (128)$$

Außerdem wird die Gleichung (127) für die Kapazität eines Kondensators benötigt. Die Schreibweise $C = Q/U$ wird entsprechend verallgemeinert:

$$C = \frac{dQ}{du}. \qquad (129)$$

Die Verknüpfung von (128) und (129) liefert

$$i = C \cdot \frac{du}{dt}. \qquad (130)$$

Diese Gleichung wird mit der Gleichung für die Wechselspannung

$$u = u_{max} \cdot \sin \omega \cdot t \qquad (122)$$

verknüpft:

$$i = C \cdot u_{max} \cdot \frac{d(\sin \omega \cdot t)}{dt}$$

$$i = \underbrace{\omega \cdot C \cdot u_{max}}_{i_{max}} \cdot \cos \omega \cdot t. \qquad (131)$$

Zur weiteren Interpretation der Gleichung (131) wird die Gleichung (123) herangezogen:

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

Der Vergleich mit (131) ergibt eine Präzisierung und Erweiterung der aus dem allgemeinen Modell abgeleiteten Folgerungen:

- Im Stromkreis fließt ein sinusförmiger Wechselstrom der gleichen Frequenz, die die angelegte Wechselspannung besitzt. Die Stromstärke ist gegenüber der Spannung um $\varphi = -\pi/2$ phasenverschoben, wie aus dem Vergleich der Funktionen Sinus und Kosinus hervorgeht.
- Als Maximalwert kommt nur die Zusammenfassung der einzelnen Faktoren in (131) in Betracht:

$$i_{max} = \omega \cdot C \cdot u_{max}. \qquad (132)$$

- Die Schreibweise $\frac{u_{max}}{i_{max}} = \frac{1}{\omega \cdot C}$ (133) der Gleichung (132) wird in Anlehnung an die allgemeingültige Gleichung $R = \frac{U}{I}$ so gedeutet, daß der Kondensator im Wechselstromkreis einen Widerstand hat. Dieser wird als **kapazitiver Widerstand X_C** bezeichnet; es gilt

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}. \qquad (134)$$

- Die Effektivwerte von Spannung und Stromstärke im Wechselstromkreis sind stets den Maximalwerten proportional. Deshalb gilt die Gleichung (133) nicht nur für die Maximalwerte, sondern auch für die Effektivwerte. Sie stimmt demzufolge mit der gemäß Bild 92/1 experimentell gefundenen Proportionalität $I \sim f \cdot C$ überein.

Dieses Zusammenwirken von experimentellen und theoretischen Untersuchungen, das weit über die dargelegten Beispiele hinausreicht, führt zu gesicherten Erkenntnissen. ① ②

► **Ein Kondensator im Wechselstromkreis hat einen kapazitiven Widerstand X_C.**

Zwischen Spannung und Stromstärke tritt eine Phasenverschiebung φ auf.

$$X_C = \frac{U}{I} \qquad (135)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \qquad (134)$$

$$\varphi = -\frac{\pi}{2}$$

Spule im Wechselstromkreis

43

Im Gleichstromkreis hat die Spule einen ohmschen Widerstand, der durch den Spulendraht bestimmt ist und nach dem

---

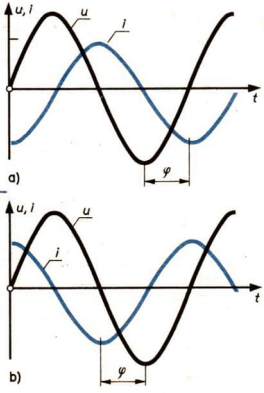
① Zeigen Sie allgemein, daß $\frac{U}{I} = \frac{u_{max}}{i_{max}}$ gilt!

② Beschreiben Sie in Worten die Abhängigkeiten, die durch die Gleichung $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ ausgedrückt werden!

Widerstandsgesetz (109) berechnet werden kann. Wie das Experiment nach Bild 90/1 ergeben hat, tritt im Wechselstromkreis ein zusätzlicher Widerstand auf.
Da das magnetische Feld ein charakteristisches Merkmal der Spule bildet und außerdem elektrische Wechselvorgänge betrachtet werden, sind alle Bedingungen für das Auftreten elektromagnetischer Induktionserscheinungen erfüllt (↗ S. 58), wobei in einer einzelnen Spule nur Selbstinduktion in Betracht kommt.
Die diesbezüglichen Eigenschaften einer Spule werden in der **Induktivität** L zusammengefaßt, die u. a. von der Windungsanzahl der Spule abhängig ist (↗ S. 66). ①

Wenn an einer Spule eine Wechselspannung anliegt, fließt ein Wechselstrom, der eine Selbstinduktionsspannung hervorruft. Diese ist nach dem Lenzschen Gesetz so gepolt, daß sie dem ursächlichen Vorgang (also der anliegenden Wechselspannung) entgegenwirkt.
In der Spule treten demzufolge zwei entgegengesetzt gepolte Spannungen auf, die eine resultierende Spannung ergeben. Diese ist stets kleiner als die anliegende Spannung; deshalb ist auch die Stromstärke kleiner als bei angelegter Gleichspannung. ②

Aus dem Experiment (Bild 90/2b) geht hervor, daß bei der Spule im Wechselstromkreis eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke auftritt. Sie kommt zustande, weil nach dem Induktionsgesetz das Maximum der Induktionsspannung zu dem Zeitpunkt auftreten muß, in dem die Stromstärke die größte Änderungsgeschwindigkeit aufweist. Das trifft für den Nulldurchgang des Wechselstroms zu. Demzufolge sind die beiden Kurven (Stromstärke und Selbstinduktionsspannung) um eine Viertelperiode phasenverschoben, wobei die Spannungsmaxima den Stromstärkemaxima vorausgehen. Das wird durch ein Pluszeichen ausgedrückt (Bild 94/1a). Die Energieumwandlungen erfolgen analog zum Kondensator hier zwischen der Quelle und dem magnetischen Feld der Spule. ③



94/1 Kurvenverlauf von Spannung und Stromstärke bei Phasenverschiebung

a) bei Spule, $\varphi = +\frac{\pi}{2}$

b) bei Kondensator, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$

▼ **Induktiver Widerstand der Spule.** Eine Spule und ein Strommesser werden analog zu Bild 92/1 in Reihe an eine Quelle konstanter Wechselspannung geschaltet. Dann wird systematisch die Frequenz f verändert. Danach werden die Messungen wiederholt, wobei die Induktivität L der Spule verändert wird. Es ergibt sich:
– Die Stromstärke wird mit steigender Frequenz kleiner.
– Die Stromstärke wird mit steigender Induktivität kleiner.
Genaue Messungen zeigen, daß umgekehrte Proportionalität vorliegt:

$$I \sim \frac{1}{f} \quad \text{und} \quad I \sim \frac{1}{L}$$

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt auf theoretischem Wege. Hierzu wird eine idealisierte Spule angenommen, deren ohmscher Widerstand Null ist. Ausgangspunkt ist die Gleichung für die Selbstinduktionsspannung (↗ S. 66).

Es ergibt sich:

$$u = L \cdot \frac{di}{dt}. \qquad (136)$$

Wenn in einer Spule ein Wechselstrom $i = i_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$ fließt, tritt ständig eine Selbstinduktionsspannung auf. Im Idealfall ist die anliegende Wechselspannung gleich der Selbstinduktionsspannung. Ihre Polung ist in Gleichung (136) bereits berücksichtigt.
Dann ergibt sich aus der Verknüpfung von

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \text{ und } \quad i = i_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$u = \underbrace{\omega \cdot L \cdot i_{max}}_{u_{max}} \cdot \cos \omega \cdot t. \qquad (137)$$

Analog zu den Darlegungen auf S. 93 wird gefolgert:
- Stromstärke und Spannung besitzen die gleiche Frequenz, die Stromstärke ist aber gegenüber der Spannung um $\varphi = +\pi/2$ phasenverschoben. Bei der Deutung ist zu beachten, daß jetzt von der Gleichung für die Stromstärke ausgegangen wurde und darin die Sinusfunktion erscheint. Der Maximalwert der Spannung beträgt

$$u_{max} = \omega \cdot L \cdot i_{max}. \qquad (138)$$

Aus der Schreibweise $\frac{u_{max}}{i_{max}} = \omega \cdot L$ folgt der **induktive Widerstand X_L** der Spule; es gilt

$$X_L = \omega \cdot L. \qquad (139)$$

Auch hier können die Effektivwerte benützt werden: ④ ⑤

► **Eine Spule im Wechselstromkreis hat einen induktiven Widerstand X_L.**

Zwischen Spannung und Stromstärke tritt eine Phasenverschiebung φ auf.

$$X_L = \frac{U}{I} \qquad (140)$$

$$X_L = \omega \cdot L \qquad (139)$$

$$\varphi = +\frac{\pi}{2}$$

Die reale Spule besitzt sowohl einen ohmschen als auch einen induktiven Widerstand. Deren Zusammenwirken kann jedoch nicht durch einfache Addition erfaßt werden.

---

① Wiederholen Sie das Induktionsgesetz und die Besonderheiten der Selbstinduktion anhand des vorliegenden Lehrbuches!

② Die Formulierung des Abschnittes scheint im Widerspruch zu der Tatsache zu stehen, daß beim Ausschalten des Stromes in Spulen sehr hohe Spannungen entstehen können, die größer sind als die ursprünglich anliegende Spannung.
Erklären Sie diese hohen Spannungen mit Hilfe des Gesetzes der Selbstinduktion unter Beachtung des Zeitverlaufs beim Ausschalten!

③ Diskutieren Sie die Kurven (Bild 90/2) unter Heranziehung der Fragen 3 bis 5 auf Seite 91!

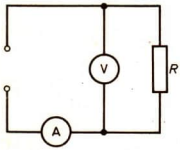
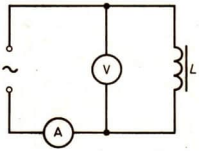
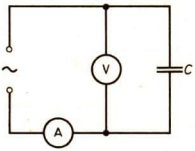
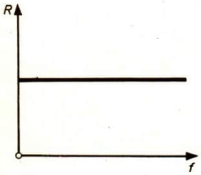
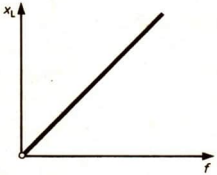
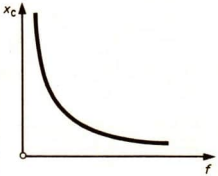
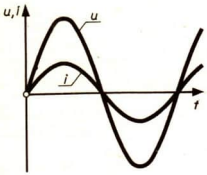
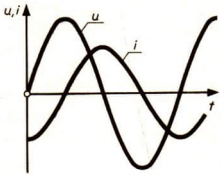
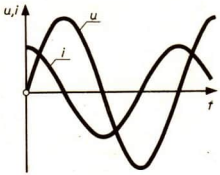
④ Werten Sie Bild 90/2 quantitativ dahingehend aus, ob X_C kleiner, gleich oder größer als X_L ist!

⑤ Formulieren Sie die Art des Zusammenhangs zwischen
a) der Stromstärke I und b) dem induktiven Widerstand X_L einerseits sowie der Induktivität L und der Frequenz f andererseits!

Zusammenfassung

44

Die unterschiedlichen Widerstände im Wechselstromkreis werden in der folgenden Übersicht zusammengestellt. Die Aussagen gelten nur für konstante Betriebszustände in Wechselstromkreisen; Ein- und Ausschaltvorgänge verlaufen wesentlich komplizierter.

Ohmscher Widerstand R	Induktiver Widerstand X_L	Kapazitiver Widerstand X_C
		
$R = \frac{U}{I}$	$X_L = \frac{U}{I}$	$X_C = \frac{U}{I}$
Metallischer Leiter: $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$	Spule: $X_L = \omega \cdot L$	Kondensator: $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$
		
		
Keine zeitliche Verschiebung zwischen Spannungs- und Stromstärkekurve	Die Spannungskurve erreicht zeitlich vor der Stromstärkekurve ihr Maximum	Die Spannungskurve erreicht zeitlich nach der Stromstärkekurve ihr Maximum

Die bei Kondensator und Spule im Wechselstromkreis auftretende Phasenverschiebung beeinflußt die im Stromkreis umgesetzte Leistung. Im Idealfall pendelt die Energie zwischen der Quelle einerseits und Kondensator bzw. Spule andererseits hin und her, wie sich aus den Überlegungen zur Phasenverschiebung ergab (↗ S. 93 und S. 95). Die umgesetzte Leistung wird durch

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \qquad (141)$$

erfaßt; sie ist bei $\varphi = \pm\pi/2$ gleich Null.

Wenn sich mehrere Widerstände im Wechselstromkreis befinden, können sich Phasenverschiebungen vom Betrag $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ ergeben. Die Leistung liegt dann zwischen Null und dem Maximalwert. Der technisch wichtige Fall $\varphi = 0$ kann durch die geeignete Zusammenschaltung von Spulen und Kondensatoren erreicht werden.

Von Bedeutung ist ferner die Abhängigkeit des kapazitiven und des induktiven Widerstandes von der Frequenz.

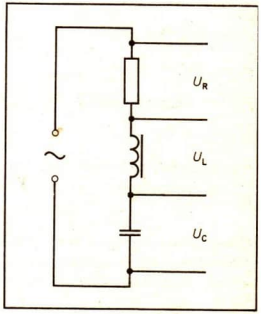
In der Nachrichtentechnik werden z. B. akustische Vorgänge (Sprache, Musik) in analoge elektrische Wechselvorgänge umgewandelt. In den Stromkreisen der dazu erforderlichen Geräte überlagern sich Gleichspannungen mit zahlreichen Wechselspannungen sehr verschiedener Frequenzen. Aus den Eigenschaften der Wechselstromwiderstände geht hervor, daß sich Kondensator und Spule in solchen Stromkreisen unterschiedlich auswirken, wodurch sie die Informationen, die mit Hilfe der Wechselvorgänge übertragen werden, beeinflussen.

Daraus ergibt sich die außerordentlich große technische Bedeutung von Spulen und Kondensatoren. Prinzipiell lassen sich mit diesen Bauelementen

- Gleich- und Wechselströme vereinigen und trennen,
- hohe Frequenzen gegenüber niedrigen bevorzugen und umgekehrt.

Einige Einzelheiten werden in den Anwendungsbeispielen deutlich (↗ S. 110).

Anhand eines relativ einfachen und charakteristischen Beispiels (Bild 97/1) soll ein Ausblick auf weitere Gesetze des Wechselstromkreises gegeben werden.



97/1 Schaltplan zum Experiment (Reihenschaltung verschiedener Bauelemente im Wechselstromkreis)

▼ In einem Wechselstromkreis ($f = 50$ Hz), der je einen ohmschen, kapazitiven und induktiven Widerstand in Reihenschaltung enthält, werden die Gesamtspannung und die Teilspannungen gemessen.

Der Versuch bringt folgende Ergebnisse:

Widerstand der Bauelemente	$R = 20\,\Omega$	$X_C = 50\,\mu F$	$X_L = 100\,mH$	Quellenspannung
Teilspannungen	$U_R = 10{,}5\,V$	$U_C = 33{,}5\,V$	$U_L = 16{,}5\,V$	$U_g = 20\,V$

Gegenüber einem Gleichstromkreis ist das Ergebnis verblüffend. Besonders auffällig ist, daß die Summe der Teilspannungen weit größer ist als die angelegte Quellenspannung (rund das Dreifache!). Selbst die Teilspannung U_C ist größer als U_g.

Offensichtlich gelten andere Gesetze als im Gleichstromkreis. Im Gleichstromkreis mit ohmschen Widerständen wird der Quelle soviel elektrische Arbeit entnommen, wie in thermische Energie umgewandelt wird. Im Wechselstromkreis läuft dieser Prozeß ebenfalls ab. Darüber hinaus findet jedoch eine periodische Energieumwandlung zwischen der Quelle, dem elektrischen Feld im Kondensator und dem magnetischen Feld in der Spule statt. Diese Feldenergien verursachen im Zusammenwirken mit der elektromagnetischen Induktion die überraschend hohen Teilspannungen.

Gleichungen, die diesen Erscheinungen entsprechen, können nur aufgestellt werden, wenn die Phasenverschiebung im Wechselstromkreis in die quantitativen Formulierungen einbezogen wird. Die Sachverhalte werden für die Reihenschaltung von R, X_L und X_C quantitativ richtig erfaßt, wenn die Teilspannungen grafisch durch Pfeile dargestellt werden, wobei die Phasenverschiebung als Winkel zwischen den Pfeilen auftritt, wie in Bild 98/1 dargestellt.

Nach Bild 98/1 gilt:

$$U_g = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}. \qquad (142)$$

Für die Reihenschaltung gilt auch hier

$$I_g = I_R = I_L = I_C. \qquad (143)$$

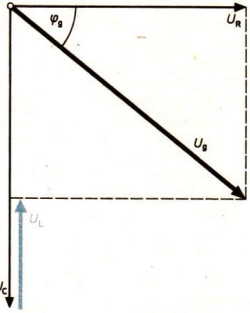
Aus beiden Gleichungen folgt

$$R_g = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \qquad (144)$$

$X_L = \sqrt{R_g^2 - R^2}$

Diese Gleichung kann sehr vielseitig interpretiert werden. Besonders wichtig ist der Fall $X_L = X_C$, der auch als Resonanzfall bezeichnet wird, in Verbindung mit kleinen Werten für R.

Die Berechnung von Parallelschaltungen ist wesentlich komplizierter, da die Kehrwerte der Widerstände bei Beachtung der Phasenverschiebung zu bilden sind.



98/1 Darstellung des Zusammenwirkens von U_R, U_L, U_C und U_g bei Reihenschaltung von R, X_L und X_C an eine Wechselspannungsquelle mit $U = U_g$
Die Pfeile für U_R werden nach rechts ($\varphi = 0$), für U_L nach oben ($\varphi = +\pi/2$), für U_C nach unten ($\varphi = -\pi/2$) gezeichnet.
Der resultierende Pfeil U_g liefert in seiner Länge die resultierende Spannung, im Winkel φ_g deren Phasenverschiebung gegenüber U_R.

Arbeitsplätze für die Fertigung integrierter Schaltkreise im Halbleiterwerk Frankfurt/Oder.

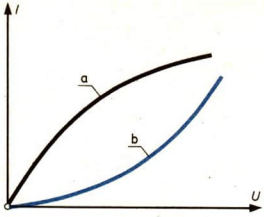
Leitungsvorgänge bei veränderlicher Beweglichkeit und Konzentration der Ladungsträger

Durch Aufdampfen, Ätzen und Diffusionsprozesse lassen sich in Siliziumscheiben elektrische Schaltungen erzeugen, wie sie früher nur durch zahlreiche räumlich getrennte Bauelemente und die zwischen ihnen befindliche Verdrahtung aufgebaut werden konnten. Mit dieser Entwicklung ist sowohl eine Miniaturisierung der Geräte verbunden als auch eine außerordentliche Vergrößerung der Anzahl möglicher elektrischer Funktionen solcher Schaltungen. Damit wurde der wissenschaftlich-technische Fortschritt stark gefördert, wobei auf die Länder der sozialistischen Staatengemeinschaft ein bedeutender Anteil entfällt. So konnte der hohe Stand der sowjetischen Raumfahrttechnik nur in Verbindung mit entsprechenden Leistungen in der Elektronik erreicht werden. Auch die DDR ist an der Produktion von Spitzenerzeugnissen beteiligt, wie Mikroprozessoren als Grundlage für eine umfassende Automatisierung der Produktion und auch Quarz-Armbanduhren für den persönlichen Gebrauch.
Die physikalische Grundlage dieser gesamten Entwicklung bilden elektrische Leitungsvorgänge, bei denen als typisches Merkmal Abweichungen vom Ohmschen Gesetz auftreten.

Bauelemente mit speziellen *I-U*-Kennlinien 46

Wie aus dem allgemeinen Leitungsmodell hervorgeht, wird in Stoffen mit großer Konzentration und Beweglichkeit der wanderungsfähigen Ladungsträger der elektrische Leitungsvorgang gefördert. Stoffe mit solchen Eigenschaften weisen einen niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand auf. Im Abschnitt über das Ohmsche Gesetz wurde gezeigt, daß die Beweglichkeit der Elektronen im Metall bei steigender Temperatur sinkt, und somit der Widerstand des Drahtes steigt. Um die Zusammenhänge genauer erfassen und auch die Konzentration der Ladungsträger einbeziehen zu können, wird der relativ grobe Vorversuch zur Aufnahme der *I-U*-Kennlinie einer Metallfadenglühlampe mit größerer Meßgenauigkeit wiederholt und durch gleichartige Messungen an einem Thermistor ergänzt (Bild 100/1).

Die Meßergebnisse an der Glühlampe sind nun mit denen am Thermistor zu vergleichen. Am auffälligsten ist die anders orientierte Krümmung der Kennlinie. ①

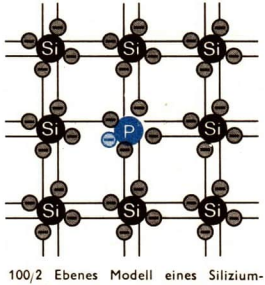


100/1 Kurve a: Kennlinie der Glühlampe
Für jeden Punkt kann aus dem zugehörigen Wertepaar U; I der Widerstand der Glühlampe berechnet werden. Er wird mit steigender Spannung größer (der Glühdraht besteht aus Metall).
Kurve b: Kennlinie des Thermistors
Die Kennlinie weist eine entgegengesetzte Krümmung auf. Der Widerstand des Thermistors wird mit steigender Spannung kleiner. Auch hier ist die Temperatur die wesentliche Einflußgröße, obwohl sie sich nicht so augenfällig wie bei der Glühlampe ändert.

Leitungsvorgang im Thermistor. Thermistoren sind Halbleiterbauelemente. Die wanderungsfähigen Ladungsträger in Halbleitern sind (wie bei den Metallen) Elektronen, jedoch unterscheiden sich die Vorgänge im einzelnen wesentlich von denen in Metallen. In sehr reinen Halbleitern sind bei tiefen Temperaturen alle Elektronen in den Atomhüllen gebunden, d. h., es gibt praktisch keine wanderungsfähigen Ladungsträger. Bei Zimmertemperatur und darüber lösen sich zwar einige Elektronen von den Gitterbausteinen und verursachen die **Eigenleitung**. Diese ist jedoch von geringer praktischer Bedeutung. Bei der Produktion von Halbleiterbauelementen werden dem Halbleitermaterial bestimmte Stoffe zugegeben, deren Atome in der chemischen Wertigkeit nicht mit der des Halbleitermaterials übereinstimmen. Durch diese **Dotierung**, die in sehr kleinen Anteilen erfolgt, werden im Halbleiterkristall **Störstellen** hervorgerufen, in denen entweder mehr oder weniger Elektronen als im idealen Kristall vorkommen.
Als Ausgangsstoffe für Halbleiter sind in erster Linie Germanium und Silizium bedeutsam, wobei Silizium gegenwärtig in der Technik die weitaus größere Bedeutung hat.
Im Kristall (Bild 100/2) stehen somit locker gebundene Elektronen zur Verfügung, die sich durch die Wärmebewegung der Gitterbausteine aus dem Verband lösen können und einen elektrischen Strom ermöglichen. Ein solches Halbleitermaterial wird als *n-leitend* (n von negativ) bezeichnet.
In einem Kristall nach Bild 101/1 sind Lücken (Löcher) an den sonst von Elektronen besetzten Plätzen vorhanden. Dadurch können Elektronen von „normalen" Plätzen in diese Lücken gelangen, wobei sie neue Löcher hinterlassen. Die Wärmebewegung fördert auch diesen Vorgang. Der dadurch mögliche elektrische Strom läßt sich modellmäßig durch das Wandern der Löcher beschreiben. Dabei werden die Löcher als positive Elementarladungen angesehen. Für theoretische Ansätze wird den Löchern modellmäßig eine Masse zugeordnet. Diese ist vom Halbleitermaterial abhängig und nur wenig von der Elektronenmasse verschieden. Daraus ergibt sich die Bezeichnung Defektelektronen für die Löcher und *p-leitend* (p von positiv) für das Halbleitermaterial.

Aus den Modelldarstellungen in den Bildern 100/2 und 101/1 ergibt sich als wesentliche Erkenntnis:
Dotiertes Halbleitermaterial kann n- oder p-leitend sein. Die Ladungsträgerkonzentration steigt mit der Temperatur.

Auch im Halbleiter verringert sich die Beweglichkeit der Ladungsträger bei Temperaturerhöhung wegen der stärkeren Gitterschwingungen. Somit treten bei Temperaturerhöhung in Halbleitern zwei gegenläufige Einflüsse auf:

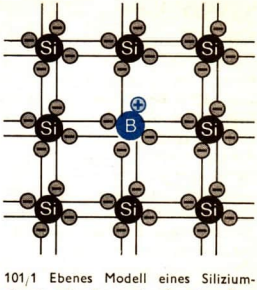


100/2 Ebenes Modell eines Siliziumgitters mit einem eingelagerten Phosphoratom, das ein 5. Elektron besitzt (Si: 4wertig, P: 5wertig)

– Der Widerstand sinkt wegen der Zunahme der Konzentration der Ladungsträger.
– Der Widerstand steigt wegen der Abnahme der Beweglichkeit der Ladungsträger.

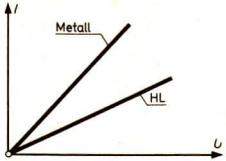
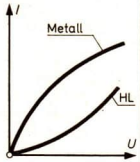
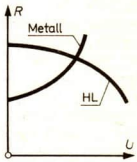
In Thermistoren überwiegt der erste Einfluß bei weitem, so daß der zweite nicht beobachtbar ist. ② ③ ④

In der nachfolgenden Übersicht sind die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefaßt. Da Polaritätswechsel der elektrischen Größen keine neuen Gesichtspunkte liefern, sind die Zusammenhänge prinzipiell auch für Wechselspannungen zutreffend. Aus der Übersicht geht außerdem hervor, daß die Konstanz von Konzentration und Beweglichkeit der Ladungsträger wesentliche Bedingungen für die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes darstellen.



101/1 Ebenes Modell eines Siliziumgitters mit einem eingelagerten Boratom, das ein Loch erzeugt (Si: 4wertig, B: 3wertig)

Übersicht zu elektrischen Leitungsvorgängen in Metallen und homogenen Halbleitern

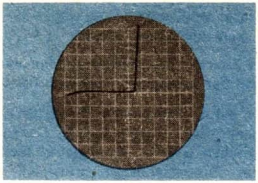
Stoff	Metall	Halbleiter	Metall	Halbleiter
Bedingung	ϑ = konstant		Temperaturänderung durch Eigenerwärmung	
Art der Ladungsträger	Elektronen	Elektronen oder Defektelektronen	Elektronen	Elektronen oder Defektelektronen
Konzentration der Ladungsträger	konstant	konstant	konstant	steigt stark mit der Temperatur
Beweglichkeit der Ladungsträger	konstant	konstant	sinkt bei steigender Temperatur	sinkt bei steigender Temperatur
Kennlinie				

① Erklären Sie den Einschaltstromstoß, der bei Glühlampen auftritt!
② Veranschaulichen Sie sich das Wandern der Defektelektronen durch Vergleiche:
Im Zuschauerraum eines Theaters wandern durch das Nachrücken der Besucher in den Sitzreihen freie Plätze!
③ Suchen Sie Beispiele dafür, daß sich zwei gegenläufige Einflüsse aufheben (kompensieren) können!
④ Wie verlaufen die Kennlinien eines ohmschen Widerstandes und eines Thermistors, wenn auch negative Werte für U und I einbezogen werden?

Zusätzliche Eigenschaften von Halbleitern treten auf, wenn p- und n-leitende Stoffbereiche (Zonen) aneinandergrenzen, wie es in der Halbleiterdiode zutrifft. Bereits bei der „Züchtung" eines Halbleiter-Einkristalls oder durch nachfolgende Maßnahmen wird die Dotierung so vorgenommen, daß n- und p-leitende Zonen entstehen. In der Grenzschicht zwischen ihnen treten Änderungen in der Ladungsverteilung auf, die die charakteristischen Eigenschaften der Diode bestimmen. Diese werden in der *I-U*-Kennlinie deutlich. Einen guten Überblick gewinnt man, wenn die Kennlinie mit Hilfe des Oszillografen aufgenommen wird (Bild 102/1).
Dieser spezielle Kennlinienverlauf läßt sich aus dem Aufbau der Halbleiterdiode (Bild 102/2) sowie der Ladungsverteilung in Abhängigkeit von der Polarität der angelegten Spannung (Bilder 102/3 bis 103/1) unter Anwendung des allgemeinen Leitungsmodells erklären.
Aus den beiden Zonen mit wanderungsfähigen Ladungsträgern unterschiedlicher Polarität (Elektronen und Defektelektronen) diffundieren solche, unterstützt durch die elektrostatischen Kräfte zwischen ihnen, aufeinander zu; sie vereinigen und neutralisieren sich im Bereich der Grenzschicht. Diese verarmt dadurch an Ladungsträgern.
Dieser Prozeß ist ohne von außen anliegende Spannung nicht von Dauer. Jedes in die Grenzschicht wandernde Elektron bzw. Defektelektron stört das Ladungsgleichgewicht in der Zone, aus der es stammt. Es entsteht im Inneren der Diode ein elektrisches Feld, das dem weiteren Ladungsausgleich entgegenwirkt. Insgesamt bildet sich auf der Grundlage der Wärmebewegung ein dynamischer Gleichgewichtszustand aus, der im Bild veranschaulicht wird. (1)

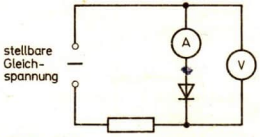
Um weitere Einzelheiten zu erfassen, wird die Kennlinie einer Siliziumdiode punktweise aufgenommen. In Bild 102/3 ist die zugehörige Schaltung, in Bild 102/4 die Kennlinie dargestellt.
Wegen der sehr geringen Stromstärke in Sperrichtung sind die Koordinaten für die Sperrstromstärke und die Sperrspannung anders geteilt als die für die Durchlaßstromstärke und die Durchlaßspannung.
Der Verlauf der Diodenkennlinie jenseits der zulässigen Sperrspannung ist gestrichelt gezeichnet.
Wenn die Sperrspannung zu groß wird, steigt die Sperrstromstärke stark an; die Diode wird dabei zerstört, wenn nicht spezielle Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden. Die maximal zulässige Sperrspannung ist eine wichtige Kenngröße einer Diode, ebenso die maximale Durchlaßstromstärke. (2) (3) (4)

Für das Fließen des Durchlaßstromes ist wegen des entgegengerichteten inneren Feldes der Sperrschicht eine positive Mindestspannung an der Anode notwendig. Sie ist bei Siliziumdioden scharf ausgeprägt und beträgt etwa 0,7 Volt. Bei Germaniumdioden ist sie unscharf und liegt bei 0,3 Volt.

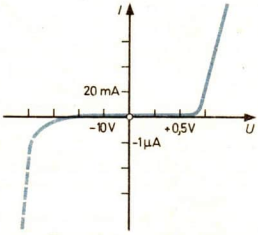


102/1 Darstellung der *I-U*-Kennlinie einer Diode auf dem Schirm eines Oszillografen

102/2 Schematische Darstellung des Aufbaus einer Halbleiterdiode
Die Halbleiterdiode erhält je eine n- und p-leitende Zone mit der dazwischenliegenden Grenzschicht.

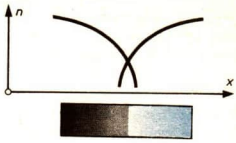


102/3 Schaltung zur punktweisen Aufnahme der Kennlinie
Die Sperrstromstärke von Siliziumdioden ist so klein (< 1 µA), daß sie nur mit sehr empfindlichen Strommessern gemessen werden kann.

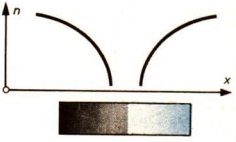


102/4 Kennlinie einer Siliziumdiode

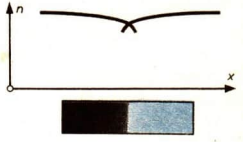
103/1 Ladungsverteilung in der Halbleiterdiode (schematisch) ohne angelegte Spannung.
In der Grenzschicht ist die Konzentration der Ladungsträger beiderlei Vorzeichens geringer als außerhalb der Grenzschicht.



103/2 Ladungsverteilung in der Grenzschicht einer Halbleiterdiode (schematisch) mit angelegter Spannung in Sperrichtung, Katode am Pluspol, Anode am Minuspol. Die Feldkräfte auf die Ladungsträger drängen die Elektronen aus der Grenzschicht in die n-Zone, die Löcher in die p-Zone. Dadurch verarmt die Grenzschicht zusätzlich an Ladungsträgern, außerdem wird sie breiter. Die Bedingungen für den Leitungsvorgang sind ungünstig, der Widerstand der Diode ist sehr groß; die Diode wird in **Sperrichtung** betrieben.



103/3 Ladungsverteilung in der Grenzschicht einer Halbleiterdiode (schematisch) mit angelegter Spannung in Durchlaßrichtung, Katode am Minuspol, Anode am Pluspol. Bei dieser Polung der Spannung werden Elektronen und Löcher zusätzlich in die Grenzschicht gedrängt. Somit stehen im gesamten Diodenkristall einschließlich der Grenzschicht wanderungsfähige Ladungsträger reichlich zur Verfügung. Die Bedingungen für den Leitungsvorgang sind erfüllt, der Widerstand der Diode ist klein; die Diode wird in **Durchlaßrichtung** betrieben.



Die häufigste **Anwendung** findet die Diode bei der Gleichrichtung von Wechselströmen (Bild 104/1). Dabei ist zu beachten, daß die Begriffe Gleichspannung und Gleichstrom die Konstanz der Polung ausdrücken, aber nicht Konstanz der Beträge der genannten Größen bedeuten (Bild 104/2). ⑤ ⑥

---

① Suchen Sie Beispiele aus anderen Gebieten der Physik, in denen dynamische Gleichgewichtszustände vorkommen!

② Beschreiben Sie die Vorgänge für die Durchlaßrichtung genauso ausführlich, wie sie für die Sperrichtung dargelegt wurden!

③ Erläutern Sie, wieso die Diode als Ventil bezeichnet werden kann!

④ Lesen Sie aus der in Bild 102/4 dargestellten Kennlinie die Durchlaßspannung der Diode ab, wenn die Durchlaßstromstärke 10 mA bzw. 40 mA beträgt! Leiten Sie daraus ab, daß Dioden leicht zerstört werden können, wenn sie ohne weitere Bauelemente an eine Spannungsquelle angeschlossen werden!

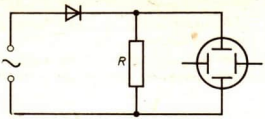
⑤ Beschreiben Sie anhand einer Skizze abschnittsweise den Zeitverlauf einer sinusförmigen Wechselspannung während einer Periode in bezug auf Betrag und Polung!

⑥ Beschreiben Sie entsprechend eine Sägezahnspannung sowie eine Rechteckspannung, wenn für beide die t-Achse Symmetrieachse ist!

Eine Diode stellt zugleich den Sonderfall eines Schalters dar: Die Durchlaßrichtung entspricht der Stellung „ein", die Sperrichtung der Stellung „aus". Eine andere Möglichkeit, Dioden als Schalter zu nutzen, wird in den Anwendungsbeispielen (↗ S. 110) gezeigt.

Als Zusammenfassung ergibt sich:

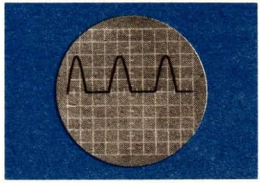
Halbleiterdioden weisen infolge der n-p-Grenzschicht eine sehr spezielle, typische Kennlinie auf. Dioden können in Durchlaß- und in Sperrichtung betrieben werden. Sie sind besonders als Gleichrichter und Schalter geeignet.



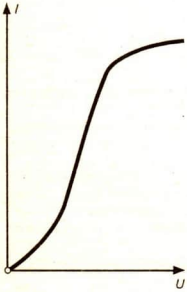
104/1 Einfachstes Beispiel für eine Gleichrichterschaltung. Ein ohmscher Widerstand wird in Reihe mit einer Halbleiterdiode an eine Wechselspannungsquelle geschaltet. Der Spannungsverlauf am Widerstand wird mit Hilfe des Oszillografen sichtbar gemacht, wie in Bild 104/2 dargestellt.

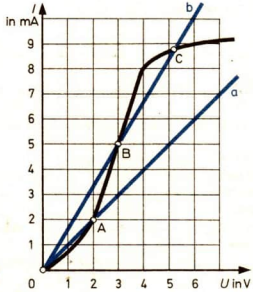
Grenzen des Widerstandsbegriffs 48

In den Ausführungen zum Ohmschen Gesetz wurde bereits auf die Frage hingewiesen, wie der Widerstandsbegriff im Zusammenhang mit gekrümmten *I-U*-Kennlinien zu interpretieren ist. In Bild 104/3 ist eine *I-U*-Kennlinie gezeichnet, wie sie z. B. für bestimmte Röhrendioden zutrifft.
Für jede *I-U*-Kennlinie gilt, daß aus dem Wertepaar eines beliebigen Punktes der Kennlinie der zugehörige Widerstand $R = U/I$ berechnet werden kann. Bei einer geradlinigen Kennlinie ergibt sich für jeden Punkt der gleiche Wert. Bei der gekrümmten Kennlinie der Diode sind die Werte verschieden. In den Schnittpunkten A, B u. C zwischen den Geraden und der Kurve (Bild 104/3, rechts) stimmt der Widerstand der Diode jeweils mit dem Widerstand eines der metallischen Leiter überein. Für die Punkte B und C ist es derselbe Leiter; dennoch stimmen die Gerade b und die Kennlinie der Diode auch in diesem Bereich nicht in ihrem Verlauf überein.
Die Kennlinie der Röhre verläuft in der Nähe des Punktes B annähernd geradlinig. Diese Gerade geht jedoch nicht durch den Nullpunkt. ① ② ③ ④



104/2 Darstellung des Spannungsverlaufs am ohmschen Widerstand auf dem Schirm des Oszillografen





104/3 links: Besonders stark gekrümmte Kennlinie, wie sie z. B. bei einer Röhrendiode vorkommen kann. Es wird nur die Durchlaßrichtung betrachtet.
rechts: Die gleiche Kennlinie wie in Bild links mit zusätzlich eingetragenen Kennlinien a, b metallischer Widerstände bei ϑ = konstant.

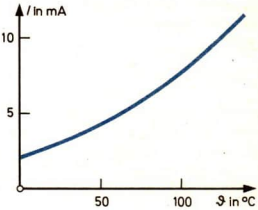
Diese Aussagen lassen sich verallgemeinern:
Ein Bauelement mit nichtlinearem *I-U*-Zusammenhang läßt sich nicht durch Angabe eines einzigen Widerstandswertes charakterisieren. Jeder aus einzelnen Wertepaaren *I*, *U* berechnete Widerstandswert kennzeichnet lediglich einen bestimmten Betriebszustand, aber nicht das Bauelement als Ganzes. Dessen Beschreibung erfolgt durch die Kennlinie, die aus zahlreichen Wertepaaren hervorgeht.
Diese Einschränkung gilt auch dann, wenn die Kennlinie geradlinige Abschnitte enthält.

Ähnliche Probleme ergeben sich bei der Bestimmung der elektrischen Leistung, die in einem solchen Bauelement umgesetzt wird. Auch sie gilt jeweils nur für einen bestimmten Betriebszustand. Oft wird die maximal zulässige Leistung vorgegeben, die nicht überschritten werden darf. Dann ist auf der *I-U*-Kennlinie der Punkt zu suchen, für den dieser Wert zutrifft. ⑤

Steuerbare elektronische Bauelemente 49

In den bisher betrachteten Beispielen zu elektrischen Leitungsvorgängen wurde die Stromstärke in einer gegebenen Schaltung wesentlich durch die angelegte Spannung bestimmt; insbesondere konnte eine Beeinflussung nur über eine Spannungsänderung erfolgen. Die einzige Ausnahme bildete der Stromkreis mit einem stellbaren Widerstand (↗ S. 87). Für die Lösung zahlreicher Probleme ist es wichtig, weitere Möglichkeiten der Beeinflussung von Leitungsvorgängen bei konstanter Betriebsspannung zu finden.
Einfache Möglichkeiten für solche Steuerungen ergeben sich durch Ausnutzung der Temperaturabhängigkeit mancher Widerstände (↗ S. 101). Bisher war die Temperaturänderung durch Eigenerwärmung infolge der Erhöhung der Spannung hervorgerufen worden.
Jetzt werden die Bedingungen verändert und neue Zusammenhänge experimentell untersucht, und zwar zunächst am **Thermistor**.

▼ Ein Thermistor wird an eine konstante Betriebsspannung geschaltet. Diese wird so niedrig gewählt, daß die Eigenerwärmung des Bauelements vernachlässigbar gering bleibt. Dann wird die Temperatur des Thermistors durch äußere Einflüsse systematisch verändert. Temperatur und Stromstärke werden gemessen. Die *I-ϑ*-Beziehung wird grafisch dargestellt.



105/1 *I-ϑ*-Diagramm eines Thermistors

① Beschreiben Sie die Kennlinienbereiche unterschiedlichen Verlaufs!
② Erläutern Sie den Begriff Sättigung!
③ Berechnen Sie die Widerstände für die Punkte A bis C der Kennlinie in Bild 104/3!
④ Überlegen Sie anhand des allgemeinen Leitungsmodells, ob jede *I-U*-Kennlinie durch den Ursprung des Koordinatensystems gehen muß!
⑤ Berechnen Sie anhand von Bild 104/3 die für den Punkt C zutreffende Leistung!

Das Diagramm (Bild 105/1) liefert eine *Steuerkennlinie.*

Aus dem Experiment geht hervor, daß ein Thermistor als Meßfühler für ein elektronisches Thermometer verwendbar ist. Der erarbeitete Graph stellt die *Eichkurve* dar. Der Differenzenquotient $\Delta I/\Delta\vartheta$ charakterisiert ein solches Thermometer innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches; er wird als Empfindlichkeit bezeichnet.
Das Meßprinzip ist sehr einfach. Um große Empfindlichkeit und gute Reproduzierbarkeit zu erhalten, müssen der Thermistor, die Spannungsquelle und das Meßgerät sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

Röhrentrioden

50

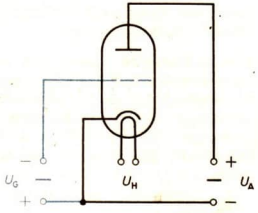
Elektronenröhren sind ein Beispiel für Leitungsvorgänge im Vakuum. Die wanderungsfähigen Ladungsträger werden aus der geheizten Katode emittiert.
Der Heizstromkreis stellt zwar eine unerläßliche Voraussetzung für die Funktion einer Röhrenschaltung dar, ist aber für die spezielle Aufgabenstellung ohne Bedeutung. Er wird deshalb in Schaltbildern oft weggelassen.
Die meisten Anwendungsfälle der Trioden (Bild 106/2) sind dadurch gekennzeichnet, daß bei konstanter Anodenspannung die Anodenstromstärke durch Änderungen der Gitterspannung gesteuert wird.
Die Stromstärke im Anodenstromkreis wird hauptsächlich durch die elektrische Feldstärke in der Röhre zwischen Katode und Gitter bestimmt.

Das elektrische Feld setzt sich in diesem Bereich aus zwei Anteilen zusammen:

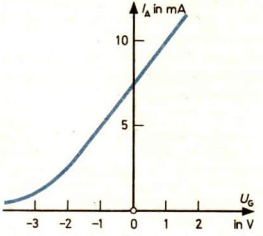
- Feld Katode$^-$ – Anode$^+$ und
- Feld Katode$^+$ – Gitter$^-$.

Aus den Konstruktionsdaten der Röhre (Bild 106/1) folgt unter Berücksichtigung der Gleichung für die elektrische Feldstärke ($E = U/s$), daß bereits eine kleine Änderung der Gitterspannung zu einer relativ großen Änderung der Feldstärke in Katodennähe führt. ①

Daraus folgt, daß der Einfluß der Gitterspannung auf den Anodenstrom größer ist als der Einfluß der Anodenspannung auf diesen. Die Gitterspannung ist deshalb gut als Steuerspannung geeignet; es tritt eine Verstärkerwirkung auf (↗ Transistor).
Die Eigenschaften einer Röhrentriode werden durch Kennlinien erfaßt; besonders übersichtlich ist die I_A-U_G-Steuerkennlinie (Bild 106/2). ② ③ ④

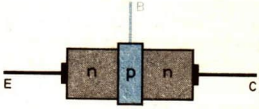


106/1 Prinzipschaltbild einer Röhrentriode
Bezugselektrode ist die Katode
Der Abstand Katode – Anode beträgt mehrere Millimeter, der Abstand Katode – Gitter etwa 0,1 mm. Die Anodenspannung liegt meist bei + 50 V ... + 200 V, die Gitterspannung bei −0,5 V ... −10 V.
Die Heizspannung bei Röhren ist genormt. Meist kann Wechselspannung verwendet werden. Für viele Typen gilt $U_H = 6{,}3$ V.



106/2 I_A-U_G-Steuerkennlinie einer Röhrentriode; U_A = konstant
Der Anstieg der I_A-U_G-Kennlinie wird als Steilheit $S = \Delta I_A/\Delta U_G$ bezeichnet. Für den geradlinigen Teil der Kennlinie ist sie eine Konstante und stellt eine technisch wichtige Röhrenkenngröße dar.

Der Transistor stellt ein weiteres Beispiel für steuerbare Bauelemente dar; es gibt sehr unterschiedliche Ausführungen. Die häufigste ist der npn-Silizium-Transistor (Bild 107/1). Er besteht im Prinzip aus einem Silizium-Einkristall, der durch Dotierung in 3 Zonen vom Leitfähigkeitstyp n, p, n geteilt wird. Der Übergang zwischen ihnen wird durch Grenzschichten gebildet, wie sie auch bei den Halbleiterdioden vorhanden sind.

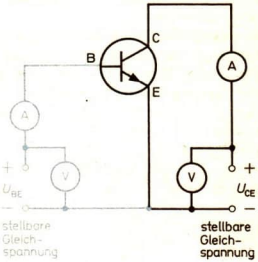


107/1 Aufbau eines npn-Siliziumtransistors.
E – Emitter
B – Basis
C – Kollektor

Bei Spannungsangaben werden die beiden Elektroden genannt, zwischen denen die Spannung gemessen wird; bei Stromstärkeangaben die Elektrode, in deren Zuleitung der Strommesser geschaltet ist (siehe auch Bild 107/2). In den meisten Schaltungen dient der Emitter als Bezugselektrode für alle Angaben (wie bei der Triode die Katode).
Wie bei der Röhrentriode werden dem Transistor zwei voneinander unabhängige Gleichspannungen zugeführt. Jede wird an einer der beiden Grenzschichten im Transistor wirksam. Für alle Transistorschaltungen gilt:

- Die Grenzschicht BE wird in Durchlaßrichtung,
- die Grenzschicht CB wird in Sperrichtung betrieben.

Die Spannung U_{BE} sei zunächst Null. Dann fließt kein Basisstrom. Die Spannung U_{CE} möge +10 V betragen. Wegen der Sperrichtung für die Grenzschicht CB fließt auch kein Kollektorstrom; es fehlt an wanderungsfähigen Ladungsträgern im Bereich dieser Grenzschicht.
Wenn die Spannung in Durchlaßrichtung einen ausreichend großen Betrag aufweist ($U_{BE} > +0{,}7$ V), fließt ein Basisstrom durch die Grenzschicht BE. Wegen der außerordentlich dünnen mittleren Zone liegen die beiden Grenzschichten dicht beieinander. Es gelangen Ladungsträger aus der stromdurchflossenen BE-Grenzschicht in die gesperrte CB-Grenzschicht. Dadurch fließt dort trotz dieser Polung ebenfalls ein Strom.
Die Kollektorstromstärke I_C wächst mit wachsender Basisstromstärke I_B, da dann die Konzentration der Ladungsträger in der Basiszone einschließlich der BC-Grenzschicht zunimmt: Bei konstanter Kollektorspannung läßt sich die Kollektorstromstärke durch Änderungen der Basisstromstärke steuern.
Damit ist das Zusammenwirken der Bestandteile des Transistors mit Hilfe des allgemeinen Leitungsmodells prinzipiell erklärt. Über die Einzelheiten der Zusammenhänge muß das Experiment (Bild 107/2) Auskunft geben.

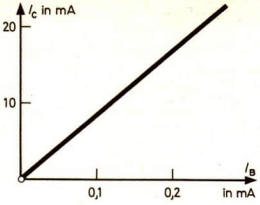


107/2 Grundschaltung eines Si-Transistors (Emitterschaltung) zur Aufnahme von Kennlinien
Zur Kennlinienaufnahme wird die Spannung U_{CE} zunächst konstant gehalten und U_{BE} systematisch verändert. Beide Spannungen sowie die Stromstärken I_B und I_C werden gemessen.
Danach wird U_{BE} konstant gehalten und U_{CE} verändert. Beide Spannungen sowie I_C werden gemessen.

---

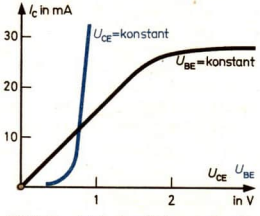
① Wiederholen Sie die Möglichkeiten zur Berechnung der elektrischen Feldstärke!
② Unter welchen Bedingungen fließt in der Röhrentriode ein Gitterstrom?
③ Welche Forderung ist bei der Aufnahme einer I_A-U_G-Kennlinie an U_A zu stellen?
④ Berechnen Sie die Steilheit der in Bild 106/2 beschriebenen Röhrentriode für den geradlinigen Teil der Kennlinie aus den Daten des Diagramms!

Zunächst wird die Beziehung zwischen I_B und I_C ausgewertet, da sie unmittelbar den Steuerungsprozeß im Transistor kennzeichnet (Bild 108/1):
Es zeigt sich eine starke Beeinflussung der Kollektorstromstärke I_C durch die Basisstromstärke I_B. Der Zusammenhang ist weitgehend linear. Der Anstieg der Kennlinie drückt aus, in welchem Verhältnis die Stromstärkeänderungen zueinander stehen ($\Delta I_C/\Delta I_B$). Dieses Verhältnis wird **Stromverstärkung** genannt; es ist eine für die Charakterisierung des Transistors wichtige Größe. Im Beispiel beträgt sie etwa 100.



108/1 I_C-I_B-Steuerkennlinie eines Siliziumtransistors (U_{CE} = konstant)

Der Begriff **Verstärkung** ist gerechtfertigt, da gleichartige Größen (hier: Stromstärken) verglichen werden. Bei der Triode wird die Verstärkung durch einen Spannungsvergleich ausgedrückt: Die Anodenstromstärke wird durch die Gitterspannung stärker beeinflußt als durch die Anodenspannung.
Beim Transistor kann ebenfalls ein Spannungsvergleich vorgenommen werden. Aus dem zweiten Teil der nach Bild 107/2 durchgeführten Messungen ergibt sich die Darstellung in Bild 108/2.
Die allgemeinste Aussage über die Verstärkerwirkung wird erreicht, wenn der Vergleich auf die Leistungen bezogen wird. Dann gilt:
In einem Verstärker ist die Leistung des gesteuerten Prozesses größer als die Steuerleistung.
Aus dieser Sicht können Schaltvorgänge als Sonderfall der Verstärkung betrachtet werden. ① ② ③

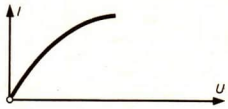
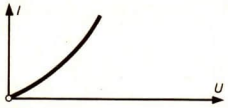
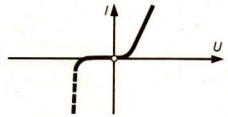
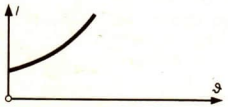
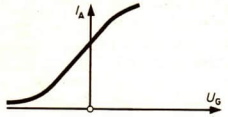
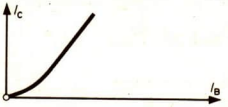


108/2 Vergleich des Einflusses der Basisspannung U_{BE} und der Kollektorspannung U_{CE} auf die Kollektorstromstärke I_C. Es wird nur der prinzipielle Verlauf der Kennlinien angegeben. Trotzdem ergibt sich deutlich:
Die Kollektorstromstärke wird durch die Basisspannung stärker beeinflußt als durch die Kollektorspannung.

Zusammenfassung 52

Wenn bei elektrischen Leitungsvorgängen die Konzentration oder Beweglichkeit der wanderungsfähigen Ladungsträger verändert werden kann, dann läßt sich die Stromstärke auch bei konstanter Betriebsspannung steuern. In vielen Fällen ergeben sich Verstärkerwirkungen (Röhrentriode, Transistor); die Leistung des gesteuerten Prozesses ist dann größer als die Steuerleistung.
Das technisch bedeutsamste Bauelement hierzu ist gegenwärtig der Transistor mit seinen Weiterentwicklungen.
Steuerungsprozesse werden durch Steuerkennlinien beschrieben. Aus diesen lassen sich Kenngrößen der steuerungsfähigen Bauelemente ableiten. Außerdem sind die zulässigen Grenzdaten zu beachten.
Es ist wichtig, *I-U*-Kennlinien von Steuerkennlinien zu unterscheiden. Die nachfolgende Übersicht soll das unterstützen.

Übersicht über Kennlinien und Kenngrößen elektronischer Bauelemente

Eigenschaften / Bauelement	prinzipieller Kennlinienverlauf	Beispiele für wichtige Kenngrößen bzw. Grenzdaten	
Glühlampe		Nennspannung Nennleistung	*I-U*-Kennlinien
Thermistor		Kaltwiderstand, maximale Leistung	
Halbleiterdiode		maximale Sperrspannung, maximale Durchlaßstromstärke	
Thermistor (als Thermometer)		Empfindlichkeit	Steuerkennlinien
Triode		Steilheit, maximale Leistung	
Transistor		Stromverstärkung, maximale Sperrspannung U_{CE}, maximale Leistung	

① Kennzeichnen Sie die genannten Abhängigkeiten beim Transistor als *I-U-* bzw. Steuerkennlinien!
② Analysieren Sie Bild 107/2 hinsichtlich der strom- bzw. spannungsrichtigen Schaltung von Meßgeräten!
③ Überlegen Sie, wie das Parklicht eines PKW mit Hilfe eines Transistors in Abhängigkeit von der Tageszeit automatisch ein- und ausgeschaltet werden kann, wenn ein Bauelement (Fotowiderstand) zur Verfügung steht, dessen Widerstand sich bei Beleuchtung ändert!

Überlagerung und Trennung von Gleich- und Wechselströmen. Bei fast allen Beispielen der Anwendung elektronischer Bauelemente treten innerhalb eines Stromkreises sowohl Gleich- als auch Wechselströme auf. Für das Verständnis betriebsfähiger Schaltungen ist es notwendig, die wichtigsten Möglichkeiten der Überlagerung und Trennung von Gleich- und Wechselspannungen zu kennen. Als Beispiel sei ein akustischer Vorgang, z. B. ein reiner Ton, betrachtet. Er soll durch ein Mikrofon in einen analogen elektrischen Vorgang umgewandelt werden (Bild 110/1a).

In der Zeitspanne t_1; t_2 läßt sich die Kurve als Summe zweier Teilprozesse deuten. Es überlagern sich

- ein konstanter Gleichstrom $I_{_}$ und
- ein konstanter Wechselstrom $I_{\sim}$ (Bild 110/1b).

Nur der zweite Teilprozeß stellt das elektrische Analogon zum Ton dar. Der Wechselstrom wird zum Signal.

Das Bild 110/2 zeigt einen Ausschnitt aus einer Signalübertragung, wobei eine Halbleiterdiode als Schalter dient. Der Signalweg ist für Wechselstrom, der Schaltweg für Gleichstrom auszulegen. Innerhalb des getönten Bereichs überlagern sich beide Wege. Außerhalb wird angestrebt:

Im Signalweg soll kein Gleichstrom auftreten.

Im Schaltweg soll kein Wechselstrom auftreten.

Die Trennung der beiden Wege erfolgt hier hauptsächlich durch die beiden Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1 und C_2. Die erstgenannte Forderung wird vollständig, die zweite nur näherungsweise erfüllt. Das geschieht um so besser, je größer die Widerstände R_1 und R_2 sind.

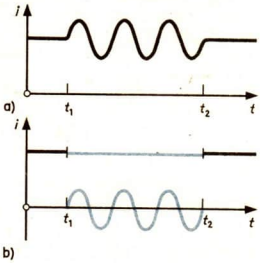
Gleichrichtung einer Wechselspannung und Glättung der pulsierenden Gleichspannung. Diese Aufgabe kommt sehr häufig vor. Viele Geräte benötigen für ihren Betrieb eine konstante Gleichspannung, sollen aber an das Wechselstromnetz angeschlossen werden.

In der Schaltung gemäß Bild 104/1 ergab sich eine pulsierende Gleichspannung, die als Überlagerung einer konstanten Gleichspannung und einer (nicht sinusförmigen) Wechselspannung angesehen werden kann.

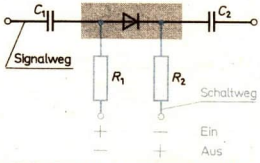
Eine Glättung kann mit Hilfe der Schaltung nach Bild 110/3 erfolgen.

Die Erklärung der Wirkungsweise kann auf verschiedene Weise erfolgen:

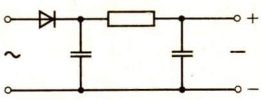
- Durch Anwendung des allgemeinen Leitungsmodells; besondere Beachtung wird der Auf- und Entladung der beiden Kondensatoren gewidmet.
- Durch phänomenologische Betrachtungsweise; die Kondensatoren stellen frequenzabhängige Widerstände dar, die dem zu betreibenden Gerät parallel geschaltet sind.



110/1 Zeitverlauf der Stromstärke in einem Mikrofon. Zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 erklingt ein reiner Ton.
Durch das eingeschaltete Mikrofon fließt zunächst ein konstanter Gleichstrom. Beim Erklingen des Tones ändert sich periodisch seine Stromstärke.



110/2 Ausschnitt aus einer Signalübertragung mit einer Halbleiterdiode als Schalter für die Signalspannung.
Der Diodenwiderstand ist je nach der Polung der Schaltspannung sehr klein oder sehr groß. Die Signalspannung muß kleiner als die Schaltspannung sein.



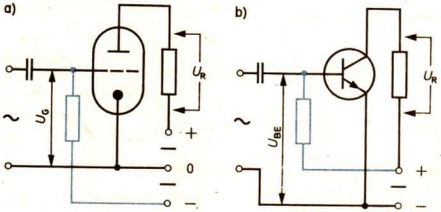
110/3 Schaltung zur Gleichrichtung und Glättung

Signalverstärkung. An einem Ort A möge eine *Information* zur Verfügung stehen (Sprache, Musik, Bild o. ä.), deren wesentliche Merkmale in elektrische *Signale* umgesetzt werden. Diese sind Träger der Information. Sie können zu einem Ort B übertragen werden, wo sie mit meist nur sehr kleiner Leistung zur Verfügung stehen. Diese reicht jedoch aus, am Ort B eine Energieumwandlung zu steuern, die von einer dort befindlichen Energiequelle gespeist wird. Dieser Prozeß findet in einem elektronischen Verstärker statt. An seinem Ausgang stehen die ursprünglichen Signale mit großer Leistung zur Verfügung; die Information kann zurückgewonnen werden.

Auch bei diesem Anwendungsbeispiel treten zahlreiche Überlagerungen von Gleich- und Wechselvorgängen auf. Sie werden zunächst an der Schaltung einer Röhrentriode und eines Siliziumtransistors (Bild 111/1) prinzipiell erläutert, ohne daß alle für die Betriebsfähigkeit der Schaltung notwendigen Einzelheiten angegeben sind.

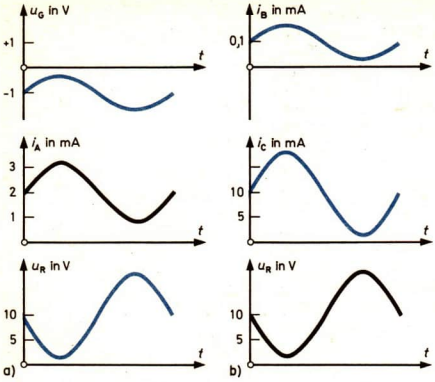
Gegeben sei eine Signalspannung (Tonspannung), die aus einem Mikrofon stammt und dem Gitter einer Röhrentriode bzw. der Basis eines Transistors zugeführt wird. Ihr Effektivwert soll in beiden Fällen $U_{Ton} = 0{,}5$ V betragen. Die daraus folgende Stromstärke ist am Gitter der Triode sehr klein und interessiert nicht weiter. Die am Transistor von der Tonspannung hervorgerufene Basisstromstärke ist dagegen wichtig; sie soll $I_{Ton} = 0{,}05$ mA betragen.

Um für die Bauelemente günstige Betriebsbedingungen zu schaffen, ist bei der Triode bereits vor Anlegen der Tonspannung eine konstante Gittergleichspannung (z. B. $U_G = -1$ V, bezogen auf Katode) notwendig und beim Transistor eine konstante Basisstromstärke (z. B. $I_B = 0{,}1$ mA). Die Bauelemente zur Gewährleistung dieser Daten sind in Bild 111/1 farbig eingezeichnet.



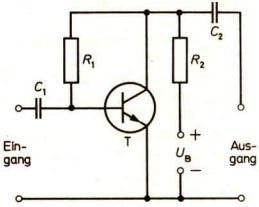
111/1 Prinzipielle Schaltung einer Röhrentriode und eines Transistors als Verstärker

Bild 112/1 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Gleich- und Wechselstromgrößen in ihrer Überlagerung für die Triode und für den Transistor. Jeweils übereinander sind die Vorgänge am Eingang (Gitter- bzw. Basiskreis) und am Ausgang (Anoden- bzw. Kollektorkreis) der Bauelemente dargestellt. Der Vergleich der farbigen Kurven zeigt die Verstärkerwirkung.



112/1 Gleich- und Wechselstromgrößen in ihrer Überlagerung für die Triode a) und für den Transistor b).
Um die Änderungstendenzen besser zu erfassen, wird hier U_R als Spannung der Anode bzw. des Kollektors gegen den allgemeinen Bezugspunkt Katode bzw. Emitter dargestellt.

In Bild 112/2 ist eine zwar einfache, aber betriebsfähige Verstärkerschaltung dargestellt. Bei höheren Ansprüchen werden die Verstärker mehrstufig aufgebaut.



112/2 Schaltbild eines einfachen, einstufigen Transistorverstärkers, geeignete Werte:
T: SC 239 $C_1 = C_2 = 33$ nF; 60 V
$U_{BE} = 3 \ldots 12$ V
$R_1 = 330$ kΩ; 0,1 W
$R_2 = 2{,}2$ kΩ; 0,25 W

Schwingungserzeugung. Ein elektrischer Schwingkreis vermag gedämpfte elektrische Schwingungen auszuführen. Ihre Frequenz wird durch L und C bestimmt und läßt sich nach der Gleichung

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \qquad (145)$$

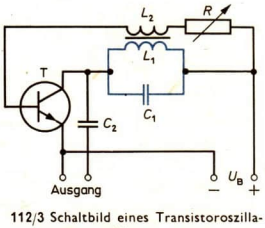
berechnen.

Bei Energiezufuhr können die Schwingungen ungedämpft verlaufen.

Voraussetzungen sind:
- Die Energiezufuhr muß periodisch erfolgen, und zwar mit der Frequenz des Schwingkreises.
- Die Energie muß dem Schwingkreis jeweils in der richtigen Phase zugeführt werden.

Diese Bedingungen können nur dann auf einfache Weise erfüllt werden, wenn der Schwingkreis selbst zur Steuerung der Energiezufuhr herangezogen wird. Dieses Wirkungsprinzip wird als *Rückkopplung* bezeichnet (Bild 112/3).

Die richtige Frequenz ist damit zwangsläufig festgelegt. Die richtige Phase wird durch die Einzelheiten der Schaltung erreicht. Eine theoretische Vorhersage ist schwierig; man greift auf bewährte Schaltungen zurück und hilft sich auch durch Probieren. Häufig führt bereits das probeweise Umpolen der Rückkopplungsspule zum Ziel.



112/3 Schaltbild eines Transistoroszillators, geeignete Werte:
T: SC 239 $C_1 = 0{,}47$ µF; 60 V
Sp1: 1000 Wdg $C_2 = 33$ nF; 60 V
Sp2: 500 Wdg $R \geqq 100$ kΩ; 0,1 W
$U_{BE} = 3 \ldots 12$ V

SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE

Drei Flugzeuge fliegen in einem Verband 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. Innerhalb der Flugzeuge ist von der hohen Geschwindigkeit nichts zu spüren.

Physikalisch gesehen entsteht die Frage, ob es auch möglich ist, innerhalb eines solchen geschlossenen Systems, wie es ein Flugzeug darstellt, ohne Bezug zur Umgebung dessen Bewegungszustand messen zu können. Die Erfahrung lehrt, mit mechanischen und optischen Experimenten und Meßverfahren ist das nicht möglich. Bei allen Erklärungsversuchen treten neue Widersprüche auf. Weil das auch bei anderen physikalischen Erscheinungen so war, sprach man um 1900 von einer Krise der Physik, mit der sich Lenin in seinem philosophischen Werk „Materialismus und Empiriokritizismus" auseinandersetzte.

Albert Einstein zeigte 1905, daß sich die Widersprüche lösen lassen. Er geht in der speziellen Relativitätstheorie von dem Prinzip aus, daß die Lichtgeschwindigkeit konstant und vom Bewegungszustand des Systems unabhängig ist.

Relativität von Zeit und Länge

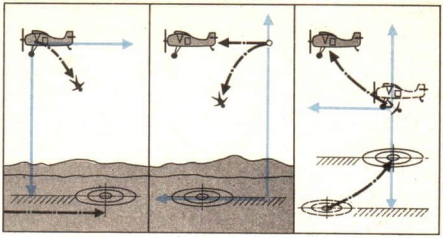
Beim Fallschirmspringen, beim Absetzen von Luftlandetruppen oder beim Abwerfen von Versorgungsgütern aus Flugzeugen treten einander überlagernde Bewegungsvorgänge auf.

Wenn ein Fallschirmspringer aus dem Flugzeug springt, dann sehen der Pilot im Flugzeug, der Wettkampfsprungrichter auf dem Boden und der Springer in der Luft ganz verschiedene Bewegungsabläufe, obwohl es sich einwandfrei um ein und denselben Vorgang handelt (Bild 115/1).
Diese Beobachtungen finden durch das klassische Gesetz von der Addition der Geschwindigkeiten ihre Erklärung.
Daß diese Gesetzmäßigkeit nicht ausreicht und anders formuliert werden muß, wenn sich Objekte mit sehr großer Geschwindigkeit bewegen, soll in diesem Stoffgebiet erläutert und begründet werden. Dazu werden Gedankenexperimente betrachtet, bei denen Züge fast mit Lichtgeschwindigkeit fahren.

Klassische Addition der Geschwindigkeiten 54

Will man die Geschwindigkeit eines Körpers bestimmen, so muß man Ortsmessungen und Zeitmessungen vornehmen.
Dazu benötigt man ein materielles **Bezugssystem**. Als solches kann die Erde, ein Teil der Erdoberfläche, ein Körper oder ein System von Körpern benutzt werden (Bild 115/2).
Zur Festlegung von Anfangspunkten und Richtungen verbindet man mit dem materiellen Bezugssystem ein **Koordinatensystem**. Es ist eine gedankliche Konstruktion.
So sind in Bild 115/1 Flugzeug, Fallschirmspringer und Zielmarke auf der Erde materielle Bezugssysteme, mit denen Koordinatensysteme verbunden sind. ①

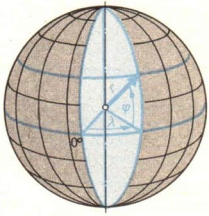
Ortsmessungen im Bezugssystem werden durch das Koordinatensystem und die Einheiten der Länge bzw. des Winkels möglich. Um Geschwindigkeiten zu bestimmen, ist auch eine **Zeitmessung** erforderlich. Dazu benutzt man Vorrichtungen (Uhren), in denen konstant ablaufende physikalische



115/1 Die auf Seite 114 beschriebenen drei Möglichkeiten zeigen die Abhängigkeit der Bahndarstellung vom Beobachtungspunkt, der stets auch der Nullpunkt des Koordinatensystems ist.

Prozesse die Zeitanzeige steuern. Das können periodische Vorgänge sein; aber auch der Ablauf des Zerfalls von Elementarteilchen oder die Laufzeit von Lichtsignalen sind geeignet. ②

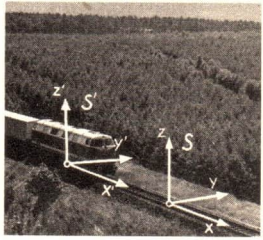
115/2 Erde mit Kugelkoordinaten
Mit den Koordinaten λ, φ und r kann man alle möglichen Punkte eines Raumes bestimmen. In der Geographie interessieren nur die Winkel, die als Längen und Breiten angegeben werden.



► **Ein Bezugssystem ist eine starre Anordnung materieller Körper zusammen mit einer Uhr.**
In Verbindung mit einem Koordinatensystem und den Einheiten werden Ort und Zeit meßbar.

In der speziellen Relativitätstheorie untersucht man die Bezugssysteme, die sich zueinander mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Als Beispiele, die auch für spätere Betrachtungen herangezogen werden sollen, dienen (Bild 115/3) der Bahndamm und ein Zug.
Bewegt sich in einem fahrenden Zug ein Reisender, so kann vom Bahndamm aus die Addition der Geschwindigkeiten des Zuges und des Reisenden festgestellt werden. Dieses klassische Additionsgesetz für Geschwindigkeiten läßt sich aus dem Zusammenhang zwischen den Koordinaten eines Punktes im System S und S′ herleiten. Die Transformationsbeziehung entnimmt man aus Bild 116/1.

$$x = x' + u \cdot t \qquad (u = \text{konstant}) \qquad (146)$$
$$y = y' \qquad z = z' \qquad t = t'$$



115/3 Der Bahndamm ist das System S. Der Zug ist das System S′, das sich gegenüber dem System S mit der konstanten Geschwindigkeit u bewegt.

Die Gleichheit von t und t' scheint selbstverständlich, und es gab bis zur Jahrhundertwende keinen Anlaß, daran zu zweifeln. Durch Differenzieren von (146) nach der Zeit t erhält man das klassische Additionsgesetz für Geschwindigkeiten. ③

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + u \quad \text{oder} \quad v = v' + u \qquad (147)$$

Man kann sich vorstellen, daß P in Bild 116/1 ein Fahrgast ist, der sich mit einer Geschwindigkeit v' in bezug auf S′ be-

---

① Erläutern Sie Beispiele für Bezugs- und Koordinatensysteme aus der Praxis und Wissenschaft (z. B. Technik, Astronomie usw.)!
② Nennen Sie Systeme oder Vorgänge, die zur Zeitmessung benutzt werden können!
③ Wiederholen Sie die Definition der Momentangröße der Geschwindigkeit, und differenzieren Sie die Bewegungsgesetze für die gleichförmige Bewegung nach der Zeit!

wegt. Ein Beobachter in S stellt die Geschwindigkeit v fest. Das zeigt, daß Geschwindigkeiten relativ sind. ①

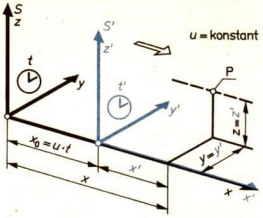
Differenziert man die Gleichung (147) nach der Zeit t, so erhält man die Aussage, daß Beschleunigungen in beiden Systemen gleich gemessen werden.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv'}{dt} \quad \text{oder} \quad a = a' \quad \left(u = \text{konstant}, \quad \frac{du}{dt} = 0\right)$$

Wegen $F = m \cdot a$ werden auch für beide Systeme die auf einen Körper wirkenden Kräfte als gleich groß gemessen. Das gilt besonders auch für den Fall $F = F' = 0$. Dann ruht der Körper oder bewegt sich gleichförmig entsprechend dem Trägheitsgesetz.
Man findet das bestätigt, wenn man Beobachtungen im Abteil eines stehenden Zuges mit Beobachtungen im gleichförmig bewegten Abteil vergleicht (Bild 116/2).

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

Man bezeichnet solche Systeme als Inertialsysteme[1]), weil in ihnen das Trägheitsgesetz gültig ist.
Mit mechanischen Messungen innerhalb eines Zuges oder Flugzeuges kann man nicht feststellen, ob sich Zug oder Flugzeug in Ruhe oder in geradliniger, gleichförmiger Bewegung befinden.
Das bedeutet, daß alle gegenüber einem Inertialsystem geradlinig gleichförmig bewegten Bezugssysteme auch Inertialsysteme sind und daß man nur die relativen Bewegungen der Bezugssysteme gegeneinander feststellen kann.



116/1 Darstellung der beiden Koordinatensysteme. Der Körper P soll nur Bewegungen parallel zur x-Achse ausführen.
Für Herleitungen sollen im Augenblick des Zusammenfallens beider Nullpunkte, $0 = 0'$, beide Uhren die Zeit $t = t' = 0$ zeigen.

Das Michelson-Experiment 55

Die Physiker meinten bis in das 20. Jahrhundert hinein, daß der Weltraum ein absolut ruhendes Inertialsystem sei. Da eine Entscheidung hierüber mit mechanischen Mitteln als unmöglich erkannt wurde, sollte die Ausbreitung des Lichtes herangezogen werden. Licht breitet sich mit der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c nach allen Seiten gleichmäßig aus. Dann müßte nach dem klassischen Additionsgesetz für Geschwindigkeiten ein Beobachter, der sich mit der Geschwindigkeit u auf die Lichtquelle zubewegt, eine Lichtgeschwindigkeit $c + u$ messen.
Um das zu prüfen, führte Michelson 1881 in Potsdam eine solche Messung durch. Dabei benutzte er die Erde mit ihrer Geschwindigkeit $u = 30\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ auf der Bahn um die Sonne als bewegtes System. Mit seiner Apparatur wollte er den er-

116/2 Abteil in einem stehenden Zug, also in S ruhend. Der Reisende wirft einen Ball vertikal nach oben.
darunter:
Abteil in einem Zug mit konstanter Geschwindigkeit u.

[1]) inertia (lat.) – Trägheit

warteten Unterschied in der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes zwischen c und $c + u$ messen. Damit wäre der Weltraum als das ruhende Inertialsystem nachgewiesen worden. ②

In der Versuchsanordnung von Michelson (Bild 117/1) trifft monochromatisches Licht von (1) kommend auf eine halbdurchlässige Platte (2), so daß ein Teil des Lichtes zum Spiegel (4) gelangt und der andere Teil zum Spiegel (5) reflektiert wird. Von den Spiegeln kommt das Licht zurück zur Platte (2). Dort ergeben sich Interferenzstreifen, die in (3) beobachtet oder fotografiert werden können.

Die Apparatur (Bild 117/1 bzw. 117/2) wird zuerst so ausgerichtet, daß die Strecke $\overline{AB}$ in die Richtung der Erdbahn fällt. Wegen der Bewegung der Erde mit der Geschwindigkeit u benötigt das Licht für den Hin- und Rückweg auf der Strecke $\overline{AB}$ mehr Zeit als auf der Strecke $\overline{AC}$. Dreht man die Apparatur um 90°, bis Strecke $\overline{AC}$ in die Richtung der Erdbahn fällt, so erwartet man eine Veränderung der Laufzeitunterschiede des Lichtes auf den Strecken $\overline{AB}$ und $\overline{AC}$ und dadurch eine Verschiebung der Interferenzstreifen (Bild 117/3).

Die berechnete Verschiebung der Interferenzstreifen trat zur Überraschung der Physiker nicht ein. Die Messung ergab also keinen Unterschied in der Lichtgeschwindigkeit.

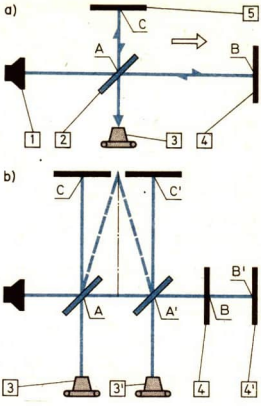
Mit diesem Versuchsergebnis ist erwiesen, daß das klassische Gesetz für die Addition der Geschwindigkeiten nicht allgemein gültig ist, und daß man kein absolut ruhendes Inertialsystem feststellen kann. Als neue experimentell gewonnene Erfahrung ergibt sich die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** in allen Inertialsystemen. Es gibt auch keine Lichtausbreitung, keine Übertragung von Energie in Form von Signalen und keine Bewegung von Körpern mit Geschwindigkeiten größer als c.

> ☛ **Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist in allen Inertialsystemen unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters stets gleich.**
> **Sie ist eine Grenzgeschwindigkeit für die Energieübertragung und für die Bewegung von Körpern.**

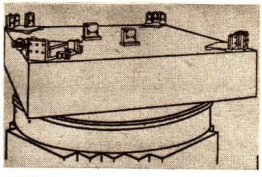
Nach neuesten Messungen beträgt

$c = (299\,792\,456{,}2 \pm 1{,}1)\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

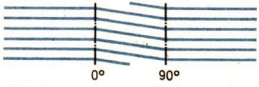
Die Widersprüche zwischen dieser experimentellen Erfahrung und der bisher gültigen Theorie löste Albert Einstein 1905 mit der speziellen Relativitätstheorie, deren wesentliche Erkenntnisse dargelegt werden sollen.



117/1 Schema des Michelson-Experimentes
a) Apparatur
1 – Lichtquelle, 2 – halbdurchlässige Platte, 3 – Fotoapparat, 4 – Spiegel, 5 – Spiegel.
b) Bewegung der Apparatur



117/2 Versuchsanordnung Michelsons. Die optische Anordnung steht auf einem Sandsteinblock, der auf Quecksilber schwimmt.



117/3 Erwartete Verschiebung der Interferenzstreifen während einer Drehung der Apparatur um 90°

---

① Nennen Sie Beispiele aus der Praxis für die Addition von Geschwindigkeiten, und zeigen Sie daran die Relativität der Geschwindigkeit!

② Vergleichen Sie die Bahngeschwindigkeit der Erde mit den kosmischen Geschwindigkeiten!

Die Relativität der Gleichzeitigkeit 56

Physiker und Philosophen waren bis 1905 davon überzeugt, daß es eine absolute, für alle Systeme gleichmäßig ablaufende Zeit gibt. Albert Einstein zeigte mit dem nachfolgend beschriebenen Gedankenexperiment, daß dies nicht so ist. Er zog damit eine entscheidende Konsequenz aus der Erfahrung über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

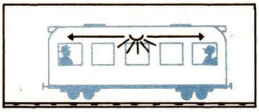
■ Ein Wagen (S′) sei 18 m lang und fahre mit einer Geschwindigkeit von $u = 180000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Im Augenblick des Zusammenfallens der Punkte 0 und 0′ (Bild 118/1) werde zur Zeit $t = t' = 0$ von 0′ aus (Wagenmitte) ein Lichtsignal allseitig ausgesandt.

Die Beobachtung des Lichtsignals im Wagen und vom Bahndamm aus muß zu folgenden Ergebnissen führen:

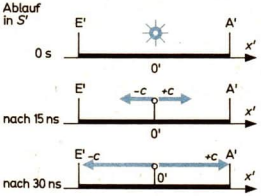
1. Im Wagen S′ stellen die Beobachter mit ihren synchron laufenden Uhren fest, daß das Lichtsignal gleichzeitig nach 30 ns (Nanosekunden) am Wagenanfang A′ und am Wagenende E′ eintrifft (Bild 118/1 und 118/2). Man nennt das Eintreffen eines Signals ein Ereignis.
2. Am Bahndamm S registrieren Beobachter die Geschwindigkeit c des Lichtes und die Geschwindigkeit u des Wagens. Das Wagenende bewegt sich dem Lichtsignal entgegen. Es trifft nach 15 ns in E ein. Der Wagenanfang eilt dem Lichtsignal voraus. Es trifft nach 60 ns in A ein (Bild 118/3 und 118/4). Das Eintreffen des Signals in E und A erfolgt für Beobachter am Bahndamm nicht gleichzeitig. (1)

Aus diesen beiden Beobachtungsergebnissen folgt die **Relativität der Gleichzeitigkeit**:

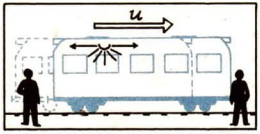
► **Ereignisse, die in einem Inertialsystem gleichzeitig stattfinden, sind in einem anderen relativ dazu bewegten Inertialsystem nicht gleichzeitig.**



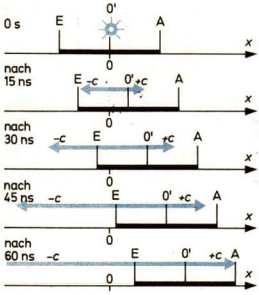
118/1 Beobachtung der Ausbreitung des Lichtes durch Beobachter im Zug



118/2 Ein Lichtstrahl, von 0′ ausgesandt, trifft für Beobachter in S′ gleichzeitig in A′ und E′ ein



118/3 Beobachtung der Ausbreitung des Lichtes durch Beobachter am Bahndamm



118/4

Die Relativität der Zeit- und Längenmessung 57

Die Relativität der Gleichzeitigkeit legt den Schluß nahe, daß es keine absolute, für alle Systeme gleichmäßig ablaufende Zeit gibt. Dann muß eine Gesetzmäßigkeit existieren, die angibt, welcher Zusammenhang zwischen den in den Systemen S′ und S gemessenen Zeiten t' und t besteht.
Zu diesem Zweck betrachtet man ein Lichtsignal (Bild 119/1), das im Wagen S′ von einer Lampe an der Decke ausgesendet wird (Punkt A′) und über eine Strecke von 3 m senkrecht nach unten (zum Punkt B′) läuft.
Der Beobachter im Wagen mißt als Laufzeit des Lichtsignals von A nach B′: $t' = 10$ ns.

Am Bahndamm müssen zwei Beobachter an den Punkten B_1 und B_2 mit synchron laufenden Uhren postiert werden (Bild 119/2). Einer registriert den Abgang, der andere die Ankunft des Lichtsignals. Sie stellen fest, daß wegen der Bewegung des Wagens mit der Geschwindigkeit u das Licht den Punkt B_2 in Richtung der Hypotenuse erreicht (Bild 119/2).
Aus den „experimentell" gefundenen Ergebnissen erhält man mit Hilfe des pythagoreischen Satzes und einiger Umformungen

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$ ②

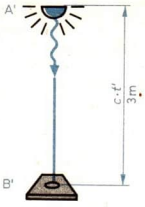
Für den gleichen Vorgang, für den im Wagen 10 ns gemessen wurden, stellen Beobachter in S die Zeit $t = 12{,}5$ ns fest. Man bezeichnet dies als
Zeitdehnung.

► **Bewegt sich das Inertialsystem S′ relativ zum Inertialsystem S, so werden die Zeiten des Systems S′ im System S um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$ größer gemessen.**

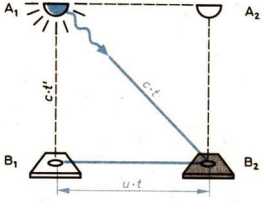
Für die Beobachter in S läuft die Zeit im bewegten System S′ langsamer ab als in S.
Wegen der Gleichberechtigung aller Inertialsysteme erhält man das gleiche Ergebnis, wenn man die Anordnung nach Bild 119/1 in S aufbaut, dort ablaufen läßt und von S′ aus beobachtet. Der Faktor $1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ ist bedeutsam für die spezielle Relativitätstheorie. Er enthält in mathematischer Form die Aussage, daß c eine obere Grenze für Geschwindigkeiten ist, und läßt erkennen, wie sich in Abhängigkeit von u die relativistischen Gleichungen von denen der klassischen Mechanik unterscheiden. ③

Die Zeitdehnung ist durch viele Messungen sehr genau bestätigt worden (Bilder 119/3 und 120/1).

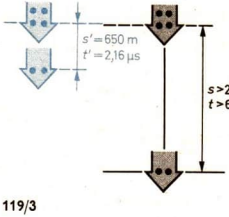
■ Durch energiereiche Teilchen aus der kosmischen Strahlung entstehen in 10 bis 20 km Höhe Myonen. Das sind Elementarteilchen, die dem Elektron ähnlich sind, eine 20mal so große Masse besitzen und zerfallen. Die Halbwertzeit ihres Zerfalls ist in Laboratorien mit 2,16 µs gemessen worden. Die Teilchen bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit. Sie legen im System S′ der bewegten Myonen in 2,16 µs einen Weg von etwa 650 m zurück. Entlang dieser Strecke ist daher die Hälfte der Teilchen zerfallen.



119/1 Das Lichtsignal läuft von A′ nach B′ mit der Geschwindigkeit c.
Für die Strecke $c \cdot t'$ benötigt es die Zeit t'.



119/2 Das Lichtsignal startet zur Zeit $t = 0$ bei A_1. Nach der Zeit t trifft es den Punkt B in der Stellung bei B_2.
Der Punkt B hat die Strecke $u \cdot t$, das Lichtsignal die Strecke $c \cdot t$ zurückgelegt, u sei 180000 km · s^{-1}.
c ist eine Konstante.



119/3

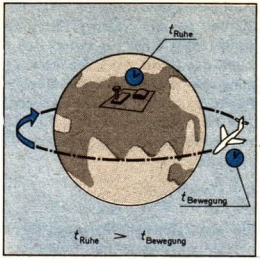
① Wie kann man erreichen, daß die Beobachter in S das Eintreffen des Lichtsignals in A und E gleichzeitig registrieren?
Welche Folgerungen ergeben sich für den Vorgang in S′?

② Leiten Sie aus $(c \cdot t)^2 = (u \cdot t)^2 + (c \cdot t')^2$ die angegebene Gleichung her und rechnen Sie den Wert von t für die angegebene Geschwindigkeit u nach!

③ Untersuchen Sie den Wert des Faktors $1/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ für $u > c$, $u = c$, $u \ll c$!
Rechnen Sie den Wert dieses Faktors aus, wenn u die 1. kosmische Geschwindigkeit ist!

Auf der Erdoberfläche dürften praktisch keine Myonen mehr ankommen. Man mißt in Meereshöhe aber noch mehr als die Hälfte der Intensität, die in 20 km Höhe vorhanden ist. Das läßt sich nur dadurch erklären, daß im System S der Erde erst nach einer Zeit $t = 66\ \mu s$ und mehr als 20 km Flug die Hälfte der Myonen zerfallen ist.

Auch die Ergebnisse von Längenmessungen sind relativ. Wie bei der Zeitmessung machen sich Abweichungen erst bei Geschwindigkeiten bemerkbar, die nicht mehr klein sind gegenüber der Lichtgeschwindigkeit. Auch hier gilt die Gleichwertigkeit beider Systeme, wie Bild 120/2 zeigt.
Zeit- und Längenmessungen von verschiedenen Bezugssystemen aus liefern unterschiedliche, von der Bewegung dieser Systeme zueinander abhängige Ergebnisse. Jedes Ergebnis ist für das jeweilige Bezugssystem real.
Damit wird die von Newton behauptete Existenz einer absoluten Zeit und eines absoluten Raumes durch die spezielle Relativitätstheorie widerlegt.



120/1 Der Zeitvergleich zwischen Atomuhren auf einem Flugplatz und Atomuhren in einem die Erde umfliegenden Flugzeug ergab nach der Erdumrundung den vorausberechneten Zeitunterschied. Die Atomuhren im Flugzeug gingen um $10 \cdot 10^{-12}$ s nach.

► **Raum und Zeit als Existenzformen der Materie sind dialektisch mit der Bewegung als Daseinsweise der Materie verbunden. Eine Änderung der Bewegung zieht eine Änderung von Raum und Zeit nach sich.**

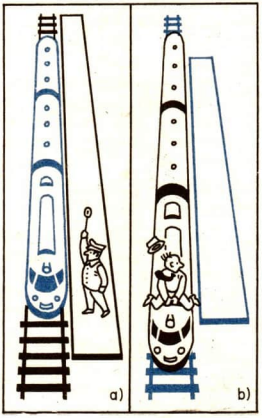
Relativistische Addition der Geschwindigkeiten 58

In der speziellen Relativitätstheorie lautet das Gesetz für die Addition der Geschwindigkeiten:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}} \qquad (148)$$

Berechnet man die Geschwindigkeit v für den Fall $v' = c$ und $u = c$, so erhält man nicht $2c$, sondern nur c in Übereinstimmung mit der Erkenntnis, daß c Grenzgeschwindigkeit ist. Wird v für $v' \ll c$ und $u \ll c$ berechnet, so ergibt sich das klassische Gesetz für die Addition der Geschwindigkeiten als Sonderfall für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind.

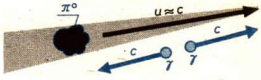
► **Die Erfahrung, daß c Grenzgeschwindigkeit ist, wird durch das relativistische Additionsgesetz der Geschwindigkeiten wiedergegeben.**
Die Gesetze der klassischen Mechanik sind in der umfassenderen speziellen Relativitätstheorie als Sonderfall für kleine Relativgeschwindigkeiten enthalten.



120/2 a) Der Beobachter auf dem Bahnsteig mißt den Zug kürzer als den Bahnsteig. Der ruhende Zug sei genau so lang wie der Bahnsteig.
b) Der Beobachter auf dem Zug mißt den Bahnsteig kürzer als den Zug.

In den meisten Gebieten der Technik ist es zulässig, die Gesetze der klassischen Mechanik anzuwenden. Bei Elementarteilchen, die sich mit großen Geschwindigkeiten bewegen, z. B. in Beschleunigern, muß man relativistisch rechnen. Das relativistische Additionsgesetz ist experimentell bestätigt (Bild 121/1).

■ Elementarteilchen, die π^0-Mesonen, zerfallen in zwei Gammaquanten, die in entgegengesetzte Richtungen mit Lichtgeschwindigkeit emittiert werden (Bild 121/1). Man erzeugt schnellfliegende π^0-Mesonen ($u = 0{,}99975\,c$). 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.



121/1

Zusammenfassung

Ausgehend von den Anschauungen der klassischen Mechanik über Raum und Zeit, vermutete man, daß der Weltraum ein absolut ruhendes Inertialsystem sei, in dem sich das Licht mit der Geschwindigkeit c ausbreitet. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit von einem bewegten Bezugssystem aus sollte diese Hypothese stützen.

1. Das Michelson-Experiment

Auf der Grundlage des klassischen Additionsgesetzes für Geschwindigkeiten wurde das Michelson-Experiment geplant. Es sollte den Unterschied zwischen der Lichtgeschwindigkeit im Weltraum und der von dem bewegten System Erde aus gemessenen Lichtgeschwindigkeit durch eine Verschiebung der Interferenzstreifen nachweisen. Diese wurde nicht beobachtet.

2. Ergebnis des Experimentes

Die experimentelle Erfahrung zeigt, daß die Vakuumlichtgeschwindigkeit eine absolute Naturkonstante und obere Grenze für alle Geschwindigkeiten ist, die mit einem Energietransport verbunden sind.
Daraus muß gefolgert werden,
- daß es kein absolut ruhendes Inertialsystem gibt und
- daß das klassische Additionsgesetz für Geschwindigkeiten nicht allgemein gültig ist.

3. Die spezielle Relativitätstheorie

Albert Einstein nahm das Ergebnis des Michelson-Experimentes als Grundlage. Erste daraus gezogene Folgerungen sind:
- die Relativität der Gleichzeitigkeit,
- die Relativität der Zeit- und Längenmessung,
- das relativistische Additionsgesetz der Geschwindigkeiten.

Diese Erkenntnisse bestätigen die Anschauungen des dialektischen Materialismus, daß Raum und Zeit nicht absolut, sondern als Existenzform der Materie von ihrer Bewegung abhängig sind.

Masse-Energie-Beziehung

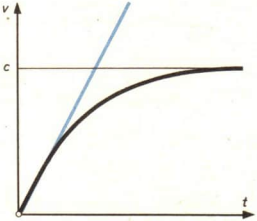
Teilchenbeschleuniger sind Anlagen, die in den Kosten und Ausmaßen mit großen Industriewerken vergleichbar sind. Sie dienen der Erforschung und Erzeugung von Elementarteilchen und ihrer Umwandlung.

Die Ausarbeitung der Folgerungen aus der experimentellen Erfahrung über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit durch Albert Einstein hatte bisherige Erkenntnisse über Raum, Zeit und damit zusammenhängende Begriffe und Gesetze in Frage gestellt. Er hat darüber hinaus erkannt, daß die Lichtgeschwindigkeit die obere Grenze für alle Bewegungen darstellt, die mit Energietransport verbunden sind; also auch für beliebige Signalausbreitungen und für die mechanische Bewegung beliebiger Körper. Es war deshalb notwendig geworden, die Gesetze der Mechanik neu zu durchdenken. Es ergab sich, daß die Masse nicht die strenge Unveränderlichkeit besitzt, die bis dahin angenommen wurde. Die relativistische Masseänderung bildet eine wichtige Bedingung, die bei der Konstruktion und dem Betrieb von Beschleunigern zu beachten ist. Die weitere logische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der kinetischen Energie eines schnell bewegten Teilchens und seiner Massezunahme führte Albert Einstein auf eines der fundamentalen Gesetze der Physik, auf die Masse-Energie-Beziehung.

Die relativistische Masseveränderlichkeit

60

In der klassischen Physik ist nach dem Newtonschen Grundgesetz die Masse als Maß für die Trägheit eines Körpers definiert. Entsprechend der experimentellen Erfahrung wurde die Masse eines Körpers als konstant angesehen. Sie ist der Stoffmenge proportional.
Ein Körper konstanter Masse könnte nach dem Newtonschen Grundgesetz mit einer konstanten Kraft auf beliebig hohe Geschwindigkeiten gebracht werden. Das widerspricht jedoch der Erkenntnis, daß die Vakuumlichtgeschwindigkeit die obere Grenze für Geschwindigkeiten ist (Bild 122/2). Einstein schloß daraus: Nähert sich die Geschwindigkeit v eines Körpers der Lichtgeschwindigkeit, dann muß die Beschleunigung gegen Null streben und die Masse m gegen Unendlich wachsen. Die Stoffmenge bleibt unverändert. Dieser Sachverhalt



122/2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm eines Körpers
– der eine konstante Beschleunigung erfährt,
– auf den eine konstante Kraft wirkt.

wird durch die **relativistische Gleichung für die Masse** ausgedrückt, wobei m_0 die **Ruhmasse** bedeutet, die für den ruhenden Körper zutrifft (Tabelle 123/1 und Bild 123/3).

► **Die Masse m eines Körpers mit der Ruhmasse m_0 hängt von der Geschwindigkeit ab.**

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (149)$$

Tabelle 123/1

$\frac{m}{m_0}$	v in $km \cdot s^{-1}$	$c - v$ in $km \cdot s^{-1}$
1,155	150 000	149 792
1,25	180 000	119 792
1,66	240 000	59 792
2,00	258 272	41 520
5,00	293 730	6 062
10	298 294	1 498
100	299 778	14
1 000	299 792	0,14
10 000	299 792	0,001 4

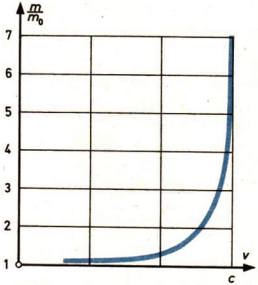
Tabelle 123/2

U in V	v in $km \cdot s^{-1}$	m in 10^{-31} kg
1	593	9,11
10^2	5 920	9,11
10^4	58 430	9,29
10^5	164 200	10,88
10^6	283 500	27,59

Bei makroskopischen Körpern ist v stets wesentlich kleiner als c und die Masseänderung nicht feststellbar.

■ Ein Raumschiff mit einer Masse von 5 t erfährt bei der zweiten kosmischen Geschwindigkeit eine Massezunahme von etwa 10^{-6} kg = 1 mg.

Bei der Beschleunigung von Elektronen im elektrischen Feld wurde bereits 1901 die Masseänderung festgestellt (Tabelle 123/2). Heute ist sie experimentell sehr genau bestätigt. In modernen Beschleunigern kommen Elektronen bis auf etwa $0{,}09\ m \cdot s^{-1}$ an die Lichtgeschwindigkeit heran und erreichen dabei etwa die 40000fache Ruhmasse. Bei Beschleunigern muß deshalb die Massezunahme der Teilchen berücksichtigt werden.



123/3 Massezunahme in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitszunahme

Die Masse-Energie-Beziehung 61

Die Masse m eines schnell bewegten Teilchens unterscheidet sich von der Ruhmasse m_0 um die Masseänderung Δm.

$$m = m_0 + \Delta m \qquad (150)$$

Wird die Gleichung für die relativistische Masseveränderlichkeit (149) für $v/c \ll 1$ in eine Reihe entwickelt, so erkennt man den Zusammenhang zwischen der Masseänderung Δm und der kinetischen Energie des Teilchens.

$$m = m_0 + \frac{m_0}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} + \ldots \text{ bzw. } \Delta m \cdot c^2 = \frac{m_0}{2} v^2 + \ldots \qquad (151)$$

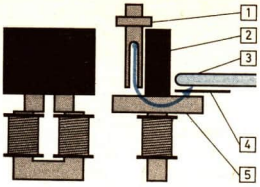
Einstein konnte nun zeigen, daß nicht nur die kinetische Energie, sondern auch jede Energieänderung ΔE eine entsprechende Masseänderung bewirkt.

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \quad \text{oder} \quad \Delta E = \Delta m \cdot c^2 \qquad (152)$$

Diese Energieänderungen sind bei vielen Prozessen so klein, daß die Masseänderungen nicht meßbar sind.
Sie sind aber bei kernphysikalischen Prozessen so groß, daß auch die Masseänderungen meßbar werden.
Durch Multiplikation von (151) mit c^2 und Berücksichtigung von (152) erhält man

$$m \cdot c^2 = m_0 \cdot c^2 + \Delta m \cdot c^2. \qquad (153)$$

Albert Einstein deutete den Ausdruck $m \cdot c^2$ als die Gesamtenergie E eines Körpers und $m_0 \cdot c^2$ als die im ruhenden Körper enthaltene Ruhenergie E_0. Damit stellte er eine für die gesamte Physik fundamentale Beziehung auf, die **Masse-Energie-Beziehung.**



124/1 Experiment zur Paarzerstrahlung
1 – Strahlenquelle
2 – Bleiblock
3 – Zählrohr
4 – Absorptionsplatte
5 – Elektromagnet mit Polschuhen

► **Die Gesamtenergie E eines Körpers ist seiner Masse m proportional.**
Die Ruhenergie E_0 eines Körpers ist seiner Ruhmasse m_0 proportional.
Der Proportionalitätsfaktor ist gleich dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.

$$E = m \cdot c^2 \qquad (154)$$

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 \qquad (155)$$

Nach diesen Gleichungen sind Masse und Energie zwei verschiedene, aber voneinander abhängige Eigenschaften der Materie. So kann man jede Masse in Energie umrechnen und umgekehrt. Dadurch schließt der Satz von der Erhaltung der Energie den Satz von der Erhaltung der Masse ein. ①

Die Gleichung für die Ruhmasse zeigt, daß bei der Umwandlung einer kleinen Ruhmasse eine große Energiemenge freigesetzt werden kann. Das erfolgt bei der Gewinnung der Kernenergie. Dabei wurde die Beziehung $E = m \cdot c^2$ experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt.

124/2 Paarzerstrahlung eines Elektron-Positron-Paares, betrachtet im Bezugssystem des Paares. Der Physiker Dirac hatte bereits 1930 die Existenz von Positronen vorausgesagt, 1932 entdeckte man diese Elementarteilchen in der kosmischen Strahlung. Das Forscherehepaar Joliot-Curie erhielt 1934 bei der Bestrahlung von Aluminium mit α-Strahlen radioaktiven Phosphor $^{30}_{15}P$, der Positronen ausstrahlt.
Inzwischen sind zu allen Elementarteilchen die Antiteilchen entdeckt bzw. erzeugt worden.

Die Paarzerstrahlung 62

Ein Beispiel für die Masse-Energie-Beziehung ist die Paarzerstrahlung.
Ein solches Teilchenpaar besteht aus dem bereits bekannten Elektron $_{-1}^{0}e$ und einem Positron $_{+1}^{0}e$, dem Antiteilchen des Elektrons. Das Positron hat die gleiche Masse wie ein Elektron, aber eine entgegengesetzte Ladung.
Das Positron allein wäre stabil. Es tritt jedoch in der Umgebung von gewöhnlicher Materie nach sehr kurzer Zeit mit einem Elektron in Wechselwirkung.

▼ Das läßt sich nachweisen, wenn Aluminiumblech von Elektronen bzw. Positronen durchstrahlt wird. Während Elektronen von etwa 1 mm dickem Aluminiumblech vollständig absorbiert werden, ergeben Positronen bei der gleichen Blechdicke eine deutlich nachweisbare ionisierende Strahlung. Es zeigt sich, daß es sich nicht mehr um Positronen handelt (Bild 124/1).
Die Strahlung erweist sich als eine energiereiche γ-Strahlung.

Eine sorgfältige Analyse dieser Beobachtungen führt zu dem Ergebnis, daß die von ${}^{22}_{11}\mathrm{Na}$ ausgestrahlten Positronen sich im Aluminium mit Elektronen zu Elektron-Positron-Paaren vereinigt haben. Jedes Paar zerstrahlt zu zwei γ-Quanten (Bild 124/2). Sehr aufschlußreich wird dieser Vorgang, wenn man zur Reaktionsgleichung auch eine Gleichung für die Energie, die Masse, die Ladung und den Impuls aufstellt und sich überlegt, welche Strukturformen der Materie hier auftreten. Dazu muß mit Hilfe der Masse-Energie-Beziehung (153) die Ruhenergie eines Elektrons und eines Positrons berechnet werden.

	1 Elektron	+ 1 Positron	$\longrightarrow$ 2 γ-Quanten
	${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$	${}^{0}_{1}\mathrm{e}$	$\longrightarrow 2\gamma$
Masse	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg Ruhmassen	$+\ 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg	$= 18{,}2 \cdot 10^{-31}$ kg Masse der Strahlung
Energie	0,51 MeV Ruhenergien	+ 0,51 MeV	= 1,02 MeV Strahlungsenergie
Ladung	-1	$+1$	$= 0$
Impuls	$p = 0$ Teilchen (Stoff)	$p = 0$	$p_1 + p_2 = 0$ Strahlung (Feld)

Es zeigt sich also, daß die Gesamtenergie, die Gesamtmasse, die Gesamtladung und der Gesamtimpuls Erhaltungsgrößen sind. Schreibt man die Gleichung (153) in der Form

$$E = E_0 + \Delta E$$

und wendet sie auf den Vorgang der Paarzerstrahlung an, so wird deutlich, daß E_0 und m_0 Größen sind, für die bei der Umwandlung von Teilchen kein Erhaltungssatz gilt. Bei der Paarzerstrahlung wandelt sich die Ruhenergie E_0 (Ruhmasse) der Ausgangsteilchen vollständig in Strahlungsenergie ΔE um, die aber ebenfalls Masse besitzt. Die Materie erfährt eine Änderung ihrer Qualität.
Auch der umgekehrte Prozeß, die Paarbildung, ist bereits in Beschleunigern experimentell vollzogen worden.

125/1 Albert Einstein in Princeton

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Nach dem Abitur studierte er von 1896 bis 1900 in Zürich Physik. Von 1902 bis 1909 war er am Patentamt in Bern als Gutachter tätig. Ab 1914 wirkte Einstein in Berlin als Akademiemitglied und als Professor an der Universität. Seine Arbeiten und besonders die Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie sowie die experimentelle Bestätigung der darin vorausgesagten Ablenkung des Lichtes durch die Sonne im Jahre 1919 machten ihn zum berühmtesten und bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts. Für seine Untersuchungen zum lichtelektrischen Effekt wurde Einstein 1922 der Nobelpreis für Physik verliehen. Einstein war ein bedingungsloser Gegner des Krieges. Er begrüßte die Große Sozialistische Oktoberrevolution und trat für die Freundschaft zur Sowjetunion ein. Nach der Machtergreifung des Hitlerfaschismus 1933 kehrte er Deutschland den Rücken. Er ist am 18. April 1955 in Princeton (USA) gestorben.
Zeit seines Lebens trat er für Gerechtigkeit und Frieden ein und war einer der fortschrittlichsten Gelehrten seiner Zeit. Nach dem Krieg wirkte er für ein Verbot der Kernwaffen. In seinem Aufsatz „Warum Sozialismus?" (1949) begründet er, daß nur der Sozialismus die gesellschaftlichen Probleme der Menschheit lösen kann.

① Was folgt aus der Masse-Energie-Beziehung für die Erwärmung eines Körpers oder für die Masse eines geladenen und eines entladenen Akkumulators (andere Masseänderungen ausgeschlossen)?

Arbeiten A. Einsteins aus dem Jahre 1905

- „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“ (Seine Arbeit zur Promotion an der Universität Zürich)
- „Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ (Eine Arbeit zur Theorie der Brownschen Bewegung)
- „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ (zur Quantentheorie des Lichtes)
- „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (enthält Gedanken des Stoffabschnittes „Relativität von Zeit und Länge“ des Lehrbuches)
- „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ (enthält Aussagen des Stoffabschnittes „Masse-Energie-Beziehung“ des Lehrbuches)

126/1 Albert Einstein 1905 im Berner Patentamt

Zusammenfassung

63

1. Experimentelle Erkenntnisse und Hypothese

Bereits um Neunzehnhundert gab es experimentelle Hinweise, daß die Masse von Elektronen bei großen Geschwindigkeiten zuzunehmen scheint.
1905 gelangte Einstein mit seiner speziellen Relativitätstheorie zu Erkenntnissen, die es ermöglichen, diese Erscheinung zu erklären.
Mit der experimentellen Erfahrung über die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hatte Einstein die Hypothese verbunden, daß c die obere Grenze für alle Geschwindigkeiten sei, die mit Energieübertragung verbunden sind.

2. Folgerungen

1. Aus der Hypothese, daß c Grenzgeschwindigkeit sei, folgt, daß die Trägheit und damit die Masse mit zunehmender Geschwindigkeit größer werden muß.

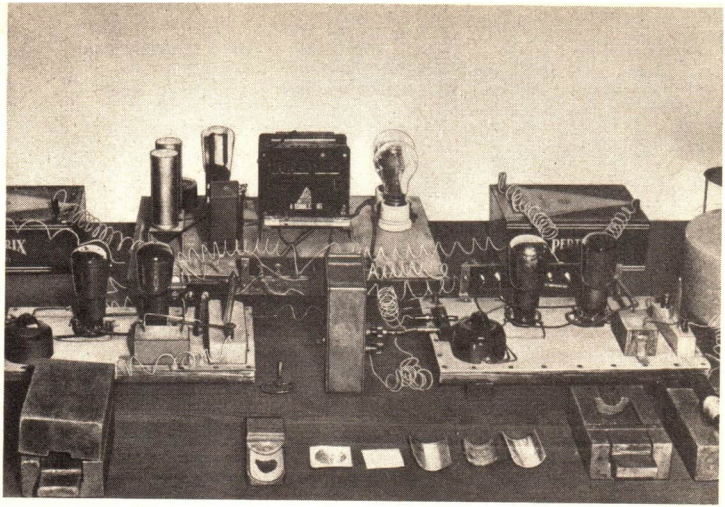
2. Aus dem Zusammenhang von Zunahme der kinetischen Energie und Massezunahme folgt die Masse-Energie-Beziehung, die Einstein auch auf die Ruhmasse und Gesamtmasse anwendete.

3. Experimentelle Prüfung

Einstein sagte 1905 zur Masse-Energie-Beziehung: „Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maße veränderlich ist (z. B. Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird.“ „Wenn die Theorie den Tatsachen entspricht, so überträgt die Strahlung Trägheit...“. Beide Folgerungen wurden später experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt.

4. Anwendung der Erkenntnisse

Die Beschleuniger für die Erforschung der Elementarteilchen funktionieren für große Geschwindigkeiten nur unter Berücksichtigung der Massezunahme.
Alle Kernprozesse, die in Kernkraftwerken und in nuklearen Sprengkörpern ablaufen, sowie die Umwandlungen von Elementarteilchen vollziehen sich auf der Grundlage der Masse-Energie-Beziehung.
Die Paarzerstrahlung zeigt, daß sich die Erscheinungsformen der Materie ändern können. Die Gültigkeit der Erhaltungssätze für Masse, Energie, Ladung und Impuls ist ein naturwissenschaftlicher Beleg dafür, daß die Materie bei allen Umwandlungen erhalten bleibt.



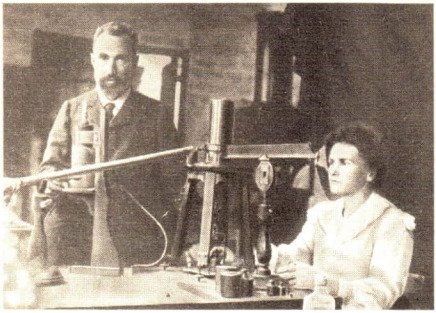
KERNENERGIE

Der Versuch, an diesem mit einfachen technischen Geräten ausgestatteten Forschungsplatz Atomkerne eines Transurans zu bilden, endete 1938 für Otto Hahn und seine Mitarbeiter mit der Entdeckung der Kernspaltung. Damit wurde eine wesentliche Voraussetzung zum Freisetzen von Kernenergie geschaffen.

Der Bedarf der Menschheit an Energie wächst beständig und verdoppelt sich zur Zeit alle 15 bis 20 Jahre.

Die Vorräte an den wichtigsten Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas sind jedoch begrenzt. Es kommt hinzu, daß die fossilen Energieträger zugleich wertvolle Rohstoffe für die chemische Industrie sind.

Deshalb erlangt die Energiegewinnung aus Kernprozessen eine immer größere Bedeutung. Während zur Zeit die Kernenergie zum gesamten Energieaufkommen im Weltmaßstab nur wenige Prozent beträgt, soll sie bis zum Jahre 2000 etwa 25 bis 30 Prozent der technisch genutzten Energie ausmachen.



Atomkerne und Kernreaktionen

Um die Jahrhundertwende war den Physikern bekannt, daß einige Stoffe Strahlen aussenden. Das Ehepaar Marie und Pierre Curie fand bei der Untersuchung dieser Erscheinung im Uranerz zwei vorher unbekannte Elemente, von denen diese Strahlung ausgeht. Sie nannten diese Elemente Radium und Polonium und deren Eigenschaft, Strahlen auszusenden, Radioaktivität.

Die Untersuchungsergebnisse der spontanen Umwandlung von Atomkernen (Radioaktivität) sowie die Tatsache, daß die relativen Atommassen häufig angenähert ganzzahlige Vielfache der Atommassen des Wasserstoffs sind, lieferten Anfang des 20. Jahrhunderts erste Hinweise darauf, daß Atomkerne zusammengesetzte Gebilde sind.
Eine Möglichkeit, den Aufbau der Atomkerne zu untersuchen, besteht darin, daß man sie mit Elementarteilchen beschießt. Aus der Reaktion der Atomkerne kann man auf eine bestimmte innere Struktur schließen. Da der Teilchencharakter der energiereichen radioaktiven Strahlung (α-Strahlen und β-Strahlen) etwa 1911 bereits erkannt war, entschlossen sich verschiedene Physiker, wie zum Beispiel Rutherford, Blackett, Bothe, Cockroft und Walton, zu Experimenten, bei denen Atomkerne mit diesen energiereichen Strahlen beschossen wurden.

Aufbau der Atomkerne

64

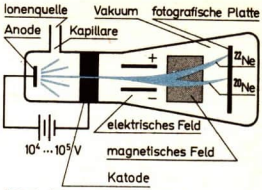
Heute ist experimentell abgesichert, daß außer dem leichtesten Wasserstoffnuklid ^1_1H alle Atomkerne aus Protonen und Neutronen bestehen.
Diese Kernbausteine bezeichnet man als **Nukleonen**; die aus ihnen aufgebauten Kerne als **Nuklide**.
Das Neutron besitzt etwa die gleiche Masse wie das Proton. Es ist aber elektrisch neutral. Wegen der fehlenden elektrischen Ladung und der deshalb ausbleibenden Ionisierung bei Wechselwirkung mit Atomen in einer einfachen Nebelkammer oder einem Zählrohr ist das Neutron nicht unmittelbar nachweisbar, was seine Entdeckung erschwerte. Die Neutronen reagieren stark mit Atomkernen. Darauf beruht ihre hervorragende Bedeutung als Mittel zur Erforschung und zur Umwandlung von Atomkernen. Im Gegensatz zum Proton

ist das Neutron im freien Zustand instabil. Außerhalb des Atomkerns hat es eine Halbwertzeit von nur etwa 13 Minuten.

Freie Protonen können sehr leicht durch Ionisierung des Wasserstoffs erzeugt werden. Sie lassen sich wegen ihrer Ladung und Stabilität in Teilchenbeschleunigern auf sehr hohe Energien bringen; sie können damit zur Einleitung von Kernreaktionen benutzt werden, um die Eigenschaften der Kernkräfte zu untersuchen. ① ② ③ ④ ⑤

Die Bestimmung der Ruhmasse von Atomkernen bzw. geladenen Elementarteilchen erfolgt mit Hilfe von Massenspektrographen, die auf der Grundlage der e/m-Bestimmung arbeiten (Bild 129/1). Dabei wird eine Genauigkeit von 7 bis 8 Dezimalen erreicht. Um die Masse einer Dezitonne Kohlen mit gleicher Genauigkeit anzugeben, müßte die Wägung auf wenige Milligramm genau erfolgen.

Da die Masseneinheit 1 Kilogramm in der Kernphysik zu sehr unhandlichen Zahlenwerten führt, hat man zusätzlich die atomare Masseneinheit (1 u) als zweckmäßige Einheit eingeführt.



129/1 Schematische Darstellung eines Massenspektrographen

Ein Massenspektrograph ist ein Gerät zur Analyse eines Ionenstrahls auf Bestandteile verschiedener Masse und zur genauen Massebestimmung. Sie beruht auf der elektrischen und magnetischen Ablenkung des Ionenstrahls bei sehr feiner Ausblendung und einer Fo:·ssierung des Strahls, so daß sich möglichst alle Teilchen gleicher Masse und Ladung in einem Punkt der fotografischen Platte vereinigen.

► **Die atomare Masseneinheit 1 u ist gleich $\frac{1}{12}$ der Masse eines $^{12}_{6}$C-Atoms.**

$$1\ \mathrm{u} = \frac{1}{12}\, m_A(^{12}_{6}\mathrm{C})$$

$$1\ \mathrm{u} = 1{,}660277 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

Für die Ruhmasse der Nukleonen hat man folgende Werte experimentell ermittelt:

Ruhmasse eines Neutrons:
$m_{0n} = 1{,}6747 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 1{,}00898\ \mathrm{u}$

Ruhmasse eines Protons:
$m_{0p} = 1{,}6724 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 1{,}00759\ \mathrm{u}$.

Neben der besonderen atomaren Masseneinheit gibt es in der Mikrophysik auch eine besondere Energieeinheit, das **Elektronenvolt** (eV). Energien der Kernphysik haben die Größenordnung einiger Millionen eV, kurz MeV. ⑥ ⑦

$$1\ \mathrm{eV} = 1{,}60210 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{Joule}. \qquad (156)$$

Die für einen Atomkern charakteristischen Größen sind:

Kernladungszahl Z: Sie gibt die Anzahl der in dem Atomkern vorhandenen Protonen an.

Massenzahl A: Sie ist gleich der Summe aus der Zahl Z der Protonen und der Zahl N der Neutronen.

---

① Was verstehen Sie unter Spontanzerfall?
② Welche Informationen gewann man aus den Rutherfordschen Streuversuchen?
③ Erläutern Sie die α-, β- und γ-Strahlung!
④ Welche Eigenschaften haben radioaktive Strahlen?
⑤ Erläutern Sie den Begriff Isotop!
⑥ Wie ist die atomare Energieeinheit eV definiert?
⑦ Welche Beziehung besteht zwischen Elektronenvolt und Wattsekunde?

► Massenzahl A

$$A = Z + N \qquad (157)$$

Durch die Massenzahl A und die Kernladungszahl Z wird der Kern eindeutig gekennzeichnet. Bei der symbolischen Kennzeichnung der Atomkerne werden die Massenzahl A und die Kernladungszahl Z als Indizes vor das chemische Symbol des Elements gestellt, z. B. für Kohlenstoff mit $A = 12$ und $Z = 6$ schreibt man $^{12}_{6}C$.
Die bekannten **Elementarteilchen** werden durch folgende Symbole gekennzeichnet:
Proton $^{1}_{1}p$, Neutron $^{1}_{0}n$, Elektron $_{-1}^{0}e$, Positron $_{+1}^{0}e$. ①

Kernkraft

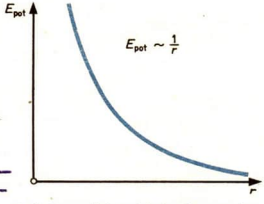
65

Der Durchmesser der Atomkerne liegt zwischen 10^{-15} m und 10^{-14} m. Daraus ergibt sich ein Kernvolumen von höchstens 10^{-42} m³, in dem alle Nukleonen zusammengedrängt sind. Man könnte erwarten, daß die zwischen den gleichartig geladenen Protonen wirkende Coulombsche Abstoßungskraft sofort zur Explosion des Kernes führt, wenn man bedenkt, daß zwischen zwei benachbarten Protonen im Kern diese Coulombsche Abstoßungskraft etwa 50 N beträgt. Da aber die meisten Atomkerne sehr stabil sind, muß eine sehr viel stärkere Bindungskraft die Nukleonen zusammenhalten. Die zwischen den Nukleonen wirkende sogenannte **Kernkraft** ist von ganz anderer Art als alle bisher bekannten Kräfte.

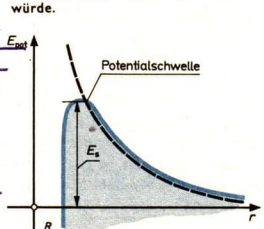
Die wichtigsten Eigenschaften der Kernkraft sind:

- Die Kernkraft ist unabhängig von der Ladung der Nukleonen, d. h., sie wirkt in gleicher Weise zwischen Proton und Proton, Neutron und Neutron und auch zwischen Proton und Neutron.
- Die Kernkraft ist außerordentlich stark. Sie übertrifft die Coulombsche Kraft um mehrere Zehnerpotenzen.
- Die Kernkraft hat eine sehr geringe Reichweite von nur etwa 10^{-15} m. Das bedeutet, daß jedes Nukleon nur auf die ihm unmittelbar benachbarten Nukleonen wirken kann. In Entfernungen r, die größer als der Kernradius R sind, überwiegt bereits die Coulombsche Abstoßungskraft.

Das Zusammenwirken zwischen Kernkraft und Coulombkraft schafft in unmittelbarer Nähe des Kerns besondere Verhältnisse. Nähert sich ein Proton dem Kern, so wirkt vorerst nur die Coulombkraft. Aufgrund dieser Kraft wird das Proton vom Kern abgestoßen. Deshalb kann sich das Proton dem Kern nur nähern, wenn es kinetische Energie besitzt. Bei der Annäherung an den Kern verliert das Proton kinetische Energie und erhält dafür entsprechend potentielle Energie. In unmittelbarer Kernnähe ändern sich die Verhältnisse durch die anziehende Wirkung der Kernkraft schlagartig. Zur Veranschaulichung der Vorgänge ist das Potentialtopfmodell geeignet. ②

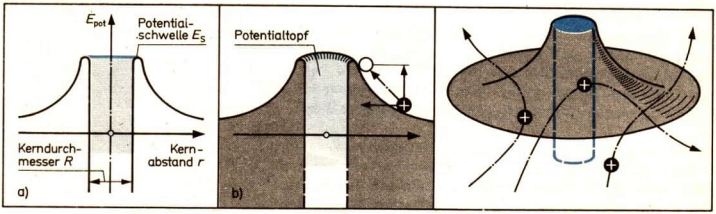


130/1 Diese Abhängigkeit wäre gegeben, wenn **nur** die Coulombsche Kraft zwischen Kern und Proton wirken würde.



130/2 Schematische Darstellung des Verlaufs der Kurve der potentiellen Energie eines Protons bei Annäherung an einen Kern

Das Potentialtopfmodell. Trägt man die potentielle Energie eines sich dem Atomkern nähernden Protons in Abhängigkeit von der Entfernung r vom Kern in ein Koordinatensystem ein und berücksichtigt nur die Coulombkraft, so erhält man eine Kurve entsprechend Bild 130/1.
In unmittelbarer Nähe des Kerns wirkt aber fast übergangslos die sehr starke, anziehende Kernkraft. Dadurch entsteht der in Bild 130/2 dargestellte Verlauf.
Ein Maximum wird an der Stelle erreicht, an der die Coulombkraft und die Kernkraft den gleichen Betrag haben. Man bezeichnet das Maximum als die Potentialschwelle E_S und das Innere als Potentialtopf. In dem Potentialtopf befinden sich die Nukleonen.

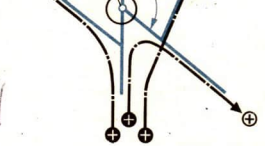


Die räumliche Interpretation der Kurve (Bild 131/1a) ergibt dann das Bild eines Vulkanberges, der auf dem Gipfel einen tiefen Krater hat (Bild 131/1b).
Das so geschaffene Potentialtopfmodell läßt Analogiebetrachtungen zu.

Das Verhalten eines Protons bei Annäherung an einen Kern kann in diesem Modell durch eine rollende Kugel im Schwerefeld der Erde veranschaulicht werden. Aus Bild 131/2 ist ersichtlich, daß eine Kugel (Proton) nur dann in den Krater (Potentialtopf) gelangen wird, wenn sie die entsprechende Richtung und die genügende kinetische Energie zum Erreichen des Kraterrandes (Potentialschwelle) hat. Das Bild 131/3 zeigt die Verhältnisse, wenn ein Proton nicht die genügende kinetische Energie zum Erreichen der Potentialschwelle oder nicht die genaue Richtung auf den Potentialtopf hin hat. Es kommt zur **Streuung** der Protonen am Kern. Die am Kern gestreuten Teilchen durchlaufen mehr oder weniger stark gekrümmte **Hyperbelbahnen**. Aus dem Streuwinkel von α-Teilchen berechnete Rutherford 1911 erstmalig den Atomkerndurchmesser.

Da Neutronen keine elektrische Ladung besitzen, können auch keine Coulombschen Kräfte zwischen Kern und Neutron

131/1a, b Darstellung des Potentialverlaufs um einen Atomkern
Die Potentialschwelle E_S hat bei leichten Kernen (z. B. Lithium) Beträge von 8 MeV und erreicht bei schweren Kernen (z. B. Uran) Beträge von 15 MeV.
131/2 Ablenkung von Protonen durch die Coulombsche Kraft am Potentialwall

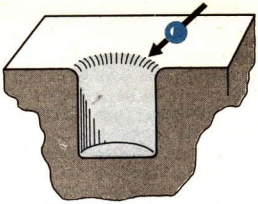


131/3 Streuwinkel der Protonen am Potentialwall

① Geben Sie die symbolische Darstellung für die Atomkerne folgender Elemente mit Hilfe des Tafelwerkes an: Be, F, Na, P, Mn, As, J, Tm, Ta, Pu, Es!
② Erläutern Sie wesentliche Eigenschaften der Kernkräfte!

wirken. Im Potentialtopfmodell entfällt der Berg. Das Neutron bewegt sich entsprechend dem mechanischen Modell auf einer horizontalen Ebene auf den Potentialtopf zu (Bild 132/1).

Daher kann sich ein Neutron mit beliebig kleiner kinetischer Energie dem Kern so weit nähern, daß die Kernkraft wirksam wird und zu einer Vereinigung des Neutrons mit dem Kern führt. ① ②



132/1 Potentialtopfmodell für das Neutron

Kernbindungsenergie und Massedefekt 66

Um zu verstehen, weshalb bei der Kernspaltung und bei der Kernfusion Energie frei wird, ist es notwendig, den Begriff Kernbindungsenergie E_B einzuführen. Dabei soll das Potentialtopfmodell helfen. Bei den Betrachtungen wird vorerst nicht zwischen Protonen und Neutronen unterschieden; es wird von dem gemeinsamen Begriff Nukleon ausgegangen.

Es sei zunächst ein Wasserstoffkern vorhanden. Vereinigt sich ein weiteres Nukleon mit dem Wasserstoffkern, so muß entsprechend dem Potentialtopfmodell Energie frei werden, weil beim „Hineinfallen" des Nukleons in den Potentialtopf die potentielle Energie abnimmt. Nach dem Energieerhaltungssatz muß die entsprechende Energiedifferenz in Form einer anderen Energie vom System Nukleon – Nukleon abgegeben werden. Anders ausgedrückt, die Gesamtenergie der vereinigten Nukleonen ist kleiner als die Summe der Einzelenergien der beiden Nukleonen vor der Vereinigung.

Vereinigt man nacheinander weitere Nukleonen mit dem Kern, so wird jedesmal ein Energiebetrag abgegeben. Nun kann man sich jeden Kern aus einzelnen Nukleonen nacheinander aufgebaut denken. Dabei muß insgesamt eine Energie frei werden, die der Summe der freiwerdenden Teilenergien entspricht. Analog wie bei der chemischen Bindung hat man den Begriff Kernbindungsenergie festgelegt.

► **Kernbindungsenergie ist die Energie, die frei wird, wenn ein Atomkern aus freien Nukleonen zusammengefügt wird. Der Betrag der freiwerdenden Energie E_B ist ein Maß für die Stabilität des gebildeten Kernes.**

Soll umgekehrt der Kern in seine einzelnen Nukleonen zerlegt werden, so muß dem System Energie zugeführt werden, die der frei gewordenen Energie bei der Vereinigung gleich ist. Sie ist von der Anzahl der Nukleonen im Kern abhängig.

Obwohl die Kernkraft und die damit zusammenhängenden theoretischen Grundlagen trotz großer Bemühungen nicht ausreichend erforscht sind, ist es möglich, die Kernbindungs-

energien recht genau experimentell mit Hilfe der Masse-Energie-Beziehung zu bestimmen. Bei der Vereinigung von Nukleonen zu einem Kern wird Energie abgegeben. Diese Energieabgabe entspricht nach der Masse-Energie-Beziehung einer Abnahme der Ruhmasse der zum Kern vereinigten Nukleonen um Δm_0. Diese Masseabnahme kann man mit Hilfe hochempfindlicher Meßverfahren (Massenspektroskopie) nachweisen. Es stellt sich heraus, daß die tatsächliche Kernmasse m_{0K} (Ruhmasse) bei allen Atomkernen stets kleiner ist als die Summe der Massen aller Nukleonen des Kerns $Z \cdot m_{0p} + N \cdot m_{0n}$. Die Differenz
$\Delta m_0 = (Z \cdot m_{0p} + N \cdot m_{0n}) - m_{0K}$ bezeichnet man als **Massedefekt.**

► **Der Massedefekt Δm_0 eines Kernes ist gleich der Differenz aus der Summe der Massen aller Nukleonen eines Kerns und der experimentell bestimmten Masse m_{0K} eines entsprechenden Atomkerns.**

$$\Delta m_0 = (Z \cdot m_{0p} + N \cdot m_{0n}) - m_{0K} \quad (158)$$

Ist der Massedefekt eines Atomkerns experimentell ermittelt worden, so ist die Kernbindungsenergie berechenbar. Nach der Einsteinschen Gleichung (154) entspricht Δm_0 einem bestimmten Energiebetrag, der bei der Bildung des Atomkerns frei wird.

$$E_B = \Delta m_0 \cdot c^2 \quad (159)$$

Aus den Gleichungen (158) und (159) ergibt sich eine Gleichung für die Berechnung der
Bindungsenergie eines Kernes.

► **Kernbindungsenergie**

$$E_B = [(Z \cdot m_{0p} + N \cdot m_{0n}) - m_{0K}]c^2 \quad (160)$$

Einheit der Kernbindungsenergie ist 1 MeV.

Man kann also z. B. aus dem Massedefekt Δm_0, der bei der Verschmelzung von zwei Protonen und zwei Neutronen entsteht, die freiwerdende Energie E_B berechnen:

Gegeben:	*Lösung:*
$Z = 2$	$E_B = [(Z \cdot m_{0p} + N \cdot m_{0n}) - m_{0He}] \cdot c^2$
$N = 2$	$E_B = [4{,}03314\ \text{u} - 4{,}00278\ \text{u}] \cdot c^2$
$m_{0p} = 1{,}00759\ \text{u}$	
$m_{0n} = 1{,}00898\ \text{u}$	$E_B = 0{,}03036 \cdot 931{,}44\ \text{MeV}$ (vgl. S. 134 oben)
$m_{0He} = 4{,}00278\ \text{u}$	
Gesucht:	
E_B	$E_B = 28{,}28\ \text{MeV}$ bzw. $1{,}26 \cdot 10^{-18}\ \text{kWh}$

① Vergleichen Sie anhand des Potentialtopfmodells die potentielle Energie eines freien und eines im Atomkern gebundenen Protons!
② Erläutern Sie das Potentialtopfmodell für ein Proton und für ein Neutron!

In der Kernphysik ist es üblich, die Bindungsenergie je Kern in MeV anzugeben. Geht man von der Masse
$1\ u = 1{,}660277 \cdot 10^{-27}$ kg aus, so ergibt das nach (156) je Masseeinheit die Energie

$$\mathbf{1\ u \cdot c^2 = 931{,}44\ MeV.}$$

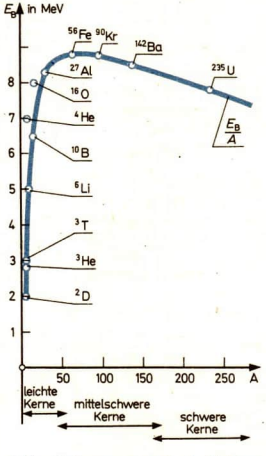
Die Energie von 28,28 MeV wird beim Aufbau eines einzigen Heliumkernes in Form von γ-Strahlung frei. Bei der Bildung von 1 g Helium würden $190 \cdot 10^3$ kWh Energie frei werden. Das entspricht dem Heizwert von 20 t Steinkohle.

Philosophische Bemerkungen zum Begriff Massedefekt

67

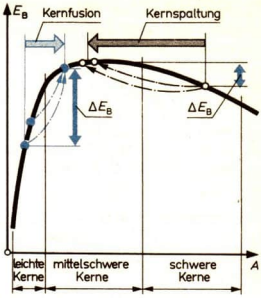
Der Begriff Massedefekt ist historisch entstanden und sehr ungünstig gewählt worden. Es gab oft Anlaß zu solchen Aussagen, daß Masse „verlorengegangen" und dafür Energie „entstanden" sei, daß sich „Masse in Energie verwandelt" hätte oder gar, daß Materie „verschwunden" wäre.
Es ist physikalisch unexakt, von der „Umwandlung von Masse in Energie" zu sprechen. Es gibt weder Masse ohne Energie noch Energie ohne Masse. Die Erfahrung zeigt, daß stets beide Eigenschaften gleichzeitig an den entsprechenden physikalischen Objekten beobachtet werden. Sie unterstreichen die materialistische Grundeinsicht von der Unzerstörbarkeit und Unerschaffbarkeit der Materie.
Einstein hat lange vor dem experimentellen Nachweis des Massedefekts und der Kernbindungsenergie in seiner bedeutenden Schrift „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?" (1905) völlig klar und eindeutig den beim Massedefekt der Kerne erstmals beobachteten 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."

Die Kernbindungsenergiekurve. Die tatsächlichen Massen aller stabilen Kerne hat man sehr exakt bestimmt und die zugehörigen Massedefekte berechnet. Mit Hilfe der Einsteinschen Gleichung hat man daraus für alle diese Kerne die Kernbindungsenergie bestimmt. Teilt man diese Bindungsenergie durch die Anzahl der im Kern enthaltenen Nukleonen, dann erhält man die **Kernbindungsenergie je Nukleon** des betreffenden Kernes (Bild 134/1).
Aus Bild 134/1 ist zu erkennen, daß die Bindungsenergie je Nukleon für die einzelnen Kerne unterschiedlich ist. Aus dem



134/1 Bindungsenergie E_B je Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl A. Zwischen $A = 50$ und $A = 100$ hat die Kurve ein Maximum von rund 9 MeV. Für diese Atomkerne ist die Bindungsenergie je Nukleon am größten, d. h., bei der Bildung solcher Kerne wird der größte Energiebetrag frei. Mit zunehmender Masse der Kerne fällt die Bindungsenergie je Nukleon wieder ab und beträgt für Uran rund 7,5 MeV je Nukleon. In Richtung leichter Kerne fällt die Kurve wesentlich steiler.

Verlauf der Kernbindungsenergiekurve ist zu erkennen, daß man auf zwei ganz verschiedenen Wegen zur Freisetzung von Energie aus Kernprozessen gelangen kann. Es sind immer solche Kernreaktionen einzuleiten, die zu einer Vergrößerung der insgesamt vorhandenen Bindungsenergie führen; d. h., es müssen leichte bzw. schwere Atomkerne in mittelschwere mit $50 < A < 150$ umgewandelt werden (Bild 135/1).
Im folgenden wird berichtet, wie Kernreaktionen herbeigeführt werden können. Dabei fließen Hinweise zur Entdeckungsgeschichte dieser Kernreaktionen ein. ① ②

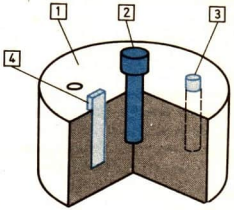


135/1 Aus der schematischen Darstellung geht hervor, daß theoretisch jeder schwere Atomkern in zwei mittelschwere zerlegt werden kann bzw. zwei leichte Atomkerne zu einem mittelschweren zusammenzufügen sind. In jedem der beiden Fälle tritt eine größtmögliche Energieabgabe ein. Die Endprodukte der beiden Kernprozesse haben einen stabileren Zustand als die Ausgangsprodukte.

Die Kernspaltung 68

Seit den Versuchen E. Rutherfords (1919) war den Physikern bekannt, daß man Atomkerne durch Beschuß mit schnellen Teilchen (Heliumkerne, Protonen) verändern kann. Dabei wurden die Kerne eines chemischen Elementes in Kerne eines anderen Elementes verwandelt.
Nachdem man Kernumwandlungen an verschiedenen leichteren Stoffen erfolgreich durchgeführt hatte, versuchte man auch bei den Kernen der schwereren Stoffe, die am Ende des Periodensystems der Elemente stehen, solche Veränderungen zu erreichen. Die Entdeckung des Neutrons durch Chadwick (1932) bot die Möglichkeit, solche Kernumwandlungen herbeizuführen. ③

Der Physiker E. Fermi führte 1934 als erster Versuche zur Kernumwandlung mittels Neutronenbeschuß durch. Er stellte auch die Prognose auf, daß beim Beschuß von Urankernen mit Neutronen durch Neutronenaufnahme Kerne von bis dahin unbekannten Elementen erzeugt werden können, die im Periodensystem der Elemente noch hinter dem letzten Element, dem Uran, ihren Platz haben würden. Er nannte diese vermuteten Elemente „Transurane".
Die Physikochemiker O. Hahn, F. Straßmann und die Physikerin L. Meitner überprüften diese Prognose, indem sie $^{235}_{92}$U-Kerne mit langsamen Neutronen beschossen (Bild 135/2). Mit gleichartigen Versuchen beschäftigten sich Fermi und Irène Joliot-Curie. Nach langwierigen und genauen Untersuchungen konnten Hahn und Straßmann Ende des Jahres 1938 zeigen, daß beim Beschuß von $^{235}_{92}$U-Kernen mit Neutronen keine Transurane entstehen, sondern Kerne von Elementen, die in der Mitte des Periodensystems stehen. Danach mußte der $^{235}_{92}$U-Kern in Bruchstücke zerfallen sein. Kurz nach dieser Entdeckung konnten L. Meitner und



135/2 Experimentieranordnung für Versuche mit Neutronen von Hahn und Straßmann.
Eine Neutronenquelle (2) mit einem Radium-Beryllium-Gemisch befindet sich in einem Paraffinblock (1) zum Abbremsen der Neutronen. In weiteren Bohrungen des Paraffinblockes wurden die zu bestrahlenden Stoffe (3, 4) untergebracht.

---

① Begründen Sie anhand der Kernbindungsenergiekurve je Nukleon die Freisetzung von Kernbindungsenergie bei der Kernspaltung und Kernfusion!

② Bestimmen Sie mit Hilfe der Kernbindungsenergiekurve je Nukleon die Kernbindungsenergie von $^{2}_{1}$D, $^{3}_{2}$He, $^{4}_{2}$He, $^{6}_{3}$Li und $^{235}_{92}$U!

③ Erklären Sie die Möglichkeit der Kernumwandlung durch Neutronen mit dem Potentialtopfmodell!

O. Frisch die bei der Uranspaltung freiwerdende Energie berechnen und messen. Die Auswertung der Experimente von Hahn und Straßmann führte zu folgenden Erkenntnissen (Bild 136/1).

1. Bei der Aufnahme eines Neutrons zerfällt der Urankern $^{235}_{92}U$ in 2 Teile, deren Massen etwa im Verhältnis 2 : 3 stehen (mittelschwere Kerne, Bild 136/2). Die Summe der Ordnungszahlen der Bruchstücke ist gleich der Ordnungszahl des Urankernes (z. B. $^{143}_{56}Ba$ und $^{90}_{36}Kr$ oder $^{140}_{55}Cs$ und $^{94}_{37}Rb$).

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{143}_{56}Ba + ^{90}_{36}Kr + 3(^{1}_{0}n) + E_B \quad \text{(freiwerdende Energie)}$$

Nach dem Eindringen des Neutrons in den Urankern bildet sich zunächst ein Zwischenkern $^{236}_{92}U$, der aber sofort in die beiden Bruchstücke zerfällt.

2. Bei jedem Spaltungsprozeß werden einige Neutronen frei, die weitere Urankerne spalten können.
3. Bei der Spaltung bzw. dem Auseinanderbrechen eines Urankernes wird Energie von etwa 200 MeV frei.

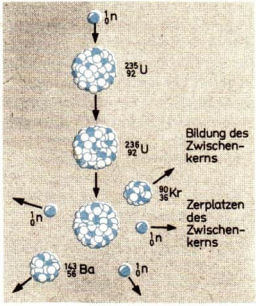
Berechnet man überschlagsmäßig die Energie, die frei wird, wenn a) ein schwerer Kern (Uran) und b) zwei Kerne mit der mittleren Massezahl 118 einzeln aus 236 Nukleonen aufgebaut werden, so erhält man:

a) für den schweren Kern:
$E_B = 236 \cdot 7{,}6$ MeV
$E_B = 1794$ MeV

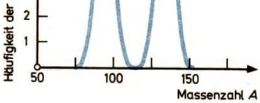
b) für die 2 mittleren Kerne:
$E_B = 2 \cdot 118 \cdot 8{,}4$ MeV
$E_B = 1982$ MeV

Beim Aufbau der zwei mittelschweren Kerne ist die freiwerdende Energie also um ≈ 188 MeV größer als beim Aufbau des schweren Urankernes. Der Wert stimmt recht gut mit dem für die Kernspaltung experimentell ermittelten Wert von 200 MeV überein. Eine genaue Massenbilanz der Ausgangs- und Endprodukte einer Kernspaltungsreaktion ermöglicht eine exakte Bestimmung der freiwerdenden Energie. Bezüglich der Kernspaltungsreaktion werden folgende Ruhmassen experimentell ermittelt:

Ruhmassen vor der Kernspaltung m_{0A}	Ruhmassen nach der Kernspaltung m_{0E}
$^{1}_{0}n$: $m_{0n} = 1{,}00898$ u	$^{143}_{56}Ba$: $m_{0Ba} = 142{,}9084$ u
$^{235}_{92}U$: $m_{0U} = 235{,}0439$ u	$^{90}_{36}Kr$: $m_{0Kr} = 89{,}9043$ u
	$3 \cdot (^{1}_{0}n)$: $3m_{0n} = 3{,}0269$ u
$\sum m_{0A} = 236{,}0529$ u größer als	$\sum m_{0E} = 235{,}8396$ u



136/1 Modellhafte Vorstellung der $^{235}_{92}$Uran-Spaltung



136/2 Prozentuale Häufigkeit der Spaltprodukte bei der Spaltung von $^{235}_{92}U$ durch thermische Neutronen. Es entstehen bevorzugt Teilstücke mit Massenzahlen um 95 und 140.

Berechnung der freiwerdenden Energie E_B

$\Delta m_0 = \sum m_{0A} - \sum m_{0E}$ $\qquad E_B = \Delta m_0 \cdot c^2$

$\Delta m_0 = 236{,}0529\,\text{u} - 235{,}8396\,\text{u}$ $\qquad E_B = 0{,}2133\,\text{u} \cdot 931{,}44\,\frac{\text{MeV}}{\text{u}}$

$\underline{\underline{\Delta m_0 = 0{,}2133\,\text{u}}}$ $\qquad \underline{\underline{E_B = 199\,\text{MeV}}}$

Diese Energie teilt sich folgendermaßen auf:

Kinetische Energie der Spaltprodukte	$\approx$	165 MeV
Kinetische Energie der Spaltneutronen	$\approx$	6 MeV
Energie der radioaktiven Strahlung	$\approx$	28 MeV

Multipliziert man die bei der Spaltung eines Urankernes freiwerdende Energie mit der Anzahl der Atome in einem Kilogramm Uran, so erhält man theoretisch (d. h. bei Annahme der völligen Spaltung des Urans) einen Energiebetrag von $5{,}4 \cdot 10^{26}$ MeV oder $2{,}4 \cdot 10^6$ kWh. Diese Energie ist rund 10^6mal so groß wie die bei der Verbrennung von 1 kg Steinkohle freiwerdende Energie.
Die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie erscheint zum größten Teil (etwa 90 %) als kinetische Energie der auseinanderfliegenden Tochterkerne, der freiwerdenden Neutronen, der Betastrahlen, und anderer Teilchen. Der Rest ist in der Strahlungsenergie der Gammaquanten enthalten.

Physikalisch-technische Voraussetzungen der Kernspaltung 69

(gesteuerte Kettenreaktion)

Die praktische Nutzung der bei der Kernspaltung freiwerdenden Energie in einem Kernreaktor erfordert das Erfüllen folgender Bedingungen:

1. Es muß ein **geeigneter Kernbrennstoff** vorhanden sein. Das bedeutet, daß dieser Kernbrennstoff spaltbare Nuklide enthalten muß (z. B. $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$) und daß in ihm eine Kettenreaktion ablaufen kann. ^{235}U ist zu einem geringen Anteil (0,7 %) im natürlichen Uran enthalten. Der restliche Anteil besteht aus ^{238}Uran. Die Kerne des ^{238}Uran fangen Neutronen ein und behindern dadurch den kontinuierlichen Ablauf der Kernspaltung. Deshalb reichert man das natürliche Uran meist künstlich mit ^{235}Uran an.

2. Es müssen **Moderatoren zum Abbremsen** der bei der Spaltung freiwerdenden schnellen Neutronen vorhanden sein. „Langsame" (thermische) Neutronen mit Geschwindigkeiten der Größenordnung $v \approx 500\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ sind zur Auslösung der Kernspaltung sehr viel wirksamer als schnelle Neutronen. Moderatoren sind Stoffe aus leichten Atomen oder Molekülen wie etwa Wasser, schweres Wasser (Deuterium), Kohlenstoff oder Beryllium. Bei elastischen Zusammenstößen mit den leichten Kernen des Moderators geben die

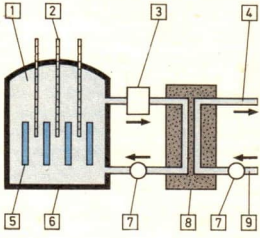
schnellen Neutronen den größten Teil ihrer kinetischen Energie ab.

3. Es muß eine bestimmte **Mindestmasse an spaltbarer Substanz** vorhanden sein, um eine Kettenreaktion einzuleiten. Diese Mindestmasse heißt **kritische Masse**. Ist die Masse an spaltbarer Substanz zu gering, so entweichen viele Neutronen aus der spaltbaren Substanz, ohne einen Kern getroffen zu haben. Die kritische Masse des eingesetzten Urans hängt wesentlich von dessen Anreicherungsgrad ab. Durch sogenannte Neutronenreflektoren kann die kritische Masse erheblich verkleinert werden. Jeder Reaktor wird überkritisch angelegt.

4. **Die Steuerung der Kettenreaktion** erfolgt im Reaktor durch verschiedene Faktoren. Dazu gehören der Einsatz von Steuer- und Regelstäben, die Wirkung der sogenannten „verzögerten" Neutronen, der Einfluß der Reaktortemperatur auf die Neutronenabsorption und der Neutroneneinfang der Spaltprodukte. Die Steuer- und Regelstäbe bestehen aus stark neutronenabsorbierenden Stoffen (Bor und Kadmium), die mehr oder weniger weit in den Reaktorkern hineingeschoben oder aus ihm herausgezogen werden. Dabei ist zu beachten, daß eine Kettenreaktion in weniger als 10^{-3} Sekunden abläuft. Daher reagiert eine automatische Regelung durch versenkbare Regelstäbe viel zu langsam. Diese Schwierigkeit wird durch folgende Besonderheit des Spaltungsvorganges überwunden. Neben den bei jeder Spaltung entstehenden „prompten" Neutronen liefern die hoch radioaktiven Spaltprodukte 10 bis 20 Sekunden später noch „verzögerte" Neutronen. Sind die Regelstäbe so eingestellt, daß die Neutronenzahl konstant bleibt, so sind auch die verzögerten Neutronen an der dann ausgeglichenen Neutronenbilanz beteiligt. Damit kann die Neutronenproduktion nicht in Bruchteilen einer Sekunde sprunghaft ansteigen, sondern erst nach einer gewissen Verzögerungsfrist, so daß der automatische Steuerungsmechanismus wirksam werden kann.

5. Jeder Reaktor benötigt ein **Kühlmittel**, um die bei der Spaltung der Urankerne entstehende Wärme abzuleiten und technisch zu nutzen. Dieses Kühlmittel (z. B. Wasser, schweres Wasser, flüssiges Natrium) darf die Neutronenbilanz nicht stören, d. h., nicht zu viele Neutronen absorbieren.

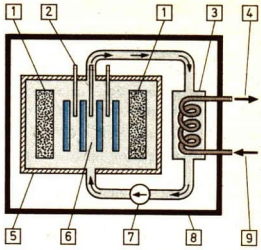
Geeignete Reaktoren zur Nutzung der bei der Spaltung freiwerdenden Energie sind **Druck- und Siedewasserreaktoren** (Bild 138/1). Da bei der Kernspaltung nicht nur Neutronenströme sehr hoher Dichte, sondern auch andere höchst schädliche Strahlen, z. B. Gammastrahlen, entstehen, muß der Reaktor durch einen dicken Schutzmantel (Schwerbeton) nach außen gut abgeschirmt werden.
Während die bisher besprochenen Spaltungsreaktoren lediglich Energie liefern, sind die sogenannten Brutreaktoren dazu bestimmt, neben der Energiegewinnung auch spaltbares Material herzustellen. Dabei versteht man unter Brüten die



138/1 Schema eines Druckwasserreaktors
1 – gewöhnliches Wasser
2 – Regelstäbe
3 – Druckerzeuger
4 – Wasserdampf
5 – Uranstäbe
6 – Strahlenschutz
7 – Pumpe
8 – Wärmeaustauscher
9 – Speisewasser

1964 wurde in Nowoworonesh am Don solch ein Reaktor erstmals in Betrieb genommen. Seine Vorteile liegen darin, daß gewöhnliches Wasser als Moderator und auch als Kühlmittel und Energieträger zur Ableitung der Wärme aus dem Reaktor verwendet wird. Außerdem fließt das Wasser nicht in besonderen Druckrohren, sondern es füllt unmittelbar den Reaktorkessel zwischen den Brennstäben. Nach Inbetriebnahme des 5. Reaktorblockes im Kernkraftwerk Nowoworonesh hat dieses größte Druckwasserreaktor-Kernkraftwerk der Erde 1980 eine Leistung von 2500 MW (elektrisch) erreicht.

Herstellung von Spaltstoff (Plutonium) aus nichtspaltbaren Nukliden wie z. B. ^{238}Uran und ^{232}Thorium. Nutzt man nun die bei der Kernspaltung freiwerdenden **schnellen** Neutronen zur Herstellung des spaltbaren Materials aus, so spricht man von **schnellen Brutreaktoren** (Bild 139/1).



139/1 Schema eines schnellen Brutreaktors
1 – Brutzone
2 – Regelstäbe
3 – Wärmeaustauscher
4 – Wasserdampf
5 – Graphitreflektor
6 – Spaltzone
7 – Pumpe für Flüssigmetall-Kreislauf
8 – Strahlenschutz
9 – Speisewasser

Den Kern des Reaktors bildet die Spaltzone, die das spaltbare Material (^{235}Uran, ^{239}Plutonium) enthält. Hier entstehen durch Kernspaltung Wärme und die zum Brüten erforderlichen schnellen Neutronen, die in die Brutzone dringen und dort die Kernumwandlungen bewirken. Die entstehenden Brutprodukte müssen in gewissen Abständen aus dem Reaktor entfernt und aufgearbeitet werden. Da der Brutreaktor mit schnellen Neutronen arbeitet, ist ein Moderator nicht erforderlich. Als Kühlmittel verwendet man flüssiges Natrium, um die Neutronen nicht zu bremsen. Die Steuerung dieser Reaktoren ist komplizierter als bei thermischen Reaktoren. Erste Brüter-Kraftwerke wurden in Schewtschenko (UdSSR) und in Marcoule (Frankreich) gebaut.

Die Kernfusion 70

Bei der Diskussion der Kernbindungsenergiekurve wurde bereits auf die grundsätzliche Möglichkeit der Energiefreisetzung durch Verschmelzung leichter zu mittelschweren Kernen hingewiesen (Bild 135/1).

Da die Bindungsenergiekurve im Bereich der leichten Kerne sehr steil ansteigt, kann man bei der Fusion leichtester Kerne zu mittelschweren Kernen eine besonders große Energiefreisetzung erwarten.

Eine genaue Massenbilanz der Kernverschmelzungsreaktion

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{3}_{1}\mathrm{T} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n} + E_B \text{ (freiwerdende Energie)}$$

zeigt folgende Ergebnisse. Die kinetische Energie der Fusionspartner bleibt bei dieser Bilanz unberücksichtigt.

Ruhmassen vor der Kernfusion m_{0A}	Ruhmassen nach der Kernfusion m_{0E}
$^{3}_{1}\mathrm{T}$: $m_{0T} = 3{,}0163$ u	$^{4}_{2}\mathrm{He}$: $m_{0He} = 4{,}00278$ u
$^{2}_{1}\mathrm{D}$: $m_{0D} = 2{,}0135$ u	$^{1}_{0}\mathrm{n}$: $m_{0n} = 1{,}00898$ u
$\sum m_{0A} = 5{,}0298$ u größer als	$\sum m_{0E} = 5{,}0118$ u

$$\Delta m_{0A} = \sum m_{0A} - \sum m_{0E} \qquad E_B = \Delta m_0 \cdot c^2$$

$$\Delta m_0 = 5{,}0298\ \mathrm{u} - 5{,}0118\ \mathrm{u} \qquad E_B = 0{,}018\ \mathrm{u} \cdot 931{,}44\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{u}}$$

$$\underline{\underline{\Delta m_0 = 0{,}018\ \mathrm{u}}} \qquad \underline{\underline{E_B = 16{,}8\ \mathrm{MeV}}}$$

Bei allen Kernfusionen müssen die zu verschmelzenden Atomkerne gegen die elektrostatische Abstoßung ihrer positiven Ladungen einander so weit genähert werden, daß die Kernkräfte die Abstoßungskräfte übertreffen. Es gibt zwei Möglichkeiten, den Atomkernen die zur Herbeiführung von Fusionen erforderliche Energie zu erteilen.

Erstens können die Fusionspartner durch Teilchenbeschleuniger auf die notwendige Energie gebracht werden. Dadurch ist jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Einzel-Kern-

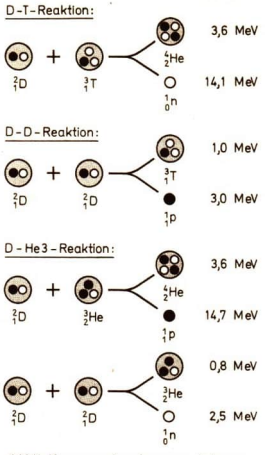
verschmelzungen erreichbar, da im Unterschied zur Kernspaltung keine Kettenreaktion stattfindet. Dieses Verfahren ist zur Freisetzung nutzbarer Energie nicht geeignet. Es leistet jedoch in der Forschung hervorragende Dienste.
Zweitens können den Fusionspartnern durch Temperaturerhöhung die erforderlichen Energien erteilt werden. Dies geschieht z. B. in der Sonne und in anderen Sternen. ①

Eine Verschmelzung leichter Atomkerne infolge ihrer Wärmebewegung (**thermonukleare Reaktion**) ist bei Temperaturen in der Größenordnung von 10 bis 100 Millionen Kelvin zu erwarten.

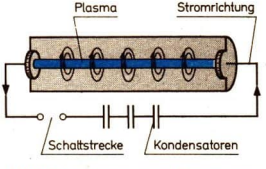
Physikalisch-technische Voraussetzungen einer gesteuerten Kernfusion 71

Die Realisierung der Kernfusion als Grundlage der Energiegewinnung hängt vor allem von der Lösung folgender Probleme ab:

- Es muß ein **geeigneter Brennstoff** vorhanden sein. Deuterium erweist sich dabei als günstiger Ausgangsstoff, da für Deuteriumkerne die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Kernfusion wesentlich größer als bei Wasserstoffkernen ist. Von den verschiedenen möglichen Reaktionen werden die im Bild 140/1 dargestellten Reaktionen bei der Erprobung bevorzugt.
- Die Ausgangsstoffe müssen aufgeheizt werden, um den Deuteriumkernen die zur Fusion notwendige kinetische Energie zu erteilen. Die schnelle Aufheizung der Ausgangsstoffe bereitet heute immer noch Schwierigkeiten. Eine der bekanntesten Methoden zur Aufheizung ist das magnetische Pumpen. Durch periodische Veränderung des Magnetfeldes wird das Plasma (Ausgangsstoffe sind vollionisiert) rhythmisch komprimiert und ausgedehnt. Hierdurch wird die Temperatur des Plasmas stark erhöht. Zur Zeit scheint es, daß die Aufheizung des Plasmas durch Laserblitze von Riesenimpulslasern erfolgversprechend ist.
- Damit ausreichend viele Zusammenstöße der Kerne in der Zeiteinheit stattfinden können, muß das Plasma eine relativ hohe Teilchendichte (10^{14} cm^{-3}) haben. Zum Vergleich: Gase haben unter Normalbedingungen eine Teilchendichte von etwa 10^{19} cm^{-3}. Außerdem muß die geforderte Temperatur und Teilchendichte über eine genügend lange „Einschlußzeit" im Plasma aufrechterhalten werden. Eine positive Energiebilanz (e[illegible]tormer Prozeß) ist erst zu erwarten, wenn bei $T \approx 10$ [illegible] Produkt aus Einschlußzeit und Teilchendichte den Wert 10^{14} s · cm^{-3} überschreitet (Lawson-Kriterium).
- Da bei den extrem hohen Temperaturen jedes das Plasma umschließende Gefäß sofort zerstört werden würde und da bei einer Berührung mit einer Gefäßwand durch den Aufprall der Kerne ständig Energie verlorenginge, muß das



140/1 Kernverschmelzungsreaktionen, die für die Energiefreisetzung von Bedeutung sind



140/2 Die Isolation eines Plasmas kann im Prinzip durch ein Magnetfeld von geeigneter Form und Stärke erreicht werden („Magnetische Flasche"). Man geht dazu von der bekannten Erscheinung aus, daß jeder elektrische Strom von einem Magnetfeld umgeben wird, das den Leiter konzentrisch umschließt. Schickt man nun durch ein Rohr, in dem das heiße Plasma enthalten ist, einen starken Strom (Stoßentladung einer Batterie von Kondensatoren), so bildet sich um die Gassäule ein starkes magnetisches Feld, dessen Feldkräfte einen zur Achse des Zylinders gerichteten Druck auf die Gassäule ausüben und sie dadurch zusammenschnüren.

heiße Plasma völlig von seiner Umgebung isoliert werden (Bild 140/2).

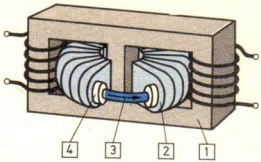
Schließt man das Plasma in eine geschlossene ringförmige Röhre ein, die zugleich die einzige Sekundärwindung eines großen Transformators bildet, so kann das Plasma vollständig von den Wänden des Gefäßes isoliert werden. Der Strom in dem Plasmaschlauch wird nun durch die Primärspulen erregt (induziert). Auf diesen physikalischen Grundlagen arbeitet das sowjetische Großversuchsgerät „Tokamak" (Bild 141/1). Besonders problematisch sind jedoch die als Plasmainstabilitäten bezeichneten Erscheinungen. Bei ihnen wird durch die Wechselwirkung von Magnetfeld und Plasma der magnetische Feldverlauf plötzlich so verformt, daß ein Teil des Plasmas aus der magnetischen Falle ausbricht.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Energiegewinnung aus gesteuerten Kernfusionen erfordern sehr große materielle und personelle Aufwendungen. Bei der Erforschung der Kernfusion für die friedliche Energiegewinnung erfolgt ein internationaler Erfahrungsaustausch zwischen den Forscherkollektiven.

Trotz der beträchtlichen Kosten und der Umweltbelastungen, die einer unbegrenzten Energiebereitstellung immer entgegenstehen, wird in Zukunft die Menschheit über eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle verfügen. Das als Ausgangsstoff benötigte Deuterium ist auf der Erde bzw. in den Ozeanen in riesigen Mengen vorhanden (etwa 0,016 % im natürlichen Wasser), und es kann in Isotopentrennanlagen daraus gewonnen werden. ②

Man hat berechnet, daß in den Ozeanen so viel „schweres Wasser" (D_2O) enthalten ist, daß daraus 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 solche Energiemengen liefern, daß ein einziges Kraftwerk mehrere Länder bei sinnvoller Verbrauchsplanung mit elektrischer Energie versorgen kann.

Es ist 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 Wohlstand für alle Menschen bringen – sie kann aber auch zur völligen Zerstörung der Umwelt und zum Untergang der Menschheit führen. Die Verantwortung für eine Verhinderung des Mißbrauchs tragen deshalb alle Völker.



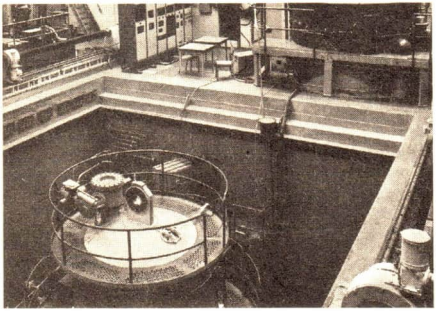
141/1 Ringförmige Plasmaversuchsanlage nach dem Tokamak-Prinzip für Untersuchungen zur Kernfusion
1 Transformator, 2 Hauptfeldspule, 3 Plasma, 4 Vakuumgefäß
Mit der in der Sowjetunion entwickelten Kernfusionsanlage Tokamak wurden die bisher besten Ergebnisse erzielt. Anfang des Jahres 1976 wurde im Kurtschatow-Institut in Moskau in der Anlage Tokamak-10 eine thermonukleare Reaktion von bisher nicht erreichter Stabilität (Einschlußzeit 50 ms) und Intensität ausgelöst.

141/2 In der DDR wird wie in vielen Industriestaaten die Nutzung der Kernenergie für die Energieversorgung der Zukunft vorbereitet. Kernenergie-Kraftwerke werden vornehmlich im Norden unserer Republik aufgebaut (Rheinsberg, bei Greifswald (unser Bild), Stendal).

---

① Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen der mittleren kinetischen Energie der Teilchen eines Körpers und seiner Temperatur!

② Erörtern Sie Probleme der Energiegewinnungskosten, der Umweltbelastung und der Gefahren bei der Lagerung der radioaktiven Abfallprodukte bei der Kernenergiegewinnung!



Gültigkeit der Erhaltungssätze bei kernphysikalischen Reaktionen

In der klassischen Physik wurden einige grundlegende Erfahrungssätze als Erhaltungssätze formuliert. Sie sagen aus, daß in einem abgeschlossenen physikalischen System eine bestimmte physikalische Größe, z. B. Energie, Impuls, Ladung usw., erhalten bleibt.
Da es praktisch unmöglich ist, ein System völlig 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 sehr fruchtbar und erkenntnisfördernd erwiesen. Erst mit ihrer Hilfe konnte die große Anzahl der Erfahrungen erschlossen, systematisiert und durch einfache Gesetze quantitativ beschrieben werden.
Alle Erhaltungssätze sind reine Erfahrungssätze, deren Gültigkeit nur so lange gesichert ist, wie keine zuverlässigen Experimente zu widersprüchlichen Aussagen führen. Es hat sich gezeigt, daß die genannten Erhaltungssätze der klassischen Physik auch bei kernphysikalischen Prozessen gelten. Am Beispiel der Kernspaltung soll die Gültigkeit des Energie-, Ladungs- und Impulserhaltungssatzes nachgewiesen werden.

Der Energieerhaltungssatz

72

Bei der Anwendung des Energieerhaltungssatzes im kernphysikalischen Bereich sind alle Energien zu berücksichtigen, auch die der Ruhmasse zugeordnete äquivalente Energie. Betrachtet man den Ablauf einer Kernspaltung in einem System, das bezüglich Energieaustauschprozessen abgeschlossen ist, so muß die Gesamtenergie erhalten bleiben, d. h., Anfangs- und Endenergie des Systems sind einander gleich. Die Ausgangs- und Endprodukte (-energien) einer Kernspaltung lassen sich experimentell exakt bestimmen (Tabelle S. 136).

Reaktion: $^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{143}_{56}Ba + ^{90}_{36}Kr + 3(^{1}_{0}n) + E_B$

Energiebilanz:

$$(m_{0n} + m_{0U}) \cdot c^2 = (m_{0\,Ba} + m_{0Kr} + 3m_{0n}) \cdot c^2 + E_B$$

$$236{,}0528\ u \cdot c^2 = 235{,}8394\ u \cdot c^2 + 199\ MeV$$

$$\underline{\underline{219869\ MeV}} = \underline{\underline{219869\ MeV}}$$

Der Ladungserhaltungssatz 73

Da die Atomkerne aus Elementarteilchen (Nukleonen) aufgebaut sind, spielt bei Kernumwandlungen (Kernspaltung) der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung eine besondere Rolle. Auch hier zeigt sich die dialektische Einheit von Erhaltung und Umwandlung: Die Teilchen (Nukleonen) sind nicht unveränderlich, sie können sich wechselseitig ineinander umwandeln. Wesentliche Größen, wie z. B. die Ladung, bleiben bei diesen Umwandlungsprozessen erhalten, wie die folgende Reaktionsgleichung zeigt.

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{143}_{56}Ba + ^{90}_{36}Kr + 3(^{1}_{0}n) + E_B$$

$$0 + 92 = 56 + 36 + 0$$

$$\underline{\underline{92 = 92}}$$

Der Impuls- und Energieerhaltungssatz 74

Bei der Auswahl geeigneter Moderatoren für die Bremsung schneller Neutronen wird der Impuls- und Energieerhaltungssatz berücksichtigt. Die Energieübertragung bei Zusammenstößen zwischen Neutronen und Atomkernen des Moderators ist um so größer, je weniger sich die Masse des Moderatoratomkerns von der Neutronenmasse unterscheidet. Wenn beide Massen gleich groß sind und der Zusammenstoß zentral erfolgt, so wird sogar die gesamte Energie des schnellen Neutrons auf den Kern des Moderators übertragen. Mit Hilfe des Impuls- und Energieerhaltungssatzes kann diese Aussage bestätigt werden.

Für den elastischen Stoß gilt:

– der Impulserhaltungssatz:

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m_1 \cdot \vec{u}_1 + m_2 \cdot \vec{u}_2 \qquad (161)$$

– der Energieerhaltungssatz:

$$\tfrac{1}{2}m_1 \cdot v_1^2 + \tfrac{1}{2}m_2 \cdot v_2^2 = \tfrac{1}{2}m_1 \cdot u_1^2 + \tfrac{1}{2}m_2 \cdot u_2^2 \qquad (162)$$

Dabei bedeuten m_1 die Masse des Neutrons, m_2 die Masse des Moderatoratomkerns, v_1 und v_2 ihre Geschwindigkeiten vor dem Stoß, u_1 und u_2 ihre Geschwindigkeiten nach dem Stoß. Um die Geschwindigkeiten der beiden Stoßpartner nach dem Stoß zu bestimmen, muß man die Gleichungen (161, 162) nach u_1 und u_2 auflösen. Es ergibt sich

$$u_1 = \frac{2m_2 \cdot v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad u_2 = \frac{2m_1 \cdot v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}.$$

Für $m_1 = m_2$ und $v_2 = 0$ ergibt sich dann

$$\underline{\underline{u_1 = 0}} \qquad \underline{\underline{u_2 = v_1}}.$$

Das bedeutet, daß das Neutron (m_1) nach dem Stoß zur Ruhe kommt und der Moderatoratomkern (m_2) sich mit der Geschwindigkeit des Neutrons weiterbewegt. Somit hat der Moderatoratomkern die gesamte kinetische Energie des Neutrons übernommen. Daraus folgt, daß besonders leichte Atomkerne (wasserstoffhaltige Substanzen) zur Abbremsung von Neutronen und damit zum Schutz gegen Neutronenstrahlen geeignet sind. ①

Mit diesen Beispielen ist belegt worden, daß physikalische Vorgänge im Bereich der Kernphysik nicht im Widerspruch zu den Erhaltungssätzen der klassischen Physik 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.

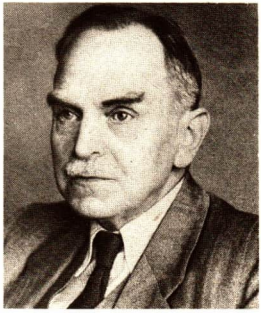
2. Wegen der universellen Gültigkeit der Erhaltungssätze wird bei jeder neuen physikalischen Hypothese und bei jeder Modellvorstellung zunächst geprüft, ob sie im Widerspruch zu den Erhaltungssätzen stehen.

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).
Die Erhaltungssätze werden helfen, die Frage nach der Existenz von fundamentalen Elementarteilchen, aus denen die uns heute bekannten Teile der Atome aufgebaut sind, zu beantworten.

Kernforschung in kapitalistischen Ländern 75

Die von O. Hahn und seinem Mitarbeiter F. Straßmann im Jahre 1938 experimentell gewonnene Erkenntnis, daß Urankerne durch langsame Neutronen gespalten werden können, sowie die Deutung dieses Prozesses hinsichtlich seiner energetischen Konsequenzen durch Hahns langjährige Mitarbeiterin L. Meitner und den Physiker O. Frisch eröffneten den Weg zur Erschließung und Beherrschung der Kernenergie.
F. Joliot-Curie, der bereits 1934 den Nobelpreis gemeinsam mit seiner Frau I. Joliot-Curie für die Erzeugung künstlicher radioaktiver Nuklide erhalten hatte, konnte 1939 den Nachweis führen, daß bei der Kernspaltung des Urans zusätzliche Neutronen frei werden, die unter bestimmten physikalischen Bedingungen ihrerseits wieder Urankerne spalten können (Kettenreaktion).

Von diesen Erkenntnissen ausgehend bis zur technischen Nutzung der neuen Energiequelle waren aber noch sehr viele Probleme zu lösen, an denen bedeutende Forscher aus vielen Nationen gearbeitet haben. Die politischen und gesellschaftlichen Verhältnisse führten im Verlaufe des 2. Weltkrieges



144/1 Otto Hahn (1879 bis 1968)

dazu, daß zunächst die Atombombe entwickelt und die Kernspaltung zur Vernichtung von 400000 Menschenleben mit zwei Atombomben benutzt wurde (Abwurf einer Uranbombe durch US-amerikanische Flieger am 6. August 1945 auf Hiroshima und einer Plutoniumbombe am 9. August 1945 auf Nagasaki).

Diese nach der vernichtenden Niederlage des deutschen und italienischen Faschismus strategisch völlig sinnlose militärische Anwendung einer bedeutenden physikalischen Entdeckung bewirkte aber auch, daß vielen Wissenschaftlern die große Verantwortung bewußt wurde, die sie für die Nutzung ihrer Erkenntnisse tragen.

So haben O. Hahn, F. Straßmann, A. Einstein, M. Born, F. Joliot-Curie und andere Wissenschaftler aus kapitalistischen Staaten in zahlreichen Aufrufen auf die ungeheuren Gefahren des Mißbrauches der Kernenergie hingewiesen, und sie haben gezeigt, daß von der richtigen Anwendung der neuen Energiequelle das Überleben der Menschheit abhängt. Ihrem Beispiel folgend, haben zahlreiche anerkannte Wissenschaftler, darunter mehrere Nobelpreisträger, auf das ungeheure Risiko eines nuklearen Wettrüstens aufmerksam gemacht. Sie haben eindringlich vor der Fortsetzung der Kernwaffenversuche in der Atmosphäre und auf den Weltmeeren gewarnt. Auch persönliche Anfeindungen und Verleumdungen durch imperialistische Politiker und Vertreter der Rüstungsindustrie konnten sie nicht zum Schweigen veranlassen.

Sie haben betont, daß der Wissenschaftler heute eine doppelte Verantwortung trägt:

Erstens hat er die überlieferte Aufgabe, neue Erkenntnisse zu finden, zweitens hat er die Aufgabe, vordringlich die friedliche Nutzung der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu fördern und die für das Wohl ihrer Völker Verantwortlichen über die Folgen eines Mißbrauches aufzuklären und diesen Mißbrauch zu verhindern. F. Joliot-Curie hat als Präsident des Weltfriedensrates seine ganze wissenschaftliche Autorität und seine Kraft für diese hohen Ziele eingesetzt. Er wurde dafür u. a. mit dem Lenin-Friedenspreis ausgezeichnet.

145/1 Frédéric Joliot-Curie (1900 bis 1958)

Nutzbarmachung der Kernenergie in der Sowjetunion 76

Die Entwicklung der Kerntechnik ist untrennbar verbunden mit dem sowjetischen Kernphysiker Igor Wassiljewitsch Kurtschatow. Sein größtes Verdienst besteht darin, daß unter seiner Leitung das amerikanische Atomwaffenmonopol in kürzester Zeit gebrochen wurde. Parallel zu den Arbeiten von Fermi und Hahn führte Kurtschatow mit seinem Kollek-

① Warum wird ein Neutronenstrahl durch eine Bleischicht viel weniger abgebremst als durch eine gleich dicke Wasserschicht?

tiv ebenfalls seit 1934 Experimente zu neutroneninduzierten Kernreaktionen durch. Diese zielgerichtete Forschung führte dazu, daß die Sowjetunion bis zum Ausbruch des 2. Weltkrieges in die Reihe der führenden Länder auf dem Gebiet der Kernforschung vorstieß. Der Überfall des faschistischen Deutschlands auf die Sowjetunion unterbrach aber diese Arbeiten. Kurtschatow war zeitweise an der Entwicklung von Abwehrwaffen beteiligt und half so mit, seine Heimat zu verteidigen.

Die Sowjetregierung verfügte seit 1942 bereits über Informationen, daß in den USA unter strengster Geheimhaltung intensiv an einer neuen Waffe mit gewaltiger Wirkung gearbeitet wurde. Noch während des Krieges wurde von der sowjetischen Regierung das Projekt der Schaffung einer Uranbombe beschlossen und Kurtschatow mit der Leitung beauftragt. Zunächst wurde der Bau eines Kernreaktors und parallel dazu die Ausarbeitung von Verfahren für die Isotopentrennung in Angriff genommen. Im Frühjahr 1946 wurde der erste europäische Forschungsreaktor in Moskau eingeweiht. Elf Jahre später schrieb Kurtschatow: „Ich erinnere mich an die Erregung, die mich und meine Mitarbeiter erfaßt hatte, als es uns gelungen war, zum erstenmal auf dem europäischen Kontinent eine Kettenreaktion in einem Uran-Graphit-Reaktor zu verwirklichen.

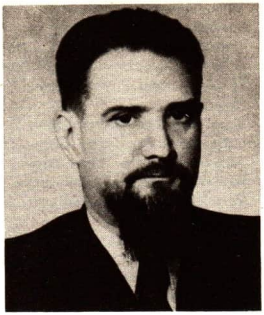
In erster Linie wurden die grenzenlosen Kernkräfte auf die Herstellung einer verheerenden Waffe gerichtet.

Ich war jedoch wie alle sowjetischen Wissenschaftler davon überzeugt, daß der gesunde Menschenverstand siegen würde und die Zeit nicht fern war, wo man das kostbare ^{235}Uran und Plutonium für Atomtriebwerke friedlicher Schiffe und Flugzeuge, für Kraftwerke, die in die Wohnungen der Menschen Licht und Wärme bringen, verwenden würde."

Ende 1946 ging es jedoch noch nicht um die friedliche Nutzung der Kernenergie, denn reaktionäre Kreise in den USA riefen offen zum Atomkrieg gegen die Sowjetunion auf. Deshalb mußte als Gegengewicht in kürzester Frist die eigene Kernspaltungsbombe geschaffen werden. Weitere Kernreaktoren zur Plutoniumproduktion wurden in Betrieb genommen, und am 29. August 1949 fand in Ostsibirien unter der Leitung Kurtschatows der Test einer sowjetischen Kernspaltungsbombe statt. Das USA-Monopol war gebrochen und damit die Kriegsgefahr wesentlich verringert.

Die Errichtung des ersten Kernkraftwerkes der Welt 1954 in Obninsk bei Moskau zeigte der Welt den von der Sowjetunion beabsichtigten weiteren Weg zur friedlichen Ausnutzung der Kernenergie im Interesse der gesamten Menschheit.

Kurtschatow verkörpert das Vorbild eines sozialistischen Wissenschaftlers, der, vom tiefen Wissen um die gesellschaftlichen Zusammenhänge durchdrungen, seine ganze Kraft in den Dienst seiner Heimat stellte.



146/1 Igor Wassiljewitsch Kurtschatow (1903 bis 1960)

AUFGABEN

Mechanik

Kinematik von Translation und Rotation

1. Eine Kolbenpumpe hat einen Arbeitshub von 350 mm. Die Kurbelwelle rotiert mit 75 Umdrehungen je Minute. Berechnen Sie die maximale und die durchschnittliche Kolbengeschwindigkeit!

2. Bei einer Bewegung werden folgende Weg-Zeit-Werte ermittelt:

t in s	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
s in m	0,0	3,5	10,0	19,5	32,0	47,5

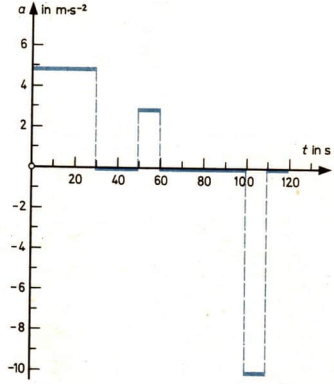
   a) Zeichnen Sie das Weg-Zeit-Diagramm!
   b) Nach dem Bild könnte man eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung vermuten. Bestätigen Sie das durch eine Rechnung, bestimmen Sie v_0 und a!
   (Anleitung: Einsetzen der Werte führt auf eine Anzahl Gleichungen mit den Unbekannten v_0 und a)

3. Ein Motorrad von 200 kg Gesamtmasse erhöht in 2,5 s seine Geschwindigkeit gleichmäßig von 45 km · h^{-1} auf 72 km · h^{-1}. Berechnen Sie:
   a) die Beschleunigung,
   b) die Beschleunigungsstrecke,
   c) die beschleunigende Kraft!

4. Ein Kraftfahrzeug fährt mit 40 km · h^{-1} und wird zum Stillstand abgebremst. Der Bremsweg beträgt 16 m. Berechnen Sie die Bremsdauer!

5. Aus einem 150 m tiefen Schacht fährt ein Förderkorb der Masse 2000 kg nach oben. Er wird innerhalb von 8,0 s auf eine Geschwindigkeit von 6,0 m · s^{-1} beschleunigt, hält diese Geschwindigkeit eine gewisse Zeit konstant und bremst schließlich in 5,0 s zum Stillstand ab.
   a) Berechnen Sie für Anfang und Ende jedes Teilabschnittes des Bewegungsablaufes den Ort und den Zeitpunkt. Berechnen Sie für jeden Abschnitt die Beschleunigung, die beschleunigende Kraft und die Zugkraft im Förderseil, wenn während der gesamten Bewegung eine konstante Reibungskraft von 1,2 kN angenommen wird!
   b) Stellen Sie Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung als Funktionen der Zeit grafisch dar!

6. Ein Triebwagen fährt mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 5 m · s^{-1}. Über seine Fahrt liegt für ein Intervall von 2 Minuten das Beschleunigung-Zeit-Diagramm vor (Bild 147/1). Zeichnen Sie das zugehörige Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm! Berechnen Sie die dazu erforderlichen Wertepaare!



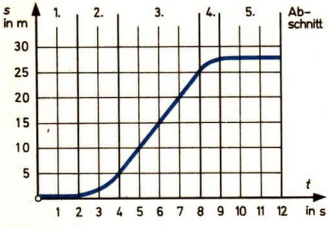
147/1

7. Im Ort-Zeit-Gesetz (36) sei $v_{0x} > 0$ und $a_x = -g$.
   a) Führen Sie eine Kurvendiskussion zu dieser Funktion für $t > 0$ aus, unterscheiden Sie dabei die Fälle $x_0 = 0$ und $x_0 > 0$!
   b) Welche physikalischen Aussagen sind aus den Extremwerten und den Nullstellen abzulesen?
   c) Bestimmen Sie für $x_0 = 0$ in den Nullstellen den Anstieg!
   Welche physikalische Aussage ergibt sich daraus?
   d) Begründen Sie aus dem physikalischen Sachverhalt, daß die Funktion keine Wendepunkte hat!
   e) Was ändert sich an den Ergebnissen der Aufgaben a) bis d) für $v_{0x} = 0$ und für $v_{0x} < 0$?

8. Zeichnen Sie im Intervall von 0 bis 6 s die Ort-Zeit-Diagramme und die Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme für den freien Fall sowie für den lotrechten Wurf aufwärts und abwärts mit Anfangsgeschwindigkeiten von 20 m · s^{-1} und von 50 m · s^{-1}!
(Setzen Sie $g = 10$ m · s^{-2})

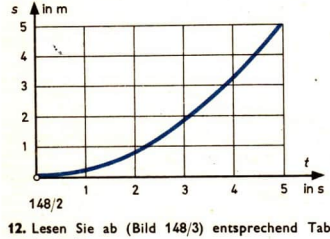
9. Stellen Sie die Geschwindigkeit v für die Aufgabe 8 als Funktion des Ortes grafisch dar!

10. Das Bild 148/1 zeigt das Weg-Zeit-Diagramm eines Bewegungsablaufes. Führen Sie die notwendigen Ablesungen und Berechnungen aus, und zeichnen Sie dazu das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm sowie das Beschleunigung-Zeit-Diagramm!



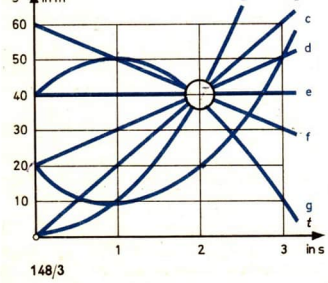
148/1

11. Das Diagramm 148/2 beschreibt die gleichmäßig beschleunigte Bewegung eines Körpers der Masse 10 kg. Bestimmen Sie aus dem Diagramm: Anfangs- und Endort der Bewegung, Anfangs- und Endgeschwindigkeit! Berechnen Sie die beschleunigende Kraft!



148/2

12. Lesen Sie ab (Bild 148/3) entsprechend Tabelle (rechts)!



148/3

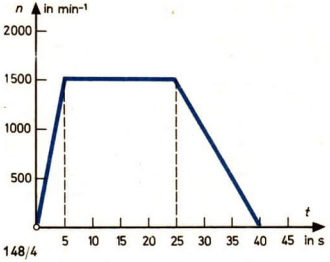
13. Wie viele Umdrehungen je Sekunde und je Minute macht das Triebrad einer Lokomotive vom Durchmesser 1,5 m bei einer Geschwindigkeit von 72 km · h^{-1}?

14. Ein Werkstück von 250 mm Durchmesser soll auf der Drehmaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von 80 m · min^{-1} bearbeitet werden. Berechnen Sie die Drehzahl!

15. Die zylindrische Seiltrommel eines Aufzuges hat einen Durchmesser von 750 mm und macht in 1 Minute 750 Umdrehungen.

a) Wie schnell bewegt sich das Aufzugsseil?

b) Der Aufzug ist über einen Flaschenzug mit 3 losen und 3 festen Rollen (6 tragende Seile) an dem Seil befestigt. Wie schnell bewegt sich der Aufzug?



148/4

16. Ein Drehzahlmesser zeigt den im Diagramm (Bild 148/4) dargestellten Bewegungsablauf einer Motorwelle.

a) Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Motorwelle im Bereich konstanter Drehzahl!

b) Berechnen Sie die Winkelbeschleunigung während des Anlaufens und während des Abbremsens!

	s_0 in m	v_0 in m · s^{-1}	s_2 in m	v_2 in m · s^{-1}	a in m · s^{-2}
a					
b					
c					
d					
e					
f					
g					

17. Ein Karussell von 9,5 m Durchmesser erreicht nach 4 Umdrehungen gleichmäßig seine volle Geschwindigkeit, bei der es für eine Umdrehung 6,5 s benötigt. Berechnen Sie:

a) Tangentialgeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und Radialbeschleunigung in voller Fahrt!

b) Winkelbeschleunigung und Tangentialbeschleunigung beim Anfahren!

18. Zur stroboskopischen Messung der Winkelgeschwindigkeit werden auf einem Kreisumfang in eine runde Pappscheibe 63 Löcher in gleichem Abstand eingestanzt. Durch diese Löcher fällt Licht auf eine Fotozelle, die mit einem Impulszähler verbunden ist.

a) Es werden in 1,0 s 10 Impulse gezählt. Berechnen Sie die Winkelgeschwindigkeit der Scheibe!

b) In welchem Verhältnis stehen Lochabstand und Radius des Lochkreises?

c) Erläutern Sie, wie die Anordnung zur Messung von Winkelgeschwindigkeiten genutzt werden kann!

19. Ein Schwungrad von 2000 mm Durchmesser wird in 24 s aus der Ruhe auf $n = 180\ \text{min}^{-1}$ gleichmäßig beschleunigt.

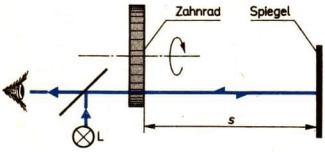
Berechnen Sie:

a) die erreichte Winkelgeschwindigkeit,

b) die Winkelbeschleunigung,

c) die erreichte Tangentialgeschwindigkeit am Umfang,

d) die Tangentialbeschleunigung!



149/1

20. Im Jahre 1849 führte Fizeau seine berühmt gewordene Messung der Lichtgeschwindigkeit aus (Bild 149/1). Das Licht aus einer Lichtquelle L wurde von einer Glasplatte durch die Lücke zwischen zwei Zähnen des Zahnrades auf einen $s = 8633$ m entfernten Spiegel reflektiert. Nach der Rückkehr vom Spiegel traf es in das Auge des Beobachters. Wenn das Zahnrad mit seinen 720 Zähnen 12,6 Umdrehungen in der Sekunde ausführte, wurde der rückkehrende Lichtstrahl vom folgenden Zahn abgedeckt.

Welchen Wert für c konnte Fizeau daraus berechnen?

21. Erläutern Sie verschiedene Methoden zur Messung von Geschwindigkeit und Beschleunigung!

22. Stellen Sie alle behandelten Gleichungen zusammen, welche die Winkelgeschwindigkeit enthalten. Entwickeln Sie daraus eine Übersicht von Möglichkeiten, die Winkelgeschwindigkeit zu messen. Als Meßgeräte stehen zur Verfügung: Meßstab, Bandmaß, Stoppuhr, Tachometer, elektronischer Digitalzähler mit mechanischen, optischen oder anderen Meßfühlern sowie mit Zeitschalter. Deuten Sie in jedem Falle das Meßverfahren an!

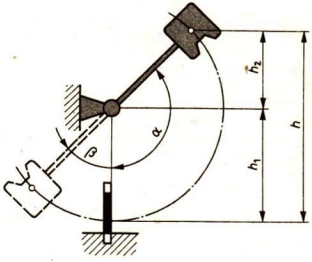
23. Ein Aufzug beginnt seine Bewegung aus der Ruhe, dann wird er gleichmäßig beschleunigt bis zu einem bestimmten Geschwindigkeitswert, hält diesen eine gewisse Zeit konstant und bremst dann gleichmäßig zur Ruhe ab. Skizzieren Sie sowohl für eine Auf- als auch für eine Abwärtsbewegung das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm!

24. Skizzieren Sie σ-t-Diagramme, ω-t-Diagramme und α-t-Diagramme von gleichförmigen und von gleichmäßig beschleunigten Rotationsbewegungen! Diskutieren Sie, wie sich unterschiedliche Beträge von σ_0, ω bzw. ω_0 und α auf die Diagramme auswirken! Beschreiben Sie dazu in jedem Falle den Bewegungsablauf in Worten! Nennen Sie Beispiele, wo derartige Bewegungen vorkommen!

25. Wie müßte im Bild 23/1 die Zugvorrichtung ausgeführt sein, wenn eine gleichförmige Bewegung erfolgen soll, und wie, wenn die Bewegung gleichmäßig beschleunigt abläuft?

Dynamik von Translation und Rotation

1. Wie groß ist die Rotationsenergie eines Pendelschlagwerkes, mit dem Werkstoffe auf Kerbschlagfestigkeit dadurch geprüft werden, daß der Pendelhammer (Bild 149/2) die Probe zerschlägt? Der Rest der kinetischen Energie des Hammers kann auf Grund des Pendelhammerausschlages errechnet werden.



149/2

Länge l des Pendelhammers 0,8 m; Masse m des Hammers 60 kg; Ausgangsstellung $\alpha = 130°$; Endstellung $\beta = 30°$. Bestimmen Sie

a) Rotationsenergie des Pendelhammers;
b) dem Pendelhammer verbliebene Rotationsenergie;
c) zum Zerschlagen der Probe aufgewendete Rotationsenergie. Der Hammer soll als Massepunkt betrachtet werden!

2. Beliebter Jongleurtrick ist das gleichzeitige Rotieren von möglichst vielen Tellern auf senkrecht stehenden biegsamen Stäben (Bild 150/1). Infolge der geringen Reibungskraft in dem punktförmigen Lager ist die negative Winkelbeschleunigung α sehr gering. Bei einem Tellerdurchmesser von 0,3 m, einer anfänglichen Umfangsgeschwindigkeit $v_1 = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ und einer geringsten Umfangsgeschwindigkeit $v_2 = 9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ beträgt für einen Teller die Winkelbeschleunigung
$\alpha = -0{,}515\ \mathrm{s^{-2}}$.

a) Wie lange kann der sich drehende Teller (Scheibe) sich selbst überlassen bleiben?
b) Wie verlängert sich infolge der Verwendung biegsamer Stäbe diese Zeit?

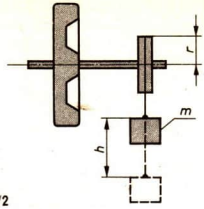
150/1

3. Eine Schleifscheibe mit einem Durchmesser von 360 mm und einer Breite von 50 mm hat eine zulässige Drehzahl $n = 1\,500\ \mathrm{min^{-1}}$. Die Dichte des als Vollzylinder zu betrachtenden Schleifscheibenkörpers ist $3{,}75\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$. Wie lange dauert das Beschleunigen der Schleifscheibe mit einem Motor von 1,1 kW bei einem Gesamtwirkungsgrad der Maschine von 0,75 (gleichmäßige Leistungsabgabe vorausgesetzt)? $t = 0{,}2\ \mathrm{s}$

4. Die Arbeitsspindel einer Werkzeugmaschine (Drehzahl $n = 650\ \mathrm{min^{-1}}$) hat ein Gesamtträgheitsmoment $J = 0{,}4\ \mathrm{kg \cdot m^2}$ und die Bremskraft der Maschinenbremse beträgt 27,4 N. Der Bremstrommeldurchmesser beträgt 180 mm. Wie lange dauert das Abbremsen bis zum Stillstand der Spindel?

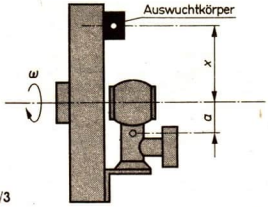
5. Wie groß ist das Trägheitsmoment des Rotationskörpers, wenn mit der im Bild 150/2 dargestellten Vorrichtung folgende Beträge gemessen werden?

$r = 300\ \mathrm{mm}$ $\quad m = 2{,}0\ \mathrm{kg}$
$h = 1{,}4\ \mathrm{m}$ $\quad t = 3{,}2\ \mathrm{s}$



150/2

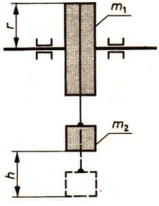
6. Auf der Planscheibe einer Plandrehmaschine ist asymmetrisch ein Werkstück der Masse 83 kg (einschließlich der Spannvorrichtung) befestigt (Bild 150/3). Der Abstand des Massepunktes dieses Werkstückes von der Drehachse beträgt $a = 235$ mm. Zum Auswuchten kann ein Körper der Masse 35 kg gegenüber dem Werkstückmassepunkt angeordnet werden. In welchem Abstand x von der Drehachse muß der Auswuchtkörper befestigt werden?



150/3

7. Wie groß ist die Bewegungsenergie einer auf einer Ebene rollenden homogenen Kugel der Masse m, der Geschwindigkeit v und der Winkelgeschwindigkeit ω?

8. Eine auf einer Achse drehbar gelagerte Scheibe der Masse m_1 und mit dem Radius r wird durch einen Körper der Masse m_2 beschleunigt gedreht (Bild 150/4).
Stellen Sie eine Gleichung auf zur Berechnung des von dem Körper während einer bestimmten Zeit t zurückgelegten Weges h!



150/4

9. Berechnen Sie die kinetische Energie eines drehbar gelagerten zylindrischen Körpers vom Radius 0,2 m und der Masse 44 kg, der mit konstanter Winkelbeschleunigung $\alpha = 0{,}2\ s^{-2}$ aus dem Zustand der Ruhe 8 Sekunden lang beschleunigt wurde!

10. Die Drehzahl der Schwungscheibe an der Töpferscheibe (Bild 24/1) mit der Masse 108 kg, dem Durchmesser 0,6 m und der Drehzahl 48 min^{-1} sinkt beim Formgebungsprozeß auf 28 min^{-1}.
Wieviel kinetische Energie konnte zum Formen des Werkstückes (einschließlich der Überwindung der Reibungskraft) genutzt werden?

11. Ein 13 mm-Geschoß der Masse 34 g verläßt beim Abschuß den 550 mm langen Lauf einer Flugzeug-Bordkanone mit einer Geschwindigkeit von 750 $m \cdot s^{-1}$. Dabei erhält das Geschoß eine Drehbewegung durch die in das Rohr eingearbeiteten Züge, die auf 1 m Länge eine Drehung des Geschosses um 0,3 Umdrehungen verursachen.
Wieviel Energie ist für das Erteilen der Rotation des Geschosses notwendig?

12. Ein Elektromotor erzeugt ein Drehmoment von 16,5 N · m.
Wie groß ist die Kraft, die am Umfang der auf der Motorachse befestigten Riemenscheibe von 180 mm Durchmesser angreift?

13. Einem Motor, der ein Drehmoment von 0,4 N · m erzeugt, ist ein Getriebe vorgelagert, das die Drehzahl des Motors auf den achten Teil verringert. Wie groß ist das Drehmoment, das man am Getriebeausgang erhält (Reibungsverluste bleiben unberücksichtigt)?

14. Skizzieren Sie folgende volumen- und massegleichen Körper ($\varrho = 7{,}8\ g \cdot cm^{-3}$), und vergleichen Sie deren Trägheitsmomente bei Rotation um ihre Längsachse!
a) Zylinder $r = 3$ cm, $h = 10$ cm
b) Zylinder $r = 5$ cm, $h = 3{,}6$ cm
c) Hohlzylinder $r_1 = 5$ cm, $r_2 = 4$ cm, $h = 10$ cm

15. Der Rotor einer Zentrifuge hat ein Trägheitsmoment von 0,45 $kg \cdot m^2$; er läuft mit einer Drehzahl von 13200 min^{-1}. Er wird durch eine konstante Bremskraft von 38 N verzögert, die am Umfang einer Bremstrommel von 100 mm Durchmesser angreift.
Nach welcher Zeit kommt der Rotor zum Stillstand?

16. Der homogene, zylindrische Rotor einer Zentrifuge mit der Masse von 18 kg hat einen Durchmesser von 280 mm. Der Antriebsmotor hat in der Anlaufphase ein durchschnittliches Drehmoment von 30 N · m.
Nach welcher Zeit hat der Rotor eine Drehzahl von $n = 24000\ min^{-1}$ erreicht?

Elektrodynamik-Felder

Elektrostatisches Feld

1. Welche Spannung ist nötig, um einem Elektron Schnellzuggeschwindigkeit (120 $km \cdot h^{-1}$) zu geben?

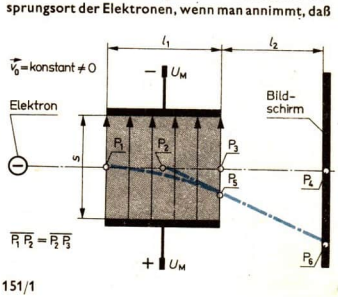
2. Berechnen Sie die Anziehungskraft zwischen Atomkern und Elektron des Wasserstoffatoms! Der Radius des Wasserstoffatoms beträgt $0{,}5 \cdot 10^{-10}$ m.

3. Leiten Sie unter Benutzung der Gleichung
$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot v^2}{2}$$
und Gleichungen aus der Mechanik weitere Gleichungen her, mit denen Beschleunigungen, zurückgelegte Wege, Zeiten u. a. bewegter Ladungen berechnet werden können!

4. An einer Fernsehbildröhre liegt zwischen Katode und Anode eine Spannung von 15 kV. Welche Geschwindigkeit hat ein Elektron beim Verlassen der Anode (vgl. Bild 55/1)? Wie lange braucht ein Elektron von der Anode zum Leuchtschirm (30 cm)?

5. Ein Körper mit einer Ladung von $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ C und einer Masse von 3,2 g befindet sich im homogenen elektrischen Feld eines Kondensators, dessen Platten horizontal angeordnet sind und den Abstand von 10 cm haben. Das elektrische Feld sei dem Gravitationsfeld so überlagert, daß der Körper zur Ruhe kommt. Wie groß ist die dazu erforderliche Kondensatorspannung?

6. In Bild 151/1 ist die Vertikalablenkung des Elektronenstrahls in der Katodenstrahlröhre eines Oszillografen dargestellt.
(v_0 – Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen)
Liegt am Plattenkondensator keine Spannung ($U_M = 0$), so erreichen die Elektronen auf dem Bildschirm den Ort P_4. Bei einer bestimmten Spannung U_M = konst $\neq 0$ erreichen die Elektronen auf dem Bildschirm den Ort P_6. Dabei ist P_2 aufgrund einer Gesetzmäßigkeit der scheinbare Ursprungsort der Elektronen, wenn man annimmt, daß



151/1

sich die Elektronen geradlinig von P_2 nach P_6 bewegen.
In einem konkreten Fall liegen folgende Angaben für eine Katodenstrahlröhre vor:
$v_0 = 10^7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $s = 5$ mm;
$l_2 = 250$ mm; $l_1 = 20$ mm

a) Begründen Sie den jeweiligen Verlauf der Bahnkurven des Elektrons ($\overline{P_1P_4}$, $\overline{P_1P_5}$ und $\overline{P_3P_6}$)! Beachten Sie dabei die jeweils am Elektron angreifende Kraft! Die Gravitationskraft wird vernachlässigt.
Begründen Sie, weshalb die Elektronen die Wege $\overline{P_1P_3}$ bzw. $\overline{P_1P_5}$ in der gleichen Zeit zurücklegen!

b) Berechnen Sie den Betrag der Feldstärke E des homogenen elektrischen Feldes des Plattenkondensators bei einer Meßspannung $U_M = 1$ V!

c) Berechnen Sie die Zeit t_1, in welcher ein einzelnes Elektron die Strecke $\overline{P_1P_3} = l_1$ zurücklegt!

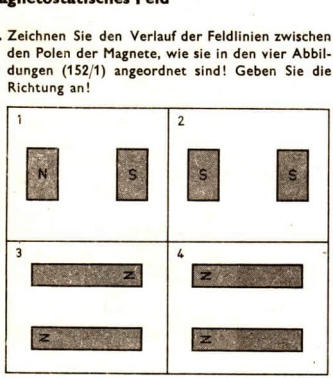
d) Berechnen Sie den Betrag der Feldkraft F_E, die bei $U_M = 1$ V an einem Elektron angreift, und den Betrag der zugehörigen, vertikal gerichteten Beschleunigung a_E!

e) Berechnen Sie für $U_M = 1$ V die Ablenkung des Elektronenstrahls $y_1 = \overline{P_3P_5}$ und $y_2 = \overline{P_4P_6}$!

7. Wie muß sich ein Elektron im elektrischen Feld bewegen, damit seine kinetische Energie im Verhältnis zum zurückgelegten Weg maximal wächst? Wie verläuft die Bahn eines Elektrons, das senkrecht zu den Feldlinien in ein homogenes elektrisches Feld eintritt?

Magnetostatisches Feld

1. Zeichnen Sie den Verlauf der Feldlinien zwischen den Polen der Magnete, wie sie in den vier Abbildungen (152/1) angeordnet sind! Geben Sie die Richtung an!



152/1

2. Ein gerader Leiter von 6 cm Länge wird von einem Strom der Stärke 3 A durchflossen. Der Leiter befindet sich vollständig in einem homogenen magnetischen Feld mit der magnetischen Flußdichte $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ T und ist rechtwinklig zu den Feldlinien orientiert. Welche Kraft wirkt auf den Leiter?

3. In einer Luftspule mit 1000 Windungen, einer Länge von 5 cm und einem Widerstand von 50 Ω soll ein magnetisches Feld mit einer magnetischen Flußdichte von $1{,}26 \cdot 10^{-2}$ T erzeugt werden. Welche Spannung muß an die Spule gelegt werden?

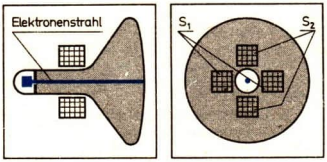
4. In einer eisenfreien Kastenspule beträgt die Stromstärke I und die magnetische Flußdichte im Inneren B. Wie ändert sich B, wenn drei solcher gleichartiger Spulen eng nebeneinander so gelegt werden, daß ihre Längsachsen auf einer Geraden liegen und bei Reihenschaltung der Spulen die Stromstärke I = konstant bleibt?

5. Ein Proton tritt mit der Geschwindigkeit $v_0 > 0$
a) in ein homogenes elektrisches Feld,
b) in ein homogenes magnetisches Feld ein.
Nennen Sie Bahnform und Bewegungsart des Protons, und unterscheiden Sie dabei jeweils folgende Fälle hinsichtlich des Eintritts des Protons in das Feld:
- parallel, aber entgegengesetzt zur Richtung der Feldlinien;
- parallel in gleicher Richtung zur Richtung der Feldlinien;
- senkrecht zur Richtung der Feldlinien!

6. Welche magnetische Flußdichte B muß ein Magnetfeld haben, damit ein mit 2000 V beschleunigtes Elektron auf eine Kreisbahn mit 10 cm Radius gezwungen wird?

7. Ein durch eine Spannung von 300 V beschleunigtes Elektronenbündel durchfliegt ein homogenes Magnetfeld auf kürzestem Wege. Die Breite des Feldes ist $l = 2{,}5$ cm. Wie groß muß die magnetische Flußdichte B sein, damit das Elektronenbündel um 45° aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird?

8. Um den Hals einer Fernsehbildröhre sitzen zwei Spulenpaare S_1 und S_2, zwischen denen jeweils ein Magnetfeld erzeugt wird (Bild 152/2).



152/2

Welches Spulenpaar bewirkt die Horizontalablenkung des Elektronenstrahls und welches die Vertikalablenkung?
Denken Sie sich anstelle der Spulenpaare die Platten eines Kondensators, zwischen denen ein elektrisches Feld erzeugt wird. (S_1 entspricht dann den Platten des Kondensators K_1.) Von welchem Kondensator wird der Elektronenstrahl horizontal abgelenkt?
Begründen Sie in beiden Fällen Ihre Aussagen und gehen Sie dabei auf Richtung und Betrag der Geschwindigkeit der Elektronen ein!

Elektromagnetisches Feld

1. Wie groß ist die Induktionsspannung an den Enden einer Spule von 1 500 Windungen und einer wirksamen Querschnittsfläche von 9 cm², wenn sich die magnetische Flußdichte durch die Spule innerhalb einer Sekunde linear von 0 auf 0,1 Tesla erhöht?
2. Wie groß muß die zeitliche Änderung der magnetischen Flußdichte sein, wenn an einer Spule von 100 cm² Querschnittsfläche und 1 000 Windungen eine Spannung von 10 Volt auftreten soll?
3. Wie groß ist die Selbstinduktionsspannung, die beim Ausschalten einer Spule der Induktivität 0,2 H auftritt, wenn die Stromstärke von 2 A innerhalb von 10^{-4} s linear auf Null absinkt?
4. Wie groß ist die Induktivität einer Luftspule von 8 cm Länge und einer mittleren Windungsfläche von 20 cm², die 1 500 Windungen besitzt?
5. Ein Kleinschweißtransformator ist für eine Betriebsspannung von 220 V konstruiert. Seine Primärwindungsanzahl beträgt 260, seine Sekundärwindungsanzahl 60.
Wie groß ist die Sekundärspannung bei unbelastetem Transformator?
6. Ein kleiner Induktionsschmelzofen für Forschungszwecke mit einer Leistung von 10 kW ist für den Betrieb mit 380 V Wechselspannung konstruiert und besitzt eine Primärwindungsanzahl von 250. Wie groß ist die maximale Stromstärke in der Schmelzrinne?

Elektrische Leitungsvorgänge

Leitungsvorgänge im zeitlich konstanten elektrischen Feld

1. Berechnen Sie für eine Leitung, durch die ein 1 200 m entferntes Objekt mit elektrischer Energie versorgt werden soll, den Querschnitt und die Masse, wenn der Gesamtwiderstand der Drähte 10 Ω betragen soll! Als Material ist a) Kupfer, b) Aluminium zugrunde zu legen.
2. Welche Leistung wird in der Leitung nach Aufgabe 1 in Wärme umgesetzt, wenn
a) 1 A b) 10 A c) 100 A d) 1 000 A
fließen?
3. Berechnen Sie die Stromstärke für folgende Glühlampen, wie sie im PKW üblich sind:
a) 6 V, 15 W; b) 6 V, 35 W;
c) 12 V, 5 W; d) 12 V, 45 W!
4. Welche Spannung herrscht zwischen den Punkten A und B eines elektrischen Feldes, wenn bei der Verschiebung einer Ladung $Q = 0{,}1\ \mathrm{A \cdot s}$ die Arbeit $W = 80\ \mathrm{W \cdot s}$ verrichtet wird?
5. Gegenüber einer Fotokatode befindet sich eine Anode mit einer Spannung $U = +30$ V.
a) Berechnen Sie die Arbeit, die das elektrische Feld an einem aus der Fotokatode mit sehr kleiner Geschwindigkeit austretenden Elektron verrichtet. Schließen Sie daraus auf die kinetische Energie und die Geschwindigkeit, die es erlangt!
b) Überlegen Sie, inwieweit sich Änderungen ergeben, wenn der Abstand Katode – Anode geändert wird,
die Austrittsgeschwindigkeit der Fotoelektronen unterschiedlich ist!
6. Wie kann man einen Widerstand $R = 320\ \Omega$ durch die Reihenschaltung zweier Widerstände ersetzen?
7. Bauelemente mit den Widerständen $R_1 = 12\ \Omega$ und $R_2 = 36\ \Omega$ werden parallelgeschaltet. Berechnen Sie den Gesamtwiderstand R_g!
8. Es wird ein Widerstand $R = 80\ \Omega$ gebraucht, aber es sind nur Bauelemente von 120 Ω aufwärts vorhanden. Kann man damit den benötigten Widerstand realisieren?
9. In einem Stromkreis seien zwei Widerstände R_1 und R_2 enthalten. Geben Sie die Bedingungen an, unter denen folgende Aussagen zutreffen:
$R_1 < R_g$, $R_2 > R_g$, $R_2 < R_g$, $R_g < R_1$,
$R_g = 2R_1$, $R_g = \frac{1}{2}R_2$!
10. Berechnen Sie die Stromstärke I im Widerstand R sowie die am Widerstand R herrschende Spannung U in den Schaltungen nach Bild 86/1 und Bild 86/2 unter folgenden Bedingungen (mit Rechenstabgenauigkeit):
$U_{AB} = 12$ V = konstant,
a) $R = 20\ \Omega$ $R_{MA} = 10\ \Omega$,
b) $R = 200\ \Omega$ $R_{MA} = 10\ \Omega$,
c) $R = 200\ \Omega$ $R_{MA} = 0{,}1\ \Omega$,
d) $R = 1\,000\ \Omega$ $R_{MA} = 1\ \Omega$!
11. Berechnen Sie die Gesamtstromstärke im Teilstromkreis AB nach Bild 86/1 und Bild 86/3 unter folgenden Bedingungen:
$U_{AB} = 12$ V = konstant,
a) $R = 500\ \Omega$ $R_{MV} = 500\ \Omega$,
b) $R = 500\ \Omega$ $R_{MV} = 100\ \mathrm{k\Omega}$!

12. An eine Spannungsquelle von $U = 20$ V sind zwei Bauelemente mit den Widerständen $R_1 = 8000\,\Omega$ und $R_2 = 2000\,\Omega$ in Reihe geschaltet. Es soll die am Widerstand R_1 auftretende Teilspannung gemessen und berechnet werden.
Berechnen Sie die Teilspannung unter folgenden Bedingungen:
a) Ohne den Spannungsmesser,
b) Mit Spannungsmesser an R_1, $R_{MV} = 20\,k\Omega$!

13. Bei Vielfachmessern mit mehreren Spannungsmeßbereichen findet sich oft eine Angabe z. B. wie folgt:
Innenwiderstand 20 kΩ/V.
Wie ist diese Angabe zu verstehen?

14. Berechnen Sie die Stromstärke folgender Haushaltgeräte, sämtlich für $U = 220$ V Wechselspannung ausgelegt:
Glühlampen 25 W, 40 W, 60 W, 100 W,
Tauchsieder 1000 W,
Heizkörper 500 W,
Boiler 1200 W,
Waschmaschine mit Heizung 2000 W,
Staubsauger 100 W!

15. Stellen Sie aus den Beispielen der Aufgabe 14 je 3 Kombinationen zusammen, bei denen die Sicherungen ansprechen a) Sicherung 6 A, b) Sicherung 10 A!

16. Berechnen Sie zu sechs Beispielen der Aufgabe 14 die Zeiten, für die die Betriebskosten jeweils 5 M betragen (Der Preis für 1 kWh beträgt 0,08 M)! Vergleichen Sie die Leistung der Geräte mit der körperlichen Leistung eines Menschen (50 bis 100 W)!

Leitungsvorgänge im elektrischen Wechselfeld

1. Zeichnen Sie ein X_C-f-Diagramm für einen Kondensator mit $C = 100$ nF für den Frequenzbereich 100 Hz bis 100 kHz! Wählen Sie eine zweckmäßige Teilung der Achsen!
2. Zeichnen Sie entsprechend der Aufgabe 1 ein Diagramm für eine Spule mit $L = 50$ mH!
3. Gegeben sei ein Kondensator mit $C = 100$ pF. Gesucht ist die Induktivität der Spule, so daß für $f = 10$ MHz $X_C = X_L$ gilt.
4. Wie lange dauert es, um mit einem Tauchsieder ($U = 220$ V, $P = 800$ W) Teewasser zu bereiten? Gehen Sie von einer Wassermenge aus, wie sie im Haushalt Ihrer Eltern üblicherweise benötigt wird!
5. Berechnen Sie ω und T für die Frequenzen
a) $f_1 = 50$ Hz; b) $f_2 = 1000$ Hz; c) $f_3 = 15$ kHz!
6. Berechnen Sie f und T aus den Kreisfrequenzen $\omega_1 = 50$ Hz; $\omega_2 = 1000$ Hz; $\omega_3 = 15$ kHz!
7. Berechnen Sie die Stromstärke in einem Kondensator mit $C = 2\mu$F, der an die Haushaltnetzwechselspannung angeschlossen wird!
8. Berechnen Sie die Kapazität eines Kondensators, der beim Anlegen an die Haushaltnetzspannung eine Stromstärke von 0,15 A aufweisen soll!
9. Füllen Sie unter Heranziehung der Gleichungen (109), (134), (139) die nachstehende Tabelle aus!

Die Größen	R	C	L
hängen ab von			

10. Berechnen Sie die Stromstärke in einer Spule mit $L = 5$ H, die an die Haushaltnetzwechselspannung angeschlossen wird!
11. Welche Induktivität L besitzt eine Spule, wenn sie bei der Frequenz $f = 600$ kHz einen Widerstand $X_L = 20\,k\Omega$ aufweist?
12. Berechnen Sie die in einem Stromkreis umgesetzte Leistung, wenn er mit Haushaltnetzwechselspannung betrieben wird und $I = 4{,}2$ A sowie $\varphi = +26°$ betragen!
13. Berechnen Sie den Phasenwinkel φ, wenn folgende Werte gemessen werden:
$U = 380$ V, $I = 15{,}3$ A, $P = 4{,}92$ kW!
Was ist über das Vorzeichen zu sagen?
14. Berechnen Sie den induktiven Widerstand X_L einer Spule mit $L = 0{,}1$ H für die Frequenzen
a) $f_1 = 60$ Hz, b) $f_2 = 1000$ Hz, c) $f_3 = 15$ kHz!
15. Berechnen Sie die Kapazitäten C_1, C_2 und C_3 von drei Kondensatoren, so daß die drei kapazitiven Widerstände gleich den drei induktiven Widerständen sind, die in Aufgabe 14 berechnet wurden (es sind die gleichen Frequenzen zugrunde zu legen)!

Leitungsvorgänge bei veränderlicher Beweglichkeit und Konzentration der Ladungsträger

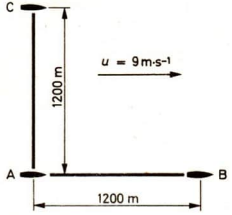
1. Erklären Sie die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Metalldrahtes und eines Thermistors!
2. Erklären Sie den speziellen Verlauf der Kennlinie einer Halbleiterdiode!
3. Erklären Sie die Gleichrichterwirkung einer Halbleiterdiode anhand der I-U-Kennlinie!
4. Erläutern Sie das Prinzip einer Verstärkerschaltung an der Röhrentriode oder dem Transistor!
5. Stellen Sie die Vorteile des Transistors gegenüber der Elektronenröhre zusammen!

Spezielle Relativitätstheorie

1. Ein Zug S' fährt geradlinig mit einer Geschwindigkeit $u = 100000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.
   a) Parallel zum Bahndamm fliegt eine Rakete mit der Geschwindigkeit $v = 150000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ einmal in Fahrtrichtung des Zuges, danach in entgegengesetzter Richtung.
   b) Parallel zum Bahndamm breitet sich ein Lichtsignal in Zugrichtung (oder entgegengesetzt dazu) aus.

   Berechnen Sie die vom Zug aus gemessenen Geschwindigkeiten der Rakete bzw. des Lichtsignals mit dem klassischen Additionsgesetz für Geschwindigkeiten!

2. Drei große Schiffe A, B und C fahren auf dem Meer in konstanten Abständen (Bild 155/1) als bewegtes System mit einer Geschwindigkeit $u = 9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$



155/1

   Berechnen Sie die Fahrzeit eines Schnellbootes mit der Geschwindigkeit $v = 15\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$,
   a) das von A nach B fährt, dort ohne Zeitverlust wendet und nach A zurückfährt (benutzen Sie Gl. 147!),
   b) das ebenso von A nach C und zurück fährt (benutzen Sie die Geschwindigkeitskomponente v' nach Bild 155/2)!

155/2

3. Eine Rakete soll mit halber Lichtgeschwindigkeit fliegen. Von ihr wird in Fahrtrichtung ein Lichtstrahl ausgesendet. Welche Geschwindigkeit des Lichtes mißt ein ruhender Beobachter?
   Überlegen Sie und rechnen Sie!
4. Ein Elektron durchläuft eine Spannung von $U = 4{,}55 \cdot 10^5$ V. Berechnen Sie die Geschwindigkeit nach der Gleichung $E_{kin} = e \cdot U$!
5. Ein Körper mit der Ruhmasse $m_0 = 1$ kg bewegt sich mit der Geschwindigkeit $v = 240000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Welche Masse besitzt er?
6. c soll als Strecke von 3,0 m dargestellt werden.
   a) Wie weit ist die zweite kosmische Geschwindigkeit (rund $10\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$) vom Nullpunkt der Strecke entfernt darzustellen?
   b) Wie nahe an c ist die Geschwindigkeit von Elektronen darzustellen, die noch $0{,}09\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ von c entfernt sind?
7. Bei der Bildung eines Mol MgO (40,3 g) wird Wärme von $Q = 603$ kJ frei. Berechnen Sie die Masseänderung Δm!
8. Eine Tonne Stahl wird um 1400 K erwärmt. Wie groß ist die Massezunahme?
9. Berechnen Sie die Ruhenergie eines Elektrons in MeV!
   Wie finden Sie die Ruhenergie des Positrons?

Kernenergie

1. Welche Geschwindigkeit hat ein Proton mit der (kinetischen) Energie 1 MeV?
2. Wie groß ist die freiwerdende Bindungsenergie bei der Vereinigung von einem Neutron und einem Proton zu einem Deutron? Masse des Deutrons: $3{,}34301 \cdot 10^{-27}$ kg.
3. Wie groß ist die freiwerdende Bindungsenergie beim Aufbau eines $^{23}_{11}$Na-Kernes, wenn
   $m_{0Na} = 22{,}989773$ u beträgt?
4. Berechnen Sie die Kernbindungsenergie von $^{20}_{10}$Ne und $^{40}_{20}$Ca mit $m_{0Ne} = 19{,}99244$ u und $m_{0Ca} = 39{,}96258$ u!
5. Berechnen Sie die Kernbindungsenergie von $^{7}_{3}$Li, $^{56}_{26}$Fe und $^{235}_{92}$U mit $m_{0Li} = 7{,}01436$ u, $m_{0Fe} = 55{,}93493$ u und $m_{0U} = 235{,}04393$ u!
6. Ein ^{235}Uran-Kern wird durch ein Neutron in einen ^{95}Strontium- und einen ^{139}Xenon-Kern gespalten. Berechnen Sie die bei der Spaltung freiwerdende Energie!
   $m_{0Xe} = 138{,}8814$ u, $m_{0Sr} = 94{,}9312$ u
7. Wie groß ist die bei der Kernfusion
   $^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n} + E_B$ freiwerdende Energie?
   $m_{0\,^{3}_{2}He} = 3{,}01603$ u

Lösungen

Mechanik

Kinematik von Translation und Rotation

1. $\bar{v} = 0{,}88\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   $v_{max} = 1{,}37\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
2. b) $v_0 = 2{,}0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   $a = 3{,}0\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
3. a) $a = 3{,}0\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
   b) $s = 41\ \mathrm{m}$
   c) $F = 600\ \mathrm{N}$
4. $t = 2{,}9\ \mathrm{s}$

5. a)

	I. Abschnitt	II. Abschnitt	III. Abschnitt
Zeit t	8,0 s	26,5 s	31,5 s
Ort x	24 m	135 m	150 m
Beschleunigung a	0,75 m · s^{-2}	0	−1,2 m · s^{-2}
beschleunigende Kraft F_b	1,5 kN	0	−2,4 kN
Zugkraft F_z	22,3 kN	20,8 kN	18,4 kN

11. $x_0 = 0 \quad x_5 = 5{,}0\ \mathrm{m}$
    $v_0 = 0 \quad v_5 = 2{,}0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
    $F = 4\ \mathrm{N}$
13. $n = 4{,}25\ \mathrm{s^{-1}} = 255\ \mathrm{min^{-1}}$
14. $n = 102\ \mathrm{min^{-1}}$
15. a) $v_{Seil} = 29{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
    b) $v_{Aufzug} = 4{,}9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
16. a) $\omega = 157\ \mathrm{s^{-1}}$
    b) $\alpha_1 = 31{,}4\ \mathrm{s^{-2}}$
    $\alpha_2 = -10{,}5\ \mathrm{s^{-2}}$
17. a) $v = 4{,}6\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
    $\omega = 0{,}97\ \mathrm{s^{-1}}$
    $a_r = 4{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
    b) $\alpha = 1{,}86 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{s^{-2}}$
    $a_t = 8{,}8 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
18. a) $\omega = 1\ \mathrm{s^{-1}}$
    b) $\frac{d}{r} \approx \frac{1}{10}$
19. a) $\omega = 18{,}8\ \mathrm{s^{-1}}$
    b) $\alpha = 0{,}78\ \mathrm{s^{-2}}$
    c) $v = 18{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
    d) $a_t = 0{,}78\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
20. $c = 3{,}13 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Dynamik von Translation und Rotation

1. a) 771 N · m
   b) 63 N · m
   c) 708 N · m
2. a) $t = 142\ \mathrm{s}$
   b) außermittige Rotation ergibt
   $E_{rot2} > E_{rot1}$ und damit
   $t_2 > t_1$
3. $t = 4{,}6\ \mathrm{s}$
4. $t = 11\ \mathrm{s}$
5. $J = 6{,}47\ \mathrm{kg \cdot m^2}$
6. $x = 362\ \mathrm{mm}$
7. $E_{kin} = \frac{7}{5} \cdot \frac{m}{2} v^2$
8. $t = \sqrt{\frac{v^2}{a}\left(\frac{m_1}{2} + m_2\right)}$
9. $E_{kin} = 1{,}1\ \mathrm{N \cdot m}$
10. $E_{kin} = 40{,}3\ \mathrm{N \cdot m}$
11. $E_{rot} = 0{,}708\ \mathrm{N \cdot m}$
12. $F_R = 183\ \mathrm{N}$
13. $M_D = 3{,}2\ \mathrm{N \cdot m}$
14. $J_a : J_b : J_c \approx 1 : 3 : 5$
15. $t = 327\ \mathrm{s}$
16. $t = 15\ \mathrm{s}$

Elektrodynamik-Felder

Elektrostatisches Feld

1. $U = 3 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{V}$
2. $F = 9{,}2 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{N}$
4. $v = 7{,}3 \cdot 10^7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   $t = 4 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{s}$
5. $U = 200\ \mathrm{V}$
6. b) $E = 200\ \mathrm{V \cdot m^{-1}}$
   c) $t_1 = 2 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{s}$
   d) $F_E = 3{,}2 \cdot 10^{-17}\ \mathrm{N}$
   $a_E = 3{,}5 \cdot 10^{13}\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
   e) $y_1 = 7 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{mm}$
   $y_2 = 1{,}82\ \mathrm{mm}$

Magnetostatisches Feld

2. $F = 9 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{N}$
3. $U = 25\ \mathrm{V}$
6. $B = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{T}$
7. $B = 1{,}6 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{T}$

Elektromagnetisches Feld

1. $U_{ind} = 0{,}135\ \mathrm{V}$
2. $\frac{dB}{dt} = 10^{-4}\ \mathrm{V \cdot cm^{-2}}$
3. $U_{ind} = 4 \cdot 10^3\ \mathrm{V}$
4. $L = 7 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{H}$
5. $U_2 = 51\ \mathrm{V}$
6. $I_{max} = 6{,}6\ \mathrm{kA}$

Elektrische Leitungsvorgänge

Leitungsvorgänge im zeitlich konstanten elektrischen Feld

1. a) $A = 3{,}84\ \text{mm}^2$; $m = 82{,}2\ \text{kg}$
   b) $A = 5{,}76\ \text{mm}^2$; $m = 37{,}3\ \text{kg}$
2. a) $P = 10\ \text{W}$ 3,36
   b) $P = 1\ \text{kW}$
   c) $P = 100\ \text{kW}$
   d) $P = 10\ \text{MW}$
3. a) $I = 2{,}50\ \text{A}$
   b) $I = 5{,}83\ \text{A}$
   c) $I = 0{,}42\ \text{A}$
   d) $I = 3{,}75\ \text{A}$
4. $U = 800\ \text{V}$
5. a) $W \approx 4{,}8 \cdot 10^{-18}\ \text{W} \cdot \text{s}$
   $W = E_{\text{kin}}$
   $v \approx 3{,}2 \cdot 10^6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
6. vieldeutig;
   z. B. $R_1 = 200\,\Omega$, $R_2 = 120\,\Omega$
7. $R_g = 9\,\Omega$
8. vieldeutig;
   z. B. durch Parallelschaltung von 2 Widerständen $R_1 = 120\,\Omega$ und $R_2 = 240\,\Omega$

10.

	I_R in mA	U_R in V
a)	400	8,0
b)	57	11,4
c)	60	12,0
d)	12	12,0

11. a) $I = 48\ \text{mA}$
    b) $I \approx 24\ \text{mA}$

12.

	U_1 in V
a)	16
b)	14,8

14.

Gerät	1	2	3	4	5
I in A	0,11	0,18	0,27	0,45	4,55

Gerät:	6	7	8	9
I in A	2,27	5,45	9,09	0,45

Leitungsvorgänge im elektrischen Wechselfeld

3. $L = 2{,}53\ \mu\text{H}$

5.

	ω in s^{-1}	T in s
a)	314	0,02
b)	6283	0,001
c)	94250	0,000067

11. $L = 5{,}3\ \text{mH}$
12. $P = 830\ \text{W}$
13. $\varphi = \pm 32{,}2°$
14. a) $X_L = 38\,\Omega$
    b) $X_L = 628\,\Omega$
    c) $X_L = 9425\,\Omega$
15. $C_1 = 70{,}3\ \mu\text{F}$
    $C_2 = 253\ \text{nF}$
    $C_3 = 1{,}13\ \text{nF}$

Spezielle Relativitätstheorie

1. a) $v = 50000\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
   $v = 250000\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
   b) $v = 200000\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
   $v = 400000\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
2. a) $t = 250\ \text{s}$
   b) $t = 200\ \text{s}$
3. $v = c$
4. $v \approx 4 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
5. $m \approx 1{,}667\ \text{kg}$
6. a) $v_{k2} \mathrel{\hat{=}} 0{,}1\ \text{mm}$
   b) $v_e \mathrel{\hat{=}} 0{,}9\ \text{nm}$
7. $\Delta m \approx 10^{-11}\ \text{kg}$
   $\approx 10^{-5}\ \text{mg}$
8. $\Delta m \approx 7{,}5 \cdot 10^{-9}\ \text{kg}$
9. $E_0 \approx 0{,}51\ \text{MeV}$

Kernenergie

1. $v = 1{,}38 \cdot 10^7\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
2. $E_B = 2{,}84\ \text{MeV}$
3. $E_B = 187{,}7\ \text{MeV}$
4. $E_{B(Ne)} = 161{,}4\ \text{MeV}$
   $E_{B(Ca)} = 343{,}5\ \text{MeV}$
5. $E_{B(Li)} = 41{,}3\ \text{MeV}$
   $E_{B(Fe)} = 495{,}3\ \text{MeV}$
   $E_{B(U)} = 1805{,}6\ \text{MeV}$
6. $E_B = 207{,}1\ \text{MeV}$
7. $E_B = 1{,}85\ \text{MeV}$

Register

Arbeit 34
Ausschaltvorgang 65f.
atomare Masseneinheit 129
Auswuchten 32

Bahngeschwindigkeit 10
Beschleunigung 9, 14
Betatron 74
Beweglichkeit der Ladungsträger 83
Bewegung, geradlinige 8
–, gleichförmige 16
Bewegungsgesetze 22
Bezugskörper 8
Bezugssystem 8, 114f.
Bogenmaß 10
Born, M. 145
Brutreaktor 139

Coulomb, C. A. 43
Coulombsches Gesetz 43
Chadwick, J. 135

Defektelektronen 100
Denkmodell 11
Differentialquotient 14
Differenzenquotient 14
Dotierung 100
Drehachse, körperfest 27, 28, 30
–, raumfest 27, 28, 30
Drehmoment 26, 27, 70f.
Drehwinkel 9
Drehzahl 11
Druckwasserreaktor 138
Durchlaßspannung 103
Durchlaßstrom 103
Durchschnittsgeschwindigkeit 13
Dynamik 7, 25

Edison, T. A. 39
Effektivwert 89
Eigenleitung 100
Einheit der Rotationsenergie 35
– des Trägheitsmoments 31
Einschaltvorgang 65
Einstein, A. 125
elektromotorisches Prinzip 70
Elektron
–, Beschleunigungsarbeit am 45
–, Elementarladung des 46
–, Masse des 54
–, spezifische Ladung des 54, 55
Elektronenvolt 129
Energie, elektrische 57, 60, 68, 70f.
–, kinetische 35
–, mechanische 57, 60, 68, 70f.
Energieerhaltungssatz 142
Ereignis 118

Faraday, M. 39, 43, 75
Feld, elektrisches 39, 40, 42, 48
–, elektromagnetisches 57ff.
–, elektrostatisches 40ff.
–, historische Entwicklung 42f.
–, magnetisches 39, 47ff., 51
–, magnetostatisches 47ff.
–, sich veränderndes elektrisches 75
–, sich veränderndes magnetisches 75
Feldkonstante, elektrische 43
–, magnetische 52
Feldlinien, elektrische 41
–, geschlossene elektrische 75
–, magnetische 48, 59ff.
–, Richtung der 48, 82
Feldstärke, elektrische 41, 80
–, – im Kondensator 44
Fermi, E. 135
Fluß, magnetischer 64f.
Flußdichte, magnetische 49ff., 60, 63f.
–, – im homogenen Feld einer Spule 51
Frisch, O. 136, 144

Generator 57, 68ff., 74
–, Belastung des 70ff.
–, magnetohydrodynamischer 68
Generatorprinzip 70
Germanium 100
Gesamtenergie 124
Gesamtträgheitsmoment 32
Geschwindigkeit 9
Gleichrichterschaltung 110
Gleichstromgenerator 70f.
Gleichstromkreis, energetische Betrachtung zum 80
Gleichstrommotor 70f.
Gradmaß 10
Grenzschicht 102
Grundgesetze der Dynamik 26, 29

Hahn, O. 135, 144, 145
Halbleiter 100
Halbleiterdioden 102ff.
hantelförmiger Körper 27, 28, 30
Henry, J. 66
Hertz, H. 43, 75

Impulserhaltungssatz 143
Induktion, elektromagnetische 39, 57ff.
Induktionsgesetz 64, 72
Induktionsspannung 57ff., 70
Induktionsvorgang 60f., 63
Induktivität 65ff., 69, 94
Inertialsysteme 116, 117, 118, 119
Information 111
Innenwiderstand von Meßgeräten 86
Integrationskonstante 16
Interferenzstreifen 117
I-U-Kennlinie für
– Glühlampe 83
– Thermistor 99
– Siliziumdiode 103

Joliot-Curie, F. 144, 145
Joliot-Curie, I. 135, 144

Kapazität 90
Kernbindungsenergie 132f.
– kurve 134
Kernfusion 139
Kernkraft 130
Kernladungszahl 129
Kernspaltung 135ff.
Kettenreaktion 137, 138
Kinematik 7
klassisches Additionsgesetz für Geschwindigkeiten 115f.
Kondensator 90
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 117
Konzentration der Ladungsträger 83
Koordinatensystem 114f.
Kraft 25, 26
Kraftarm 26
Kraftmoment 26
kritische Masse 138
Kurtschatow, I. W. 145f.

Ladungserhaltungssatz 143
Landesektion 21

Leiter im Magnetfeld 49f., 53
Lenzsches Gesetz 67f., 70, 73
Linearmotor 74
Löcher 100
Lorentzkraft 53ff., 59

Magnet 47
Magnetfeld, zeitlich konstantes 57ff., 64
–, – veränderliches 62ff.
Massedefekt 133
Masse-Energie-Beziehung 122ff.
Massemittelpunkt 31
Massenzahl 129
Massepunkt 11
Maxwell, J. C. 39, 43, 75
Maxwellsche Theorie 75
Meitner, L. 135, 144
Meßgeräte im Stromkreis 86
meßgerechte Schaltung 86
Michelson-Experiment 116f.
Millikan, R. A. 46
Modell elektrischer Leitungsvorgänge 78ff.
Motor 57, 68ff.
–, Belastung des 70ff.
Myonen 120

Neutron 128
Newton, I. 43
n-leitend 100
Nukleon 128
Nuklid 128

Oerstedt, C. 47
Ohmsches Gesetz 82
Ort-Zeit-Gesetze 18ff.

Paarbildung 125
Paarzerstrahlung 124
Permeabilität, relative 52
Phase 89
Phasenverschiebung 89
Pi-Null-Mesonen 121
p-leitend 100
Polarität der Spannung 82
Positron 124
Potentialtopfmodell 131
Proton 129
Pumpspeicherwerk 57

Radialbeschleunigung 15
Radialkraft 55
Radiant 10
Raum und Zeit 120
Reifenapparat 22
relativistische Addition der Geschwindigkeiten 120
relativistische Massenveränderlichkeit 118
Relativität der Gleichzeitigkeit 118
Relativität der Zeit- und Längenmessung 118
Röhrentriode 106
Rotation 9, 22
Rotationsenergie 35
Rückkopplung 112
Ruhenergie 124
Ruhmasse 123
Rutherford, E. 135

Schaltgetriebe 21
Schweißmaschine 74
Schwingungserzeugung 112
Schwungkraftanlasser 36
Schwungradantrieb 36
Schwungscheibe 34
Selbstinduktion 65ff.
Selbstinduktionsspannung 66f., 72
Siedewasserreaktor 138
Siemens, W. 39
Signal 111
Silizium 100
Spannung, elektrische 44, 80
Sperrspannung 103
Sperrstrom 103
Spule 94
Standortbestimmung 21
starrer Körper 12, 25
Steuerkennlinie für
– Thermistor 106
– Transistor 108
– Triode 106
Störstellen 100
Straßmann, F. 135, 144, 145
Stromrichtung 82
Stromstärke, elektrische 53, 80

Tangentialbeschleunigung 15
Tesla 50
Tesla, N. 50
Thermistor 100
thermonukleare Reaktion 140
Tokamak 141
Töpferscheibe 25
Trägheit 26
Trägheitsmoment 29, 31
Transformator 68f., 72f.
–, Belastung des 72f.
Translation 8, 16
Trennung von Gleich- und Wechselströmen 110

Überlagerung von Gleich- und Wechselströmen 110
Umfangsgeschwindigkeit 10
Umlaufzeit 11
unverzweigter Stromkreis 84

veränderliche Widerstände 87
Verstärkerschaltung 111
Verstärkung 108
verzweigter Stromkreis 84

Wechselstrom, Kenngrößen des 89
–, Zeitverlauf des 89
Wechselstromkreis 88
–, energetische Betrachtungen zum 92
–, Feldenergie im 98
–, Leistung im 97
–, Kondensator im 90ff.
–, mit mehreren Widerständen 97
–, ohmscher Widerstand im 90
–, Spule im 93ff.
Wechselwirkung, elektrische 41
–, magnetische 48
Widerstand 82
– bei gekrümmter *I-U*-Kennlinie 104
–, induktiver 94
–, kapazitiver 92
–, ohmscher 90ff.
Widerstandsgesetz 83
Windungsfläche, wirksame 61ff., 66
Winkelbeschleunigung 10, 15, 27f.
Winkelgeschwindigkeit 9, 10, 15
Wirbelströme 68

Zeitdehnung 119
Zeitmessung 114

Quellennachweis der Abbildungen

DEWAG, Berlin: 27/1. Gawron, Kleinmachnow: 21/5. Meyer, Berlin: 15/1. Militärverlag, Gebauer: 77/1. Rosenkranz, Berlin: 47/1. Volk und Wissen, Archiv: 21/1, 25/1, 33/1, 36/1, 36/2, 39/1, 40/1, 48/1, 48/2, 49/1, 54/2, 68/1, 88/1, 88/2, 90/2, 102/1, 104/2, 113/1, 115/3, 117/2, 122/1, 125/1, 126/1, 127/1, 128/1, 142/1, 144/1, 145/1, 146/1. Volk und Wissen, Seifert: 8/1, 27/2, 34/1, 78/1. VEB MELA, Apolda: 22/2. Zentralbild, Franke: 21/7. Gahlbeck 22/1. Herbst 141/2. Lehmann 21/3. Liebers 57/1. Müller 99/1. Spremberg 114/1. Thieme 36/3

Kurzwort: 02 12 54 Lehrb. Physik Kl 12
Schulpreis DDR: 3,60