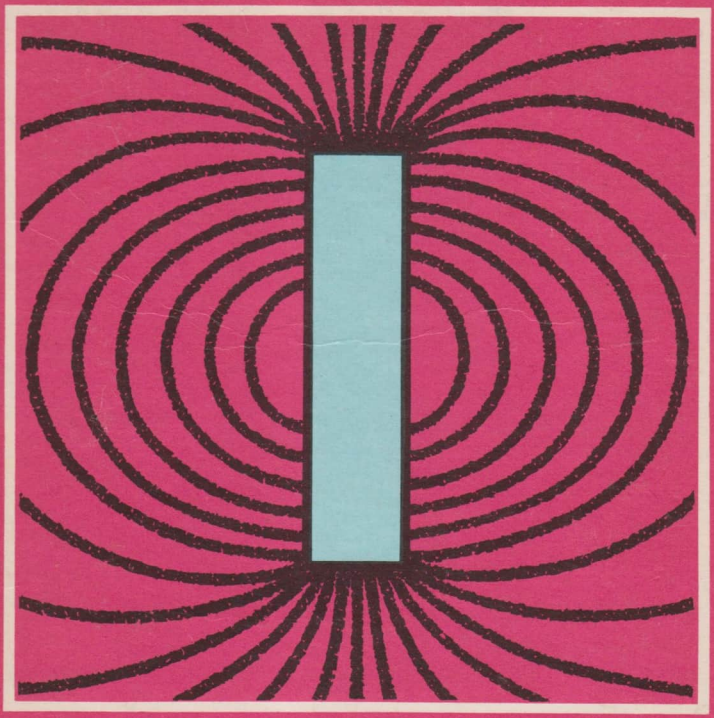
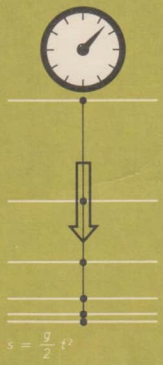


PHYSIK 9

1585
Freier Fall

Galileo Galilei
1564 bis 1642



1609
Keplersche Planetengesetze
Johann Kepler
1571 bis 1630

1685
Grundgesetze der Mechanik
Isaak Newton
1642 bis 1727

1785
Elektrisches Feld

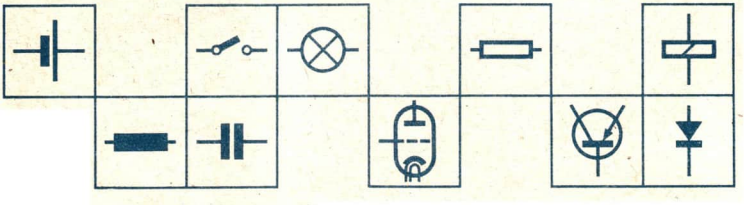
Charles-Augustin Coulomb
1736 bis 1806

1842
Elektromagnetisches Feld
Michael Faraday
1791 bis 1867

1885
Elektromagnetisches Drehfeld
Galileo Ferraris
1847 bis 1897

PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 9



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin

1972

Autoren:
Rolf Grabow (Mechanik)
Dr. Wolfgang Scholz (Felder, Induktion)
Kurt Hähnel (Leitungsvorgänge)
Heinz Fischer und Rudolf Säuberlich (Schülerexperimente M 1, M 2a und b)
Dr. Rudolf Göbel (Schülerexperimente E 1a und b, Nomogramme)
Hubert Buscherowsky (Schülerexperimente E 2 und E 3)
in Zusammenarbeit mit der Redaktion Physik des Verlages
Redaktion: Werner Golm, Willi Wörstenfeld

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt

4. Auflage · Ausgabe 1970
Lizenz-Nr. 203 · 1000/72 (DN)
ES 11 H
Ausstattung: Manfred Behrendt
Technische Illustrationen: Heinrich Linkwitz
Illustrationen: Harri Förster
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden (III/9/1)
Gesetzt aus der Gill Grotesk
Redaktionsschluß: 1. 4. 1972
Bestell-Nr.: 020903-4 · Preis 2,20

Inhalt

Mechanik

Grundlagen der Kinematik 6
Grundlagen der Dynamik 26
Energie 42
Die Kreisbewegung 48
Die Gravitation 54
Zur Wiederholung 63

Elektrizitätslehre

Das elektrische Feld 68
Das magnetische Feld 82
Die elektromagnetische Induktion 96
Elektrische Leitungsvorgänge 108
Anwendung elektrischer Leitungsvorgänge 121
Zur Wiederholung 134

Aufgaben

Fragen, Aufträge, Versuche 138
Schülerexperimente 156

Anhang

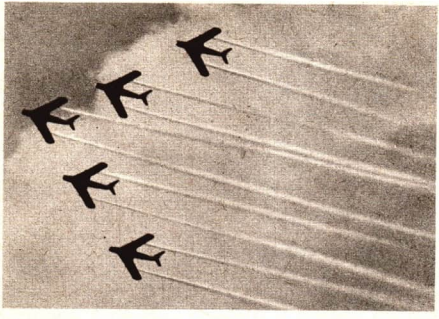
Lösungen 166
Nomogramme 167
Register 175

Im Lehrbuch verwendete Symbole

▼ Experimente
▶ Merksätze
■ Beispiele
● Aufgaben
✱ Aufgaben mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad
(N) Aufgabe mit Nomogramm lösbar
↗ siehe

Bei den Bildnummern bedeutet die erste Zahl die Seite.
Die zweite Zahl gibt an,
das wievielte Bild von oben gemeint ist.

Mechanik



Grundlagen der Kinematik

Düsenjäger vom Typ Mig 19 bei Kunstflugvorführungen. Mitgeführte Rauchpatronen markieren die Flugbahnen. Zur Beschreibung der mechanischen Bewegung reicht es nicht, die Bahn des Körpers zu erkennen. Man benötigt dazu noch weitere charakteristische Größen, die in diesem Abschnitt behandelt werden.

Das Teilgebiet der Physik, in dem die mechanische Bewegung von Körpern untersucht wird, heißt **Kinematik**. In der Kinematik bleiben die Bedingungen unberücksichtigt, unter denen Geschwindigkeitsänderungen auftreten. Diese Bedingungen werden in der *Dynamik* untersucht (↗ S. 26).

Die Relativität der Bewegung

Aus Klasse 6 ist bereits bekannt, wie mechanische Bewegung und Ruhe unterschieden werden:

> Eine mechanische Bewegung ist die Änderung der Lage eines Körpers gegenüber anderen Körpern. Wenn ein Körper seine Lage gegenüber anderen Körpern nicht ändert, dann ist er gegenüber diesen Körpern in Ruhe.

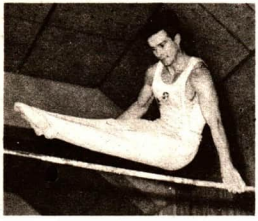
■ Ein Radfahrer, der auf einer Landstraße fährt, bewegt sich in bezug auf die Landstraße. Die Telegrafenmasten, die Bäume und die Kilometersteine an den Rändern der Straße sind in bezug auf die Landstraße in Ruhe.
Sitzt man in einem fahrenden Eisenbahnzug, so bewegt man sich in bezug auf den Bahndamm. In bezug auf das Zugabteil ist man dagegen in Ruhe.

● *Nennen Sie weitere Beispiele!*

Aus den Beispielen ist zu erkennen:

Eine *eindeutige* Aussage darüber, ob sich ein Körper bewegt oder ruht, erfordert stets die Angabe eines **Bezugssystems**. In vielen Fällen wählt man bei der Beschreibung physikalischer Vorgänge ein Bezugssystem, das man sich fest mit der Erde verbunden vorstellt, ohne dies besonders zu erwähnen. Ein Körper befindet sich bei dieser Festlegung in Ruhe, wenn er sich relativ[1] zum gewählten Bezugssystem nicht bewegt.

Beachten Sie: Alle gegenüber der Erde ruhenden Körper sind in bezug auf die Sonne in Bewegung. Auch ein mit der Sonne verbundenes Bezugssystem ist kein ruhendes System, da sich die Sonne ebenfalls gegenüber anderen Himmelskörpern bewegt. Man kann keine Körper und damit auch kein Bezugssystem angeben, das sich absolut[2] in Ruhe befindet.



Der Massenpunkt

Im allgemeinen sind die Bewegungen von Körpern sehr schwierig zu beschreiben. Man betrachte etwa die Bewegung eines Turners am Reck (Bild 7/1) oder die Bewegung einer fortgeschleuderten Wurfkeule. Einfacher lassen sich Bewegungen mit Hilfe des Modells **Massenpunkt** beschreiben. Man denkt sich dabei die Masse in einem Punkt vereinigt.

Die an diesem Modell gewonnenen Erkenntnisse kann man unter bestimmten Bedingungen auch auf die Bewegung von Körpern anwenden. Man denkt sich dazu ebenfalls die Masse des Körpers in einem Punkt vereinigt.

Wenn im folgenden von der Bewegung eines Körpers gesprochen wird, soll darunter stets die Bewegung eines solchen Punktes verstanden werden (Ausnahme Abschnitt Drehbewegung).

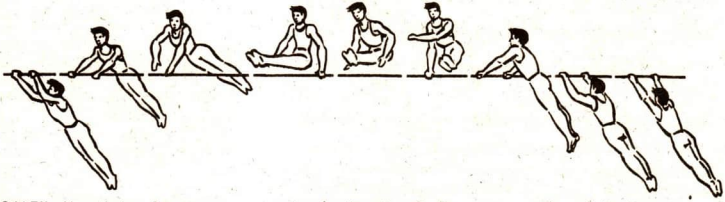


Bild 7/1 Verschiedene Bewegungsphasen eines Reckturners

[1] relativ; hier: bezogen auf
[2] absolut; hier: vollkommen

Die geradlinige, gleichförmige Bewegung

Aus Klasse 6 ist bekannt, daß es verschiedene *Bewegungsarten* gibt: gleichförmige Bewegungen, beschleunigte Bewegungen und verzögerte Bewegungen.
Eine einfache Bewegungsart ist die geradlinige, gleichförmige Bewegung, weil sich bei ihr die Geschwindigkeit nicht ändert. Diese Bewegungsart kann mit einem Experiment nach Bild 8/1 demonstriert werden. Tabelle 1 enthält einige gerundete Meßwerte aus einem derartigen Experiment.

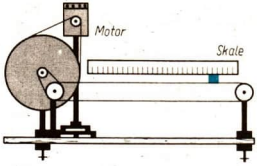


Bild 8/1 Versuchsanordnung zur Demonstration einer geradlinigen, gleichförmigen Bewegung. Das auf dem Band stehende Klötzchen bewegt sich gleichförmig.

Tabelle 1: Meßreihe

Weg s in cm	12	24	36	48	60
Zeit t in s	1	2	3	4	5

Bekanntlich ist bei einer geradlinigen, gleichförmigen Bewegung die Geschwindigkeit der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der dazu benötigten Zeit.

$v = \frac{s}{t}$. Das ergibt für unser Beispiel eine Geschwindigkeit von $12\frac{\text{cm}}{\text{s}}$; die Geschwindigkeit ist konstant. In dem mit den Meßwerten der Tabelle 1 gezeichneten v-t-Diagramm (Bild 8/2) ergibt sich eine Parallele zur Zeitachse.
Aus dem s-t-Diagramm (Bild 8/3) erkennt man: Der zurückgelegte Weg s ist proportional der Zeit t. $s \sim t$.

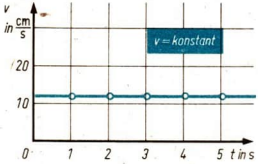


Bild 8/2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer geradlinigen, gleichförmigen Bewegung

Durch Umstellen der Gleichung $v = \frac{s}{t}$ ergibt sich das Weg-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung. $s = v \cdot t$.

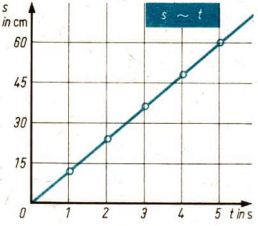


Bild 8/3 Weg-Zeit-Diagramm einer geradlinigen, gleichförmigen Bewegung

Beachten Sie: Die Gleichungen $v = \frac{s}{t}$ und $s = v \cdot t$ sind – wie auch alle anderen Gleichungen in diesem Lehrbuch – Größengleichungen; d. h. für die Formelzeichen der physikalischen Größen sind bei Berechnungen stets die entsprechenden Zahlenwerte und Einheiten zu setzen.

Die Geschwindigkeit

Bei jeder Bewegung durchläuft ein Körper eine bestimmte *Bahn*. Diese kann gerade, aber auch gekrümmt sein. Der Bewegungszustand ist durch die Bahn nicht eindeutig bestimmt, denn sie kann schneller oder langsamer durchlaufen werden.

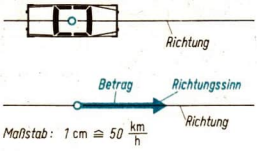


Bild 9/1 Die Länge des Pfeils dient als Maß für den Betrag der Geschwindigkeit. Man wählt entsprechend der Aufgabe einen geeigneten Maßstab, z. B. 1 cm ≙ 50 $\frac{km}{h}$. Durch die Pfeilspitze wird der Richtungssinn der Geschwindigkeit angegeben.

Die physikalische Größe, die den Bewegungszustand eines Körpers *eindeutig* kennzeichnet, ist die **Geschwindigkeit**. Die Geschwindigkeit ist eine gerichtete physikalische Größe. Will man beispielsweise die Geschwindigkeit eines Kraftfahrzeugs bei geradliniger Bewegung an einer bestimmten Stelle der Fahrtstrecke angeben, so zeichnet man in der grafischen Darstellung auf einer Geraden, die die Bewegungs**richtung** angibt, einen Pfeil (Bild 9/1).

Ist die von einem Körper durchlaufene Bahnkurve gekrümmt, so ändert sich dauernd die Richtung der Bewegung. Sie ist stets tangential zur Bahnkurve gerichtet (Bild 9/2).

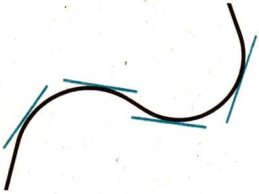


Bild 9/2

Gerichtete physikalische Größen heißen **vektorielle Größen**. Sie werden in diesem Lehrbuch durch einen über das Formelzeichen gesetzten Pfeil besonders hervorgehoben, z. B. $\vec{v}$, $\vec{F}$.

Die Geschwindigkeit ist eine vektorielle Größe. Sie ist erst durch Angabe des Betrages, der Richtung und des Richtungssinnes eindeutig gekennzeichnet.	$\vec{v}$

Fehlt der Pfeil über dem Formelzeichen der Größe, so ist der Betrag dieser Größe gemeint.

Für das Rechnen mit vektoriellen Größen gelten besondere mathematische Regeln. In diesem Lehrbuch werden bei allen Gleichungen nur die Beträge der physikalischen Größen angegeben.

Die ungleichförmige Bewegung

Bei einer geradlinigen, gleichförmigen Bewegung ändern sich weder Richtung und Richtungssinn noch Betrag der Geschwindigkeit (Bild 9/3).
Gleichförmige Bewegungen sind selten. Meist ändern sich während eines Bewegungsvorganges der Betrag, die Richtung oder der Richtungssinn der Geschwindigkeit. Derartige Bewegungen heißen **ungleichförmige Bewegungen**.

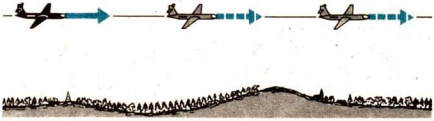
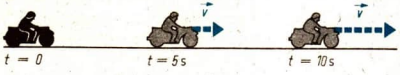
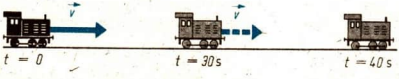
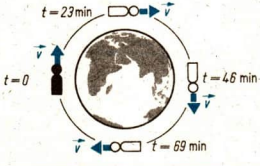
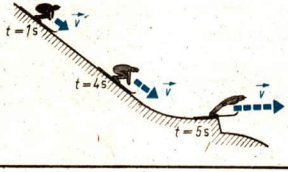


Bild 9/3 Geradlinige, gleichförmige Bewegung eines Flugzeugs

Beispiele für ungleichförmige Bewegungen	Art der Änderung
Anfahren eines Motorrades auf einer geraden Strecke 	Der Betrag der Geschwindigkeit ändert sich (Zunahme), die Richtung der Geschwindigkeit ist konstant.
Bremsen einer Rangierlok auf einer geraden Strecke 	Der Betrag der Geschwindigkeit ändert sich (Abnahme), die Richtung der Geschwindigkeit ist konstant.
Bewegung eines Raumschiffes auf einer Kreisbahn um die Erde 	Die Richtung der Geschwindigkeit ändert sich, der Betrag der Geschwindigkeit ist konstant.
Skispringer im Anlauf 	Die Richtung und der Betrag der Geschwindigkeit ändern sich.

Auch für ungleichförmige Bewegungen können Geschwindigkeiten angegeben werden. Kennt man den gesamten zurückgelegten Weg s und die dazu benötigte Zeit *t*, so läßt sich eine mittlere Geschwindigkeit oder **Durchschnittsgeschwindigkeit** $\bar{v}$ angeben:

Durchschnittsgeschwindigkeit einer Bewegung	$\bar{v} = \frac{s}{t}$

■ Zur Einhaltung der Verkehrsvorschriften führt die Verkehrspolizei Geschwindigkeitskontrollen durch. Dazu wird eine Meßstrecke von beispielsweise 125 m gewählt und die Durchfahrtszeit bei Einhaltung der Höchstgeschwindigkeit (z. B. $50\,\frac{km}{h}$) berechnet.

Gegeben:

$\bar{v} = 50\,\frac{km}{h}$

$s = 125\,m$

Gesucht:

t

Lösung:

$\bar{v} = \frac{s}{t} \;\Big|\; \cdot \frac{t}{\bar{v}}$

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

$t = \frac{125\,m \cdot 3600\,s}{50\,000\,m}$

$\underline{t = 9\,s}$

Nebenrechnung:

$\bar{v} = \frac{50\,km}{h} = \frac{50 \cdot 1000\,m}{3600\,s}$

Durchfahrtszeit beträgt 9 s.

Alle Fahrzeuge, die mehr als 9 s benötigen, haben eine kleinere Durchschnittsgeschwindigkeit als $50\,\frac{km}{h}$. Damit ist allerdings nicht gesagt, daß die vom Tachometer des Fahrzeugs angezeigte **Augenblicksgeschwindigkeit** v auf einzelnen Streckenabschnitten nicht größer als $50\,\frac{km}{h}$ ist. Andere Streckenabschnitte werden dann langsamer durchfahren.

Die Abweichung der Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ von der Augenblicksgeschwindigkeit v ist um so geringer, je kleiner die Meßstrecke $s_2 - s_1 = \Delta s$ und damit die Zeit $t_2 - t_1 = \Delta t$ ist (Bild 11/1).

Die Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ stimmt bei genügend kleinem Δt weitgehend mit der vom Tachometer des Fahrzeuges angezeigten Augenblicksgeschwindigkeit v überein.

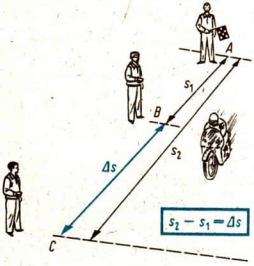


Bild 11/1 Bestimmen der Durchschnittsgeschwindigkeit eines Motorradfahrers. Der Beobachter bei B mißt die Zeit t_1 für das Durchfahren der Strecke s_1; der Beobachter bei C mißt die Zeit t_2 für das Durchfahren der Strecke s_2. Je mehr sich die Meßpunkte B und C einander nähern, je kleiner also Δs ist, um so geringer ist der Unterschied zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ und der Augenblicksgeschwindigkeit v. Warum genügen nicht die Personen bei A und B?

Die geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Durch ein absinkendes Wägestück wird ein Schienenwagen bewegt, der eine Tropfvorrichtung trägt (Bild 11/2). Die regelmäßig fallenden Tropfen markieren auf einem Papierstreifen die zurückgelegten Wege. Durch geeignete Hahnstellung am Tropfrohr wird erreicht, daß nach jeweils einer Sekunde ein Tropfen fällt. In Tabelle 2 sind die gerundeten Meßwerte zusammengestellt.

Tabelle 2: Meßreihe

Zeit t in s	Weg s in cm
0	0
1	9
2	35
3	80
4	146
5	230

Bild 11/2

Bildet man die Quotienten aus dem Weg und der Zeit, so ist festzustellen, daß bei dieser Bewegungsart der zurückgelegte Weg der Zeit nicht proportional ist.
Man erkennt das auch aus dem Weg-Zeit-Diagramm, denn statt einer Geraden (↗ geradlinige, gleichförmige Bewegung, Bild 8/3) erhält man eine gekrümmte Kurve (Bild 12/1).
Vergleicht man die zurückgelegten Wege und die zugehörigen Zeiten, so findet man einen gesetzmäßigen Zusammenhang. Der in 2 s zurückgelegte Weg ist unter Berücksichtigung von Meßfehlern etwa viermal so groß wie der Weg in 1 s. In 3 s wird der neunfache Weg zurückgelegt, in 4 s der sechzehnfache Weg usw. Die Wege verhalten sich wie $1:4:9:16 = 1^2:2^2:3^2:4^2$, das heißt, wie die Quadrate der zugehörigen Zeiten.

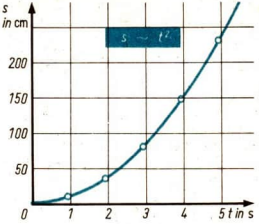


Bild 12/1 Weg-Zeit-Diagramm einer geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Diese Proportionalität erkennt man auch durch eine entsprechende Quotientenbildung; $\frac{s}{t^2}$ in der dritten Spalte der Tabelle 3 ist konstant.

Eine Bewegung, bei der diese Gesetzmäßigkeit vorliegt, wird als **geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung** bezeichnet.

Bei der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist der Weg dem Quadrat der Zeit proportional.	$s \sim t^2$

Tabelle 3: Meßreihe

Zeit t in s	Weg s in cm	$\frac{s}{t^2}$ in $\frac{cm}{s^2}$ (gerundet)
0	0	—
1	9	9
2	35	9
3	80	9
4	146	9
5	230	9

2 ▼ **Mit der gleichen Anordnung wie im Versuch 1, wird unter Verwendung eines Tachometers die Augenblicksgeschwindigkeit nach 1 s, 2 s, 3 s ... gemessen (Bild 12/2).**

Bild 12/2

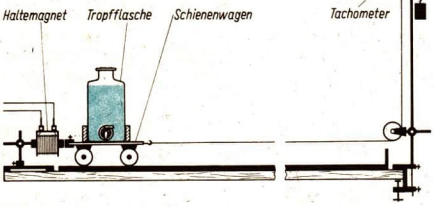


Tabelle 4: Meßreihe

Zeit t in s	Geschwindigkeit v in $\frac{cm}{s}$	$\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$ in $\frac{cm}{s^2}$ (gerundet)
0	0	—
1	17	17
2	35	18
3	54	18
4	71	17
5	89	18

Aus der Tabelle 4 und dem Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm (Bild 13/1) kann man entnehmen:

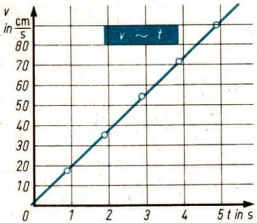


Bild 13/1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Bei der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Geschwindigkeit der Zeit proportional.	$v \sim t$

Die Geschwindigkeitsänderungen werden mit der physikalischen Größe **Beschleunigung** beschrieben. Die Beschleunigung ist ebenfalls eine vektorielle Größe, also durch Betrag, Richtung und Richtungssinn gekennzeichnet.

Bei geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegungen stimmen die Richtung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung überein.

Für den Betrag der Beschleunigung gilt[1]:

Die Beschleunigung bei der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist der Quotient aus der Geschwindigkeitsänderung und der dazugehörigen Zeit.	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Dabei bedeuten $\Delta v = v_2 - v_1$ und $\Delta t = t_2 - t_1$.
Die Einheit der Beschleunigung ist der Quotient aus einer Geschwindigkeits- und einer Zeiteinheit; meist benutzt man $\frac{m}{s^2}$ (gelesen: Meter je Quadratsekunde) oder $\frac{cm}{s^2}$.

Berechnet man aus den Meßwerten des Versuches 2 die Beschleunigung, so erhält man innerhalb der Fehlergrenzen eine Konstante (dritte Spalte der Tabelle 4).

Bei der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Beschleunigung konstant.	$a =$ konstant

Ein PKW Trabant 601 erreicht 10,5 s nach dem Anfahren eine Geschwindigkeit von $60\,\frac{km}{h}$; 20,5 s nach dem Anfahren eine Geschwindigkeit von $80\,\frac{km}{h}$. Wie groß ist die Beschleunigung während der Geschwindigkeitsänderung von $60\,\frac{km}{h}$ auf $80\,\frac{km}{h}$, wenn die Bewegung geradlinig, gleichmäßig beschleunigt erfolgt?

[1] Im allgemeinen gilt diese Definition nur für die durchschnittliche Beschleunigung (vgl. Durchschnittsgeschwindigkeit und Augenblicksgeschwindigkeit).

Gegeben:

$v_2 = 80\ \frac{km}{h}$

$v_1 = 60\ \frac{km}{h}$

$t_2 = 20{,}5\ s$

$t_1 = 10{,}5\ s$

Gesucht:

a

Lösung:

$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

$a = \frac{20000\ m}{3600\ s \cdot 10\ s}$

$a \approx 0{,}56\ \frac{m}{s^2}$

Nebenrechnungen:

$\Delta v = 20\ \frac{km}{h} = \frac{20 \cdot 1000\ m}{3600\ s}$

$\Delta t = 20{,}5\ s - 10{,}5\ s = 10\ s$

Die Beschleunigung des PKW beträgt etwa $0{,}56\ \frac{m}{s^2}$.

Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz und Weg-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Der Anstieg der Geraden im *v-t*-Diagramm (Bild 13/1) ist $\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = a$ (Bild 14/1).

Wählt man $v_1 = 0$; $t_1 = 0$, so läßt sich für $\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$ schreiben: $\frac{v}{t} = a$. Durch Umformen dieses Ausdrucks ergibt sich das **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung:**

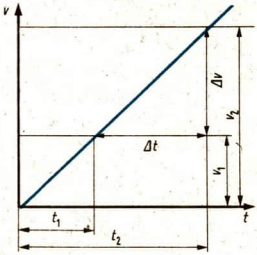


Bild 14/1

Die Geschwindigkeit der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist gleich dem Produkt aus Beschleunigung und Zeit.	$v = a \cdot t$

■ Wie groß ist die Geschwindigkeit, die ein Schnellzug 10 s nach dem Anfahren besitzt, wenn die Beschleunigung $0{,}25\ \frac{m}{s^2}$ beträgt? (Ergebnis in $\frac{m}{s}$ und $\frac{km}{h}$!)

Gegeben:

$t = 10\ s$

$a = 0{,}25\ \frac{m}{s^2}$

Gesucht:

v

Lösung:

$v = a \cdot t$

$v = \frac{25\ m \cdot 10\ s}{100\ s^2}$

$v = 2{,}5\ \frac{m}{s}$

$v = 9{,}0\ \frac{km}{h}$

Nebenrechnung:

$v = \frac{2{,}5 \cdot \frac{1}{1000}\ km}{\frac{1}{3600}\ h}$

$v = \frac{2{,}5 \cdot 3600\ km}{1000\ h}$

Die Geschwindigkeit beträgt 10 s nach dem Anfahren $2{,}5\ \frac{m}{s} = 9{,}0\ \frac{km}{h}$.

Um eine Gleichung für den Zusammenhang zwischen Weg und Zeit aufzustellen, betrachten wir nochmals die Ergebnisse aus den Experimenten 1 und 2:

Nach der dritten Spalte von Tabelle 3 ist der Quotient $\frac{s}{t^2} = 9\,\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ = konstant. Vergleicht man diesen Wert mit dem Mittelwert der dritten Spalte der Tabelle 4 $\left(\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = a = 18\,\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right)$, so erkennt man, daß innerhalb der Fehlergrenzen $\frac{s}{t^2} = \frac{a}{2}$ ist.

Diese Gleichung gilt für alle geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegungen.

Durch Auflösen der Gleichung $\frac{s}{t^2} = \frac{a}{2}$ nach s ergibt sich das **Weg-Zeit-Gesetz** der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

Der bei einer geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung zurückgelegte Weg ist gleich dem Produkt aus der halben Beschleunigung und dem Quadrat der Zeit.	$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$

Welchen Weg legt ein Schnellzug beim Anfahren in 10 s zurück, wenn die Beschleunigung $0{,}25\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ beträgt?

Gegeben:

$a = 0{,}25\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$t = 10\text{ s}$

Gesucht:

s

Lösung:

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

$$s = \frac{25\text{ m} \cdot 10\text{ s} \cdot 10\text{ s}}{100\text{ s}^2 \cdot 2}$$

$$\underline{\underline{s = 12{,}5\text{ m}}}$$

Der zurückgelegte Weg beträgt 12,5 m.

Durch Auflösen der Gleichungen $v = a \cdot t$ bzw. $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ nach der Zeit t ergeben sich zwei Gleichungen zur Berechnung der Zeit bei geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegungen: $t = \frac{v}{a}$; $t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}}$.

Welche Rechenoperationen müssen Sie im einzelnen durchführen, um diese Gleichungen zu erhalten?

■ Beim Durchfahren einer gleichmäßig geneigten, geradlinigen Rodelbahn erreicht ein Sportler bei einer Beschleunigung von $1\,\frac{m}{s^2}$ nach 72 m eine Geschwindigkeit von $12\,\frac{m}{s}$. Wie groß ist die Fahrtzeit?

Gegeben:

$a = 1\,\frac{m}{s^2}$

$s = 72\,m$

$v = 12\,\frac{m}{s}$

Gesucht:

t

Lösung:

1. Lösungsweg:

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

$$t = \frac{12\,m \cdot s^2}{s \cdot 1\,m}$$

$$\underline{\underline{t = 12\,s}}$$

2. Lösungsweg:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}}$$

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 72\,m \cdot s^2}{1\,m}}$$

$$t = \sqrt{144\,s^2}$$

$$\underline{\underline{t = 12\,s}}$$

Die Fahrtzeit beträgt 12 s.

Schülerexperiment M 1, Seite 156, Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 138, Nr. 1 bis 25

Der freie Fall

3 ▼ In einer schwach geneigten Rinne rollt eine Kugel. Von der Drehung der Kugel wird abgesehen. Der Punkt, in dem man sich die Masse der Kugel vereinigt denkt (Bild 16/1), bewegt sich geradlinig und parallel zur geneigten Rinne.

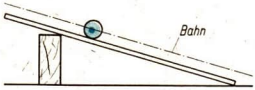


Bild 16/1

● *Führen Sie den Versuch selbst aus! (Hinweise finden Sie in den Aufgaben 25, 26 und im Praktikum, P 1/1!) Zu welchem Ergebnis kommen Sie?*

Aus vielen Experimenten ist zu erkennen: Die Bewegung eines Körpers auf einer geneigten Ebene ist eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

● *Welche Größen ändern sich, wenn die Rinne stärker geneigt wird (Neigungswinkel z. B. 45°, 60°, 80°) (Bild 16/2)?*

Bild 16/2

Die größte Neigung der Rinne ist 90°. Die Rinne ist dann überflüssig, da die Kugel herabfällt.
Erfolgt die Fallbewegung eines Körpers völlig ungehindert im luftleeren Raum, so bezeichnet man diese Bewegung als **freien Fall**.

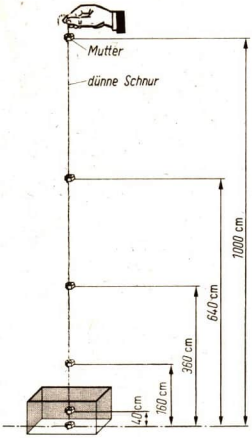


Bild 17/1 Fallschnur zur Untersuchung des freien Falls. Mit den angegebenen Abständen läßt sich die Fallschnur in einem Treppenhaus verwenden. Als Auffangbehälter wird eine Holzkiste benutzt.

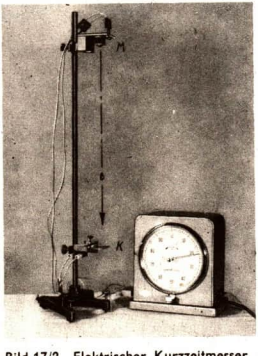


Bild 17/2 Elektrischer Kurzzeitmesser. Beim Betätigen des Schalters gibt der Haltemagnet M die Kugel frei. Gleichzeitig beginnt die elektrische Stoppuhr zu laufen. Die auf den Kontakt K auftreffende Kugel stoppt die Uhr.

Der freie Fall läßt sich auch im lufterfüllten Raum untersuchen, da bei geringen Fallhöhen und bei Verwendung kleiner, möglichst schwerer Fallkörper der hemmende Einfluß des Luftwiderstandes vernachlässigt werden kann.

Um welche Bewegungsart handelt es sich beim freien Fall? Ist die Fallbewegung gleichförmig oder beschleunigt? Hat die Beschleunigung einen konstanten Betrag oder ändert er sich?
Um diese Fragen zu beantworten, gehen wir von unseren Beobachtungen an der immer stärker geneigten Rinne aus. Wir stellen die *Hypothese* auf, daß der freie Fall ebenfalls eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist. Diese Hypothese dient uns als Grundlage weiterer Überlegungen und für den Aufbau von Versuchsanordnungen. Ist unsere Hypothese richtig, so müßten sich beim freien Fall die Fallwege wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten.
Wir führen dazu einen einfachen Vorversuch aus:

In eine dünne Schnur sind in bestimmten Abständen Schraubenmuttern eingeknüpft (Bild 17/1). Die Schnur wird so gehalten, daß die unterste Mutter gerade den Boden einer Auffangkiste berührt. Die Abstände der einzelnen Schraubenmuttern vom Boden aus und damit die Fallwege verhalten sich wie $1:4:9:16:25 = 1^2:2^2:3^2:4^2:5^2$.
Beim Loslassen der Schnur hört man die Muttern in gleichen Zeitabständen auf dem Boden aufschlagen. Dieser Sachverhalt läßt sich nur so deuten, daß sich die Fallwege tatsächlich wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten: $s \sim t^2$.

Warum kann man dieses Experiment nur als annähernde Bestätigung für die Richtigkeit der Hypothese auffassen?

Eine genauere Überprüfung des Weg-Zeit-Gesetzes des freien Falls erfordert eine Zeit*messung*. Bei geringen Fallhöhen reicht eine gewöhnliche Stoppuhr für Zeitmessungen jedoch nicht aus. Man benutzt deshalb besondere Meßvorrichtungen (Bild 17/2). Mit diesen wurde bestätigt, daß der freie Fall eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist.
Wir müssen nun noch untersuchen, ob die Beschleunigung beim freien Fall für alle Körper gleich groß ist, oder ob sie beispielsweise von der Gewichtskraft oder von der Form des fallenden Körpers abhängt. Wenn die Beschleunigung beim freien Fall für alle Körper gleich groß wäre, so würden alle Körper für die gleiche Fallstrecke die gleiche Zeit benötigen.

Woraus ergibt sich diese Behauptung?

Wir überprüfen unsere Annahme durch den folgenden Versuch:

5 ▼ In einer langen Glasröhre befinden sich eine kleine Bleikugel, ein Papierstückchen und eine Feder (Bild 18/1). Die Röhre wird weitgehend luftleer gepumpt. Kehrt man sie schnell um, so fallen die Bleikugel, das Papierstückchen und die Feder gleich schnell.

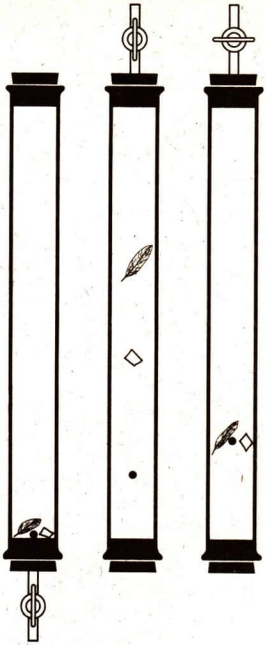


Bild 18/1

Die Beschleunigung ist also beim freien Fall für alle Körper gleich groß. Sie heißt **Fallbeschleunigung** g. Die Fallbeschleunigung g läßt sich mit Versuchsanordnungen entsprechend Bild 17/2 näherungsweise bestimmen. Präzisionsmessungen nach anderen Methoden haben gezeigt, daß sich die Fallbeschleunigung mit dem Ort der Messung etwas ändert. Von den Erdpolen aus nimmt die Fallbeschleunigung beim Fortschreiten bis zum Äquator geringfügig ab. Auch die Höhenlage des Ortes hat einen Einfluß.

Als internationalen Normwert hat man festgelegt:

$g = 9{,}80665\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Für unsere Rechnungen genügt ein gerundeter Wert.

Die Fallbeschleunigung g beträgt $9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Unter Verwendung der Fallbeschleunigung g lauten die Gesetze des freien Falls folgendermaßen[1]:

▶ Weg-Zeit-Gesetz eines frei fallenden Körpers	$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz eines frei fallenden Körpers	$v = g \cdot t$

■ Eine kleine Bleikugel fällt 2,3 s im luftleeren Raum. Wie groß ist die Endgeschwindigkeit? Welchen Weg legt die Kugel zurück?

[1] Die beiden Gleichungen lassen sich vereinigen zu einem Geschwindigkeit-Weg-Gesetz $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}$ bzw. $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ (h: Fallhöhe).

Gegeben:

$t = 2{,}3\ \mathrm{s}$

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

Gesucht:

v

s

Lösung:

$v = g \cdot t$

$v = 9{,}81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \cdot 2{,}3\ \mathrm{s}$

$\underline{\underline{v \approx 22{,}6\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}}$

$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$

$s = \frac{9{,}81\ \mathrm{m} \cdot 2{,}3\ \mathrm{s} \cdot 2{,}3\ \mathrm{s}}{2\ \mathrm{s}^2}$

$\underline{\underline{s \approx 26{,}0\ \mathrm{m}}}$

Nach Durchfallen eines Weges von etwa 26,0 m erreicht die Kugel eine Geschwindigkeit von etwa 22,6 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Der von uns beim Auffinden der Fallgesetze eingeschlagene Weg ist charakteristisch für die *experimentelle Methode* in der Physik:

Vorversuch und Vorüberlegung:	Bewegung auf geneigter Ebene ist eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung.
Aufstellen einer Hypothese:	Bewegung auf der geneigten Ebene geht bei einem Neigungswinkel von 90° in den freien Fall über. Freier Fall ist ebenfalls eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung.
Experiment oder Folge von Experimenten zum Prüfen der Hypothese:	Experiment mit Fallschnur, Experiment mit elektrischer Stoppuhr, Fallröhre usw.
Formulieren der Ergebnisse:	Weg-Zeit-Gesetz und Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz des freien Falls. Der freie Fall ist ein Sonderfall der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 140, Nr. 26 bis 34

Die Entdeckung der Fallgesetze

Bis weit in das Mittelalter hinein gab es in der Entwicklung der Naturwissenschaften einen Stillstand. „Die Wissenschaft war die Magd der Theologie", das heißt, der Theologie kam in allen Fragen das letzte Wort zu. Dadurch sollte verhindert werden, daß durch die Ergebnisse naturwissenschaftlicher Forschungen berechtigte Zweifel an der Richtigkeit religiöser Glaubenssätze und der biblischen Darstellung und damit auch an der bestehenden feudalistischen Gesellschaftsordnung aufkamen.

Die sich herausbildenden neuen kapitalistischen Produktionsverhältnisse führten während der Renaissance auch zu einer verstärkten Beschäftigung mit technischen und naturwissenschaftlichen Problemen und zu neuen Erkenntnissen, die zu den Lehren der Scholastik[1] in krassem Widerspruch standen. Die Scholastiker stützten sich auf die christliche Glaubenslehre und auf die Lehren des Aristoteles, die sie miteinander in Einklang bringen wollten. Sie lehnten Experimente als überflüssig ab.

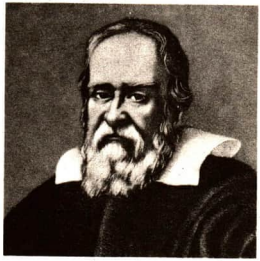


Bild 20/1 Galileo Galilei (1564 bis 1642)

Den entscheidenden Schlag gegen die Scholastik führte der große italienische Gelehrte Galileo Galilei (Bild 20/1). Er wurde 1564 in Pisa geboren. Bereits im Alter von 25 Jahren erhielt er eine Professur an der Universität seiner Heimatstadt. Von 1592 bis 1609 lehrte Galilei an der Universität Padua, später war er als Hofmathematiker und Hofastronom an einem italienischen Fürstenhof tätig.

Er gehörte zu den Anhängern des neuen kopernikanischen Weltsystems (↗ S. 54), für dessen Verbreitung er sich einsetzte. Dadurch kam Galilei in Konflikt mit Dogmen der katholischen Kirche und wurde deshalb 1633 wegen Ketzerei vor ein Inquisitionsgericht gestellt, das ihn zwang, seine Ansichten zu widerrufen. Zugleich verbot man ihm weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen. Galileis Untersuchungen über die Gesetze der Bewegung konnten deshalb erst 1638 in Holland veröffentlicht werden, das außerhalb des Machtbereiches der katholischen Kirche lag.

Die Veränderung der gesellschaftlichen Verhältnisse war aber in Europa schon so weit fortgeschritten, daß sich die neuen Gedanken Galileis bald allgemein durchsetzten. Man kann Galilei zu Recht als den Begründer der experimentellen Methode in der Physik bezeichnen.

Die Arbeiten Galileis über die Bewegungsgesetze wurden schon um 1590 begonnen, als der Gelehrte in seinen Vorlesungen die Lehre des Aristoteles widerlegte, nach der die Körper um so schneller fallen, je schwerer sie sind. Dabei bediente er sich verschiedener Methoden.

Zuerst wies er durch logische Folgerungen die Unrichtigkeit der Lehre des Aristoteles nach: Verbindet man einen

[1] scholé (griech.): Schule. Die Scholastik war im Mittelalter die einflußreichste Lehre und zugleich die herrschende Ideologie der europäischen Feudalgesellschaft.

Bild 21/1 Der Schiefe Turm in der italienischen Stadt Pisa. Hier führte Galilei wahrscheinlich Fallversuche durch.

schweren und einen leichten Körper miteinander, so müßten beide zusammen schneller fallen, da ihr Gesamtgewicht größer als das des schweren Körpers ist. Andererseits hemmt der leichtere Körper – da er ja langsamer fallen soll – die Bewegung des schwereren Körpers, das heißt, beide zusammen müßten langsamer fallen als der schwerere Körper, was im Widerspruch zur Annahme steht.

Galilei stellte deshalb probeweise die Hypothese auf, daß die Geschwindigkeit mit der Fallzeit wächst, und leitete daraus theoretisch die Bewegungsgesetze des freien Falls ab. Sie hatten allerdings nicht die heutige einfache mathematische Form, sondern waren umständliche Wortaussagen.

Ob die Galileische Grundannahme richtig war, konnte nur eine experimentelle Untersuchung des freien Falls ergeben. Es ist ziemlich sicher, daß Galilei am Schiefen Turm von Pisa (Bild 21/1) Fallversuche durchgeführt hat. Wegen der Schwierigkeiten bei der Zeitmessung dürften sie aber wenig überzeugend gewesen sein. Da Galilei nachweisen konnte, daß die Endgeschwindigkeit beim Durchlaufen einer geneigten Ebene der Höhe h genau so groß ist wie beim freien Fall aus der Höhe h, bestätigte er seine Annahmen an einer Fallrinne. Er beschreibt seine Versuche folgendermaßen: „Auf einem Holzbrett von 12 Ellen Länge ... war eine Rinne ... eingegraben. In dieser Rinne ließ man eine ... Messingkugel laufen. Nach Aufstellen des Brettes wurde dasselbe einerseits angehoben, dann ließ man die Kugel ... (durch die Rinne laufen) und verzeichnete die ... (Roll-) Zeit für die ganze Strecke ... Darauf ließen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen und fanden stets genau die halbe (Roll-) Zeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strekken ... und fanden stets, daß die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten ...

Zur Ausmessung der Zeit stellten wir einen Eimer voll Wasser auf, in dessen Boden ein enger Kanal angebracht war, durch den ein feiner Wasserstrahl sich ergoß, der mit einem kleinen Becher aufgefangen wurde während einer jeder beobachteten ... Zeit. Das dieser Art aufgesammelte Wasser wurde ... gewogen; aus der Differenz der Wägemengen erhielten wir die Verhältnisse der Gewichte und (damit) der Zeiten ...“

Die Entdeckung der Fallgesetze durch Galilei ist eines der frühen Beispiele für das Auffinden von Naturgesetzen. Wir wissen aus unserer dialektisch-materialistischen Weltanschauung, daß alle Naturgesetze, alle Erscheinungen und Vorgänge in der Natur erkennbar sind. Bestimmend für den Zeitpunkt der Entdeckung sind vor allem der jeweilige Entwicklungsstand der Gesellschaft und der Wissenschaft. Mit Hilfe erkannter Naturgesetze ist der Mensch in der Lage, seine Umwelt zu verändern. Oft werden naturwissenschaftliche Erkenntnisse von den Ausbeuterklassen mißbraucht. Erst in der sozialistischen Gesellschaftsordnung werden die Naturgesetze ausschließlich zum Wohle der Menschheit genutzt.

Zusammensetzen von Geschwindigkeiten

In der Technik gibt es viele Beispiele, bei denen man sich die Bewegung eines Körpers aus mehreren Teilbewegungen zusammengesetzt denken kann, die sich gegenseitig nicht beeinflussen (Bild 22/1).
Das Zusammensetzen von Geschwindigkeiten läßt sich mit folgendem Experiment veranschaulichen:

6 Durch das Hämmerchen 1 wird der Kugel eine Geschwindigkeit $\vec{v}_1$ erteilt (Bild 22/2a).
Läßt man das Hämmerchen 2 stoßen, so rollt die Kugel mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_2$ (Bild 22/2b).
Wenn beide Hämmerchen gleichzeitig an die Kugel stoßen, rollt sie mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_r$ (Bild 22/2c). Man sagt in diesem Fall, daß sich die Geschwindigkeiten $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ zu einer resultierenden[1] Geschwindigkeit $\vec{v}_r$ *überlagern* oder *zusammensetzen*.

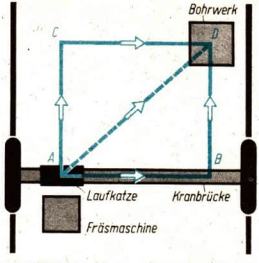


Bild 22/1 Laufkran in einer Werkhalle. Bei gleichzeitiger Verschiebung der Laufkatze und der Kranbrücke setzen sich die Teilbewegungen zu einer Bewegung zusammen. Die Transportzeit ist geringer, als wenn die Teilwege ACD oder ABD zurückgelegt werden.

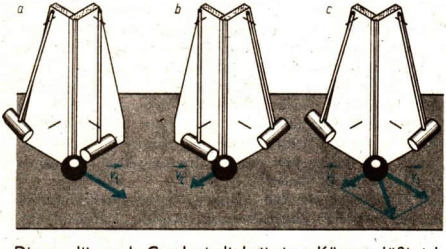


Bild 22/2

Die resultierende Geschwindigkeit eines Körpers läßt sich mit einem besonderen zeichnerischen Verfahren bestimmen, das als vektorielle Addition bezeichnet wird. Die beiden angetragenen Geschwindigkeitsvektoren werden parallel verschoben, bis sich ein **Parallelogramm der Geschwindigkeiten** ergibt. Die Diagonale des Parallelogramms vom gemeinsamen Angriffspunkt aus liefert die resultierende Geschwindigkeit nach Betrag, Richtung und Richtungssinn (Bild 22/3).

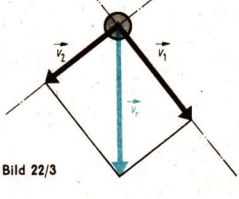


Bild 22/3

Beachten Sie: Der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit läßt sich in einigen Fällen durch eine einfache Rechnung bestimmen, nämlich wenn die Einzelgeschwindigkeiten die gleiche Richtung besitzen. Es wird dann das gleiche Verfahren angewendet, das in Klasse 7 beim Zusammensetzen von Kräften mit gleicher Wirkungslinie benutzt wurde.

[1] von resultare (lat.): sich ergeben.

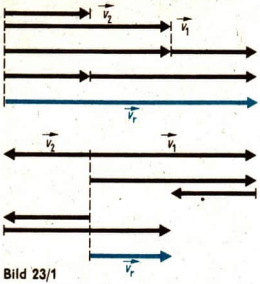


Bild 23/1

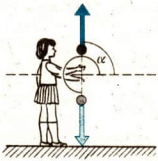
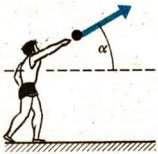
Der Richtungssinn der beiden Geschwindigkeiten stimmt überein:

An das Ende des ersten Geschwindigkeitsvektors trägt man den zweiten Geschwindigkeitsvektor an. Die Reihenfolge ist dabei beliebig (Bild 23/1). Die resultierende Geschwindigkeit wird durch einen Vektor dargestellt, dessen Betrag gleich der Summe der beiden Einzelbeträge ist.

Der Richtungssinn der beiden Geschwindigkeiten ist entgegengesetzt:

Am Ende des ersten Geschwindigkeitsvektors wird der zweite Vektor unter Beachtung des Richtungssinnes angetragen. Auch hier ist die Reihenfolge beliebig (Bild 23/1). Der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit ist durch die Strecke vom gemeinsamen Angriffspunkt bis zur Pfeilspitze des angetragenen Vektors gegeben. Der Richtungssinn der resultierenden Geschwindigkeit stimmt mit dem Richtungssinn der Geschwindigkeit überein, die den größeren Betrag besitzt. Wenn die Beträge gleich sind, ist die resultierende Geschwindigkeit Null.

Die behandelten Verfahren zum Zusammensetzen von Geschwindigkeiten lassen sich auf den **Wurf** anwenden. Je nachdem, ob die beim Abwurf erteilte Anfangsgeschwindigkeit waagerecht, senkrecht (nach oben oder unten) oder schräg gerichtet ist, unterscheidet man:

	waagerechter Wurf	**senkrechter Wurf**	**schräger Wurf**
Abwurfwinkel gegenüber der Horizontalen	$\alpha = 0°, 180°$	$\alpha = 90°$ oder $\alpha = 270°$	α ... beliebig ($\neq 0°, 90°, 180°, 270°$)
Beispiel			

Um die Darstellung einfach zu gestalten, wird vorläufig vom Einfluß des Luftwiderstandes abgesehen. Derartige Vereinfachungen müssen wir oft vornehmen, weil die Berücksichtigung aller Einflüsse einen hohen mathematischen Aufwand erfordert und komplizierte mathematische Ausdrücke liefert.

Bei allen Wurfbewegungen setzen sich eine geradlinige, gleichförmige Bewegung und die geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung des frei fallenden Körpers zusammen. Man hat daher die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ (gleichförmige Bewegung) mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ (freier Fall) vektoriell zusammenzusetzen, um die resultierende Geschwindigkeit $\vec{v}_r$ zu erhalten.

Der **senkrechte Wurf** ist dadurch gekennzeichnet, daß die Richtungen der beiden Geschwindigkeitsvektoren übereinstimmen. Für die Beträge der resultierenden Geschwindigkeiten ergeben sich je nach dem Richtungssinn der Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ folgende Fälle:

Bewegung	Anfangsgeschwindigkeit	Fallgeschwindigkeit	resultierende Geschwindigkeit
senkrechter Wurf nach oben	v_0 ↑	$g \cdot t$ ↓	$v_r = v_0 - g \cdot t$
senkrechter Wurf nach unten	v_0 ↓	$g \cdot t$ ↓	$v_r = v_0 + g \cdot t$

Beim **waagerechten Wurf** ändern sich dauernd Betrag und Richtung der resultierenden Geschwindigkeit. Die Ursache erkennt man leicht aus der grafischen Darstellung (Bild 24/1): Während die Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ Betrag und Richtung beibehält, nimmt der Betrag der Fallgeschwindigkeit $\vec{v}$ mit der Zeit zu. Die Bahn beim waagerechten Wurf ließe sich mit dem folgenden Experiment direkt aufnehmen (Bild 24/2).

7 ▼ Eine Kugel rollt eine Fallrinne hinab und bewegt sich dann gleichförmig weiter. In der Luft beschreibt sie eine gekrümmte Kurve. Durch Verschieben des horizontalen Brettes, das mit Kohlepapier belegt ist, werden eine Anzahl von Bahnpunkten aufgenommen und auf der dahinter stehenden Tafel markiert. Die Verbindung einer genügend großen Anzahl von Bahnpunkten liefert eine sogenannte **Wurfparabel** (Bild 24/3).

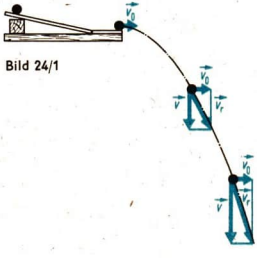


Bild 24/1

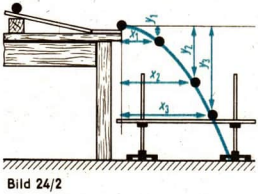
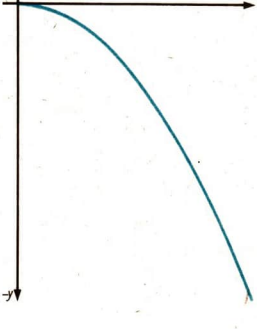


Bild 24/2

Bild 24/3



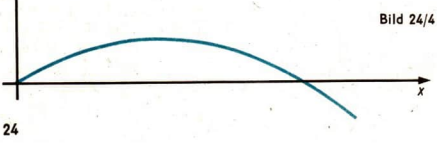


Bild 24/4

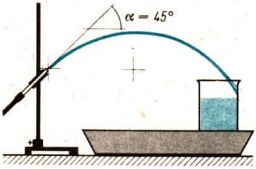


Bild 25/1

Eine Wurfparabel ergibt sich auch beim **schrägen Wurf** (Bild 24/4). Die *Wurfweite*, das heißt die horizontale Entfernung Abwurfpunkt–Auftreffpunkt, und deren Abhängigkeit vom Abwurfwinkel und von der Anfangsgeschwindigkeit läßt sich modellmäßig mit Wasserstrahlen untersuchen. Man findet dabei folgende Ergebnisse:

1. Die Wurfweite hängt vom Abwurfwinkel α ab. Die größte Wurfweite wird bei $\alpha = 45°$ erreicht (Bild 25/1).
2. Bei Abwurfwinkeln, die sich zu 90° ergänzen, erhält man gleiche Wurfweiten (Bild 25/2).

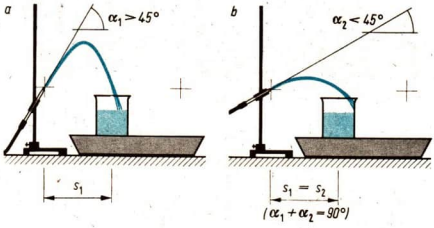


Bild 25/2

3. Bei konstantem Abwurfwinkel wächst die Wurfweite mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0.

Durch den Einfluß des Luftwiderstandes ergeben sich beim waagerechten und beim schrägen Wurf größere Abweichungen von den in Bild 24/3 und Bild 24/4 gezeichneten Kurven. Derartige, durch den Luftwiderstand veränderte Wurfkurven bezeichnet man als **ballistische** Kurven (Bild 25/3). Sie treten vor allem bei der Bewegung von Geschossen und ballistischen Raketen auf. Die Lehre von den Geschoßbahnen heißt **Ballistik**. Sie spielt im Militärwesen eine große Rolle.

Die Bestimmung ballistischer Kurven ist oft mit einem erheblichen mathematischen Aufwand verknüpft, der viel Zeit erfordert. Um eine schnelle Gefechtsbereitschaft zu gewährleisten, werden daher Tabellen benutzt oder Rechenautomaten eingesetzt.

Jeder Soldat unserer NVA muß gewisse Grundkenntnisse der Ballistik beherrschen, um die Waffentechnik bei der Verteidigung unserer Heimat voll zu meistern.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 141, Nr. 35 bis 38

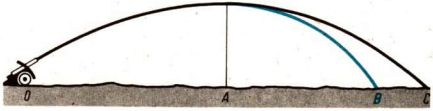
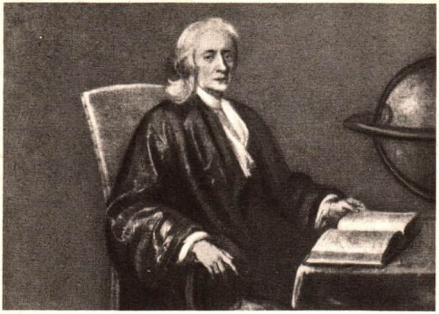


Bild 25/3



Grundlagen der Dynamik

1687 erschien Isaac Newtons grundlegendes Werk „Die mathematischen Prinzipien der Physik". In diesem Buch wurde eine zusammenfassende Darstellung der Kinematik gegeben und ein damals noch neues Teilgebiet der Mechanik – die Dynamik – entwickelt.
In der Dynamik wird der Zusammenhang zwischen den Bewegungen der Körper und den Kräften untersucht.

Die Kraft

In den Klassen 6 und 7 wurden bereits einige Kenntnisse über die physikalische Größe Kraft vermittelt, die wiederholt und erweitert werden sollen:

Das Vorhandensein von Kräften läßt sich nur an den auftretenden Wirkungen erkennen:

> Eine Kraft kann die Geschwindigkeit eines beweglichen Körpers verändern.
> Eine Kraft kann einen Körper verformen.

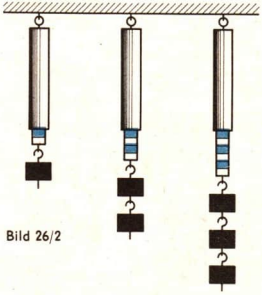


Bild 26/2

Die Verformung ist um so größer, je größer die Kraft ist. Bei der **statischen Kraftmessung** bedient man sich dieser Tatsache. Die doppelte Verlängerung einer Feder bedeutet, daß die doppelte Kraft wirkt, eine dreifache Verlängerung zeigt an, daß die dreifache Kraft wirkt usw. (Bild 26/2). Zwei Kräfte sind demnach gleich groß, wenn sie die gleiche Verlängerung der Feder hervorrufen (Bild 26/3).
Jeden Federkraftmesser eicht man in einer geeigneten Einheit, z. B. in **Kilopond**. (Eine weitere Krafteinheit wird auf Seite 32 beschrieben.)
Für manche Kräfte sind besondere Bezeichnungen gebräuchlich, zum Beispiel Reibungskraft, dynamischer Auftrieb, Luftwiderstand, Gewichtskraft usw. Die Gewichtskraft eines Körpers auf der Erde ergibt sich aus der An-

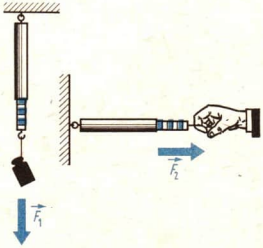


Bild 26/3 Die Längenänderungen der Federn stimmen überein: Gleiche Wirkung, gleiche Kräfte ($F_1 = F_2$)

ziehung zwischen der Erde und dem Körper (↗ Gewichtskraft, ↗ Gravitation).

Die Kraft $\vec{F}$ ist eine vektorielle Größe. Sie ist durch Betrag, Richtung und Richtungssinn gekennzeichnet.

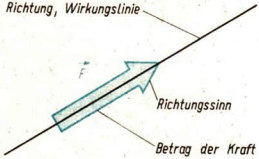


Bild 27/2 Vektorielle Darstellung einer Kraft. Die Länge des Pfeils wird durch einen Maßstab bestimmt, der in geeigneter Weise festzulegen ist. Fehlt der Maßstab, so läßt sich nur sagen, daß sich die Beträge mehrerer gezeichneter Kräfte wie die Längen der Pfeile verhalten.

Bild 27/1

Wirkt eine Kraft auf einen **festen** Körper, der sich unter Krafteinwirkung nicht verformt, so läßt sich noch eine **Wirkungslinie der Kraft** angeben. Längs dieser Wirkungslinie darf der Angriffspunkt der Kraft verschoben werden (Bild 27/1).
Grafisch stellt man Kräfte durch gerichtete Pfeile dar (↗ Geschwindigkeit, S. 9). Die Länge des Pfeils gibt unter Benutzung eines geeigneten Maßstabes den Betrag der Kraft an (Bild 27/2).

Das Wechselwirkungsgesetz

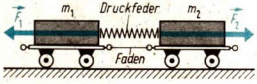


Bild 27/3

Zwischen zwei kleinen Wagen ist eine zusammengedrückte Feder angebracht, die durch einen Faden am Entspannen gehindert wird. Brennt man den Faden durch, so werden *beide* Wagen beschleunigt (Bild 27/3).

Dieser Versuch läßt einen sehr wichtigen physikalischen Sachverhalt erkennen, der bereits in den Klassen 6 und 7 behandelt wurde:
Eine Kraft tritt niemals allein auf. Kräfte wirken stets zwischen zwei Körpern. Spricht man davon, daß eine Kraft wirkt, so betrachtet man nur das Verhalten eines der beteiligten Körper.

Springt man von einem Ruderboot, so werden Körper *und* Boot beschleunigt.
Beim Schießen tritt ein „Rückstoß" auf. Die Pulvergase treiben das Geschoß aus dem Lauf *und* drücken z. B. das Gewehr gegen die Schulter des Schützen.

Aus vielen Beobachtungen und Versuchen, also aus der Erfahrung, ergibt sich immer wieder das folgende Gesetz, das als **Wechselwirkungsgesetz** bezeichnet wird:

Zu jeder Kraft gehört eine Gegenkraft, die den gleichen Betrag hat, aber entgegengesetzt gerichtet ist.

Beachten Sie: Die Kräfte greifen an verschiedenen Körpern an.
Eine andere, sehr kurze Formulierung des Wechselwirkungsgesetzes in lateinischen Worten stammt von Newton. Sie lautet: **actio = reactio**. Das heißt *Wirkung = Gegenwirkung*.
Die Gegenkraft bzw. die Gegenwirkung ist stets vorhanden, auch wenn sie nicht unmittelbar in Erscheinung tritt.
Das Wechselwirkungsgesetz wird vielfach technisch ausgenützt, beispielsweise in Raketentriebwerken (↗ S. 38) und in Strahltriebwerken (Bild 28/1).

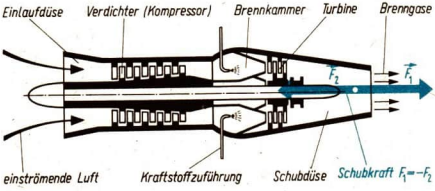


Bild 28/1 Arbeitsweise eines Strahltriebwerkes. Die einströmende Luft wird durch Verdichter in die Brennkammern gedrückt, in denen der Kraftstoff verbrennt. Die Verbrennungsgase strömen durch die Turbine und drehen diese. Dadurch wird der Verdichter angetrieben. Die aus der Schubdüse austretenden Brenngase bewirken die Beschleunigung des Triebwerkes in entgegengesetzter Richtung. – Es ist gleichgültig, was man hierbei als Kraft und was man als Gegenkraft bezeichnet.

Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften

Wirken auf einen Körper gleichzeitig mehrere Kräfte, so lassen sie sich oft in ihrer Wirkung durch eine einzige Kraft ersetzen. Sie heißt die **Gesamtkraft** oder **resultierende Kraft**.

9 Auf einen Nagel, der in ein Brett eingeschlagen ist, wirken über einen Ring die Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$, deren Richtungen durch

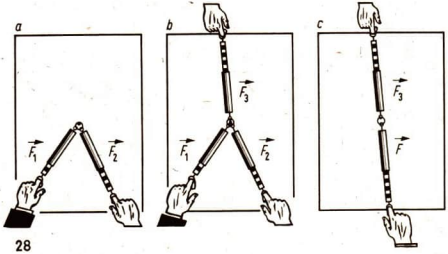


Bild 28/2

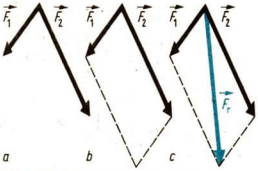


Bild 29/1 a) Man zeichnet die angreifenden Kräfte als Vektoren.
b) Parallel zu den Wirkungslinien der Kräfte werden zwei Hilfslinien gezogen, so daß ein Parallelogramm entsteht.
c) Der Betrag der resultierenden Kraft ist – unter Beachtung des benutzten Kräftemaßstabes – durch die Länge der Diagonale des Parallelogramms gegeben. Der Richtungssinn der resultierenden Kraft ist stets vom gemeinsamen Angriffspunkt weg gerichtet.

die Lage und deren Beträge durch die Anzeige der Federkraftmesser bestimmt sind (Bild 28/2a).

Läßt man an dem Ring noch eine weitere Kraft $\vec{F_3}$ wirken, so ist bei einer bestimmten Richtung und einem bestimmten Betrag von $\vec{F_3}$ Gleichgewicht vorhanden (Bild 28/2b); der Nagel kann entfernt werden. Ersetzt man nun $\vec{F_1}$ und $\vec{F_2}$ durch eine Kraft $\vec{F}$, die den gleichen Betrag wie $\vec{F_3}$ hat, aber entgegengesetzt gerichtet ist, so bleibt das Gleichgewicht bestehen. $\vec{F}$ ersetzt demnach die beiden Kräfte $\vec{F_1}$ und $\vec{F_2}$, sie ist die resultierende Kraft (Bild 28/2c).

Grafisch läßt sich die resultierende Kraft durch eine vektorielle Addition ermitteln (Bild 29/1a, b, c).
Da sich zwei Kräfte zu einer Gesamtkraft *zusammensetzen* lassen, muß sich auch eine Kraft in zwei Teilkräfte *zerlegen* lassen. Derartige **Kräftezerlegungen** spielen in der Technik eine wichtige Rolle, da auf diese Weise die an einzelnen Bau- und Maschinenteilen auftretenden Teilkräfte bestimmt werden können.

Bild 29/2

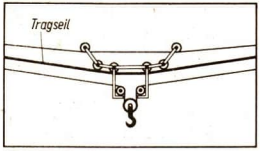


Bild 29/3 bis 5

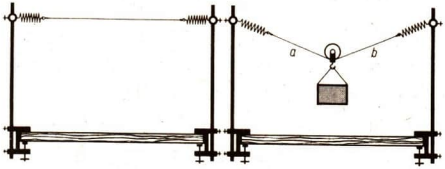


Bild 29/2 zeigt die Kabelkrananlage der Warnowwerft in Warnemünde, Bild 29/3 zeigt einen Ausschnitt, und die Bilder 29/4 und 29/5 zeigen ein Modell. Welche Teile der Anlage werden durch die Gewichtskraft der Laufkatze und der angehängten Last beansprucht? Auf welchem Wege können wir Angaben über die wirkenden Kräfte erhalten?

Die gedehnten Federn im Bild 29/4 lassen erkennen, daß in den Seilstücken a und b Kräfte auftreten. Sie lassen sich durch die Zerlegung von $\vec{F}$ in zwei Teilkräfte $\vec{F_1}$ und $\vec{F_2}$ ermitteln. Diese Teilkräfte werden **Kraftkomponenten** oder kurz **Komponenten** von $\vec{F}$ genannt. Die Wirkungslinien der Komponenten von $\vec{F}$ sind durch die Richtungen der Seilstücke a und b gegeben (Bild 30/1a).
Parallel zu den Wirkungslinien werden zwei Hilfslinien gezogen, die die Pfeilspitze von $\vec{F}$ berühren (Bild 30/1b). Vom Angriffspunkt der Kraft $\vec{F}$ aus lassen sich nunmehr die beiden Komponenten $\vec{F_1}$ und $\vec{F_2}$ abtragen (Bild 30/1c).

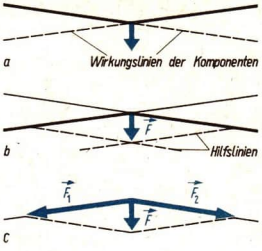


Bild 30/1

Beachten Sie: Die Zerlegung einer Kraft in Komponenten setzt voraus, daß die Wirkungslinien der beiden Komponenten bekannt sind.

Schülerexperimente M 2a und M 2b, Seite 157 und 158, Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 142, Nr. 39 bis 54

Das Newtonsche Grundgesetz

Wir betrachten nochmals den Versuch V 1 (S. 11), wollen aber jetzt auch die Kraft in unsere Betrachtungen einbeziehen.
Die Bewegung des Wagens wird durch eine *konstante Kraft* hervorgerufen, nämlich durch die Gewichtskraft des angehängten Wägestücks. Die Bewegung ist geradlinig, gleichmäßig beschleunigt. Auch andere Versuche, bei denen die Kraft konstant ist, führen zum gleichen Ergebnis:

> Wirkt auf einen frei beweglichen, ruhenden Körper in Richtung des Weges eine konstante Kraft, so gerät er in eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

Welcher gesetzmäßige Zusammenhang zwischen der Kraft und der Beschleunigung besteht, zeigt das folgende Experiment.

10 ▼ Ein Schienenwagen wird durch unterschiedliche Kräfte beschleunigt (Bild 30/2). Die Kräfte und die Beschleunigungen

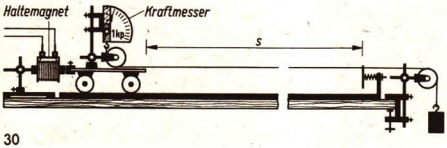


Bild 30/2

sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Dabei wurde berücksichtigt, daß ein Teil der Kraft zur Überwindung der Reibungskraft benötigt wird.

Tabelle 5: Meßreihe

F in kp	s in m	t in s	a in $\frac{m}{s^2}$	$\frac{F}{a}$ in $\frac{kp \cdot s^2}{m}$
0,04	2,00	7,8	0,069	0,58
0,09	2,00	5,3	0,143	0,63
0,15	2,00	4,1	0,238	0,63
0,17	2,00	3,8	0,277	0,61

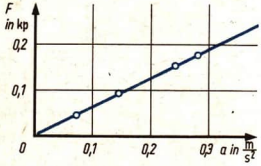


Bild 31/1

Ein Vergleich von F und a zeigt, daß die Beschleunigung des Wagens größer wird, wenn die Kraft zunimmt. Die grafische Darstellung läßt erkennen (Bild 31/1), daß die Meßpunkte auf einer Geraden liegen. Kraft und Beschleunigung sind also einander proportional.
Dieser Erfahrungssatz wurde von Isaac Newton gefunden und heißt das **Newtonsche Grundgesetz**.

Kraft und Beschleunigung sind für ein und denselben Körper einander proportional.	$F \sim a$

Die Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung erkennt man auch daran, daß der Quotient $\frac{F}{a}$ konstant ist (letzte Spalte der Tabelle 5). Er wird mit m bezeichnet.

$$\frac{F}{a} = m.$$

In zwei weiteren Teilversuchen wird der Wagen aus V 10 11 erst mit einem und dann mit 2 Mauerziegeln beladen und wiederum durch unterschiedliche Kräfte beschleunigt. Die Ergebnisse der Versuche 10 und 11 sind in Bild 31/2 dargestellt.

Die grafische Darstellung zeigt:

Bei den beladenen Wagen ist $m = \frac{F}{a}$ größer als beim unbeladenen, aber wiederum konstant $m_2 > m_1 > m_0$. Je größer m ist, um so geringer ist jeweils die mit der gleichen Kraft erreichte Beschleunigung (gestrichelte Linien in Bild 31/2).
Die Körper werden also durch die gleiche Kraft unterschiedlich stark beschleunigt; man sagt, sie sind unterschiedlich *träge*. Die Masse m ist ein Maß für die **Trägheit** eines Körpers, für dessen Widerstand gegenüber einer Beschleunigung.

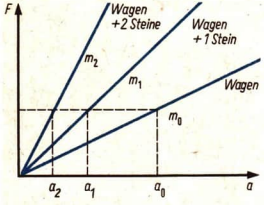


Bild 31/2

Das Newtonsche Grundgesetz weist auf eine wichtige Eigenschaft der Körper hin. Diese Eigenschaft wird durch die physikalische Größe Masse beschrieben. Deshalb wird auch der Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung zur *Definition* der physikalischen Größe **Masse** benutzt.

Die Masse eines Körpers ist gleich dem Quotienten aus der wirkenden Kraft und der Beschleunigung.	$m = \frac{F}{a}$

Die gesetzliche Einheit der Masse ist das **Kilogramm** (Bild 32/1).
Sie lernten bereits in Klasse 6, daß man die Masse eines Körpers durch Wägen mit einer Hebelwaage bestimmen kann. Dabei nutzt man nicht die Trägheit aus, sondern eine andere Eigenschaft der Körper, die Eigenschaft *schwer* zu sein. Genaueres darüber erfahren Sie in den Abschnitten Gewichtskraft (↗ S. 35) und Gravitation (↗ S. 56).

Bild 32/1 Ein Zylinder aus einer Platin-Iridium-Legierung von 39 mm Höhe und 39 mm Durchmesser hat die Masse 1 kg. Er dient als Prototyp, das heißt als Vergleichsmaß für Massenbestimmungen.

Löst man die Definitionsgleichung für die Masse $m = \frac{F}{a}$ nach F auf, so erhält man eine Gleichung, die ebenfalls als Newtonsches Grundgesetz bezeichnet wird:

Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung.	$F = m \cdot a$

In dieser Gleichung sind zwei Aussagen enthalten: Der *Erfahrungssatz* $F \sim a$ und die *Definition* der Masse $m = \frac{F}{a}$.[1]

Gibt man in der Gleichung $F = m \cdot a$ die Masse in der Einheit Kilogramm und die Beschleunigung in der Einheit $\frac{\text{Meter}}{\text{Quadratsekunde}}$ an, so erhält man als Einheit der Kraft $\frac{\text{Kilogramm} \cdot \text{Meter}}{\text{Quadratsekunde}}$. Diese Krafteinheit wird zu Ehren Isaac Newtons als **Newton** bezeichnet:

$$1\,\text{N} = 1\,\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}.$$

[1] Ähnlich wurde schon in Klasse 8 vorgegangen: Gleichung $U = R \cdot I$; Ohmsches Gesetz $I \sim U$; Definition des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$.

$$1\ \text{kp} = 9{,}81\ \text{N}$$
$$1\ \text{N} = \frac{1}{9{,}81}\ \text{kp}$$

Zu der Krafteinheit Kilopond besteht folgende Beziehung: 1 kp = 9,80665 N.
Vereinfachend setzen wir in Rechnungen die nebenstehende Beziehung.
Die Gleichung $F = m \cdot a$ ermöglicht bei bekannter Masse m und bekannter Beschleunigung a eines Körpers die Messung der beschleunigenden Kraft.
Im Gegensatz zur *statischen Kraftmessung*, bei der durch die Verformung eines Körpers eine unmittelbare Ablesung der Kraft am Meßgerät möglich ist, müssen bei einer **dynamischen Kraftmessung** zuerst die Masse und die Beschleunigung gemessen und dann durch Rechnung miteinander verknüpft werden.

Wie groß ist die Kraft, durch die ein Motorrad bei gleichmäßiger Beschleunigung aus dem Stand in 5 s eine Geschwindigkeit von $36\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$ erreicht? Die Masse beträgt 150 kg. Die Reibung ist zu vernachlässigen.

Gegeben:

$m = 150\ \text{kg}$

$v = 36\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$

$t = 5\ \text{s}$

Gesucht:

F

Lösung:

$F = m \cdot a$ und $a = \frac{v}{t}$

$F = \frac{m\ v}{t}$

$F = \frac{150\ \text{kg} \cdot 36 \cdot 10^3\ \text{m}}{5\ \text{s}\ \ 36 \cdot 10^2\ \text{s}}$

$F = 300\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$

$\underline{\underline{F = 300\ \text{N}}}$

Nebenrechnung:

$F = m \cdot \frac{v}{t}$

$v = \frac{36\ \text{km}}{\text{h}} = \frac{36 \cdot 10^3\ \text{m}}{36 \cdot 10^2\ \text{s}}$

Die Kraft beträgt 300 N.

Diese Kraft läßt sich auch in der Einheit Kilopond angeben. Wie schon gezeigt wurde, ist $1\ \text{N} = \frac{1}{9{,}81}\ \text{kp}$; also $300\ \text{N} = \frac{300}{9{,}81}\ \text{kp} = 30{,}6\ \text{kp}$.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 143, Nr. 55 bis 61

Newton, der Begründer der klassischen Mechanik

Isaac Newton (Bild 26/1) wurde 1643 in einem kleinen Dorf in Ostengland geboren. Seine Kindheit verbrachte er auf dem Gutshof seiner Eltern. Später besuchte er eine Lateinschule. Mit 18 Jahren wurde Newton Student an der Universität Cambridge. Da er wenig Geld hatte, bediente er gegen Bezahlung ältere Studenten und Lehrkräfte. Be-

reits 1669 wurde er Professor und verbrachte die nächsten Jahrzehnte fast ausschließlich in Cambridge. Durch die Fürsprache eines Freundes kam er 1699 als Direktor der Münzstätte nach London. 1708 wurde der englische Gelehrte Präsident der berühmten Royal Society, der englischen naturforschenden Gesellschaft. 85 Jahre alt starb Newton im Jahre 1727. Newton lebte in der Zeit des aufblühenden Kapitalismus, in der eine verstärkte naturwissenschaftliche Tätigkeit einsetzte. Das Zentrum der Wissenschaft lag in Westeuropa, weil sich der damals fortschrittliche Kapitalismus in besonderem Maße in England, Frankreich und Holland entwickelte und die den wissenschaftlichen Fortschritt hemmende katholische Kirche in diesen Ländern nur geringen bzw. keinen Einfluß hatte. Innerhalb kurzer Zeit wurde damals das physikalische Wissen in ungeahntem Umfang erweitert. Unter den vielen bedeutenden Physikern dieser Zeit, wie Boyle, Hooke, Huygens, Papin usw., nimmt Isaac Newton den hervorragendsten Platz ein. Bereits in der Studienzeit legte er die Grundlagen für seine wissenschaftlichen Arbeiten. Wie viele seiner Mitbürger flüchtete er beim Ausbruch der Pest auf das Land. Hier konnte er sich zwischen 1665 und 1667 in voller Ruhe wissenschaftlichen Problemen widmen.

Aber erst 1687 erschien sein berühmtestes Werk „Die mathematischen Prinzipien der Physik". Der Sekretär Newtons berichtete darüber.

„... Nach erfolgtem Druck schickte mich Sir Isaac mit den Büchern als Geschenk zu leitenden Persönlichkeiten im College und ... einer von ihnen sagte, man müsse sieben Jahre studieren, ehe man etwas von diesem Buch verstehe.
Sir Isaac war zu jener Zeit ständig beschäftigt ... gestattete sich keine Erholung oder Pause, ... er hielt jede Stunde für verloren, die nicht dem Studium gewidmet war."

In den „Mathematischen Prinzipien der Physik" gibt Newton eine systematische Darstellung der gesamten Mechanik, wobei er ältere Vorstellungen und Erkenntnisse präzisiert und erweitert und dabei neue, eigene Gedankengänge zugrundelegt. Während in den beiden ersten Teilen des Werkes die Bewegungen der Körper untersucht und beschrieben werden, enthält der dritte Teil die neuen Erkenntnisse Newtons über die Bewegung der Himmelskörper (↗ Gravitation).
Newton war ein außerordentlich vielseitiger Gelehrter. So entwickelte er neue mathematische Methoden, die eine

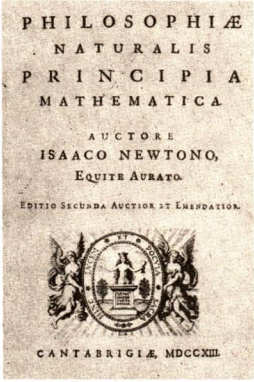

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.
AUCTORE
ISAACO NEWTONO,
EQUITE AURATO.
EDITIO SECUNDA AUCTIOR ET EMENDATIOR.
CANTABRIGIÆ, MDCCXIII.

Bild 34/1

der Grundlagen für den Aufschwung der höheren Mathematik im 18. und 19. Jahrhundert bildeten.
Newton führte auch umfangreiche chemische Untersuchungen durch. In der Physik müssen weiterhin seine experimentellen Arbeiten auf dem Gebiete der Optik erwähnt werden, die Newton als einen hervorragenden Experimentator ausweisen. Auch das Spiegelteleskop wurde von Newton erfunden und von ihm erstmalig gebaut und benutzt.
Das von Newton geschaffene System der Mechanik bildete in den folgenden Jahrhunderten die Grundlage für viele physikalische Arbeiten. Aber auch in der physikalischen Erkenntnis gibt es keinen Stillstand. Durch neue Erkenntnisse im 20. Jahrhundert ist Newtons „Klassische Mechanik" erweitert worden. Es entstanden neue Theorien, zum Beispiel die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik, in denen die „Klassische Mechanik" als Sonderfall enthalten ist.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 144, Nr. 62

Die Gewichtskraft

Die geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung eines frei fallenden Körpers ist auf die Anziehungskraft zwischen der Erde und dem Körper zurückzuführen (↗ Gravitation).
Diese Anziehungskraft kann nach dem Newtonschen Grundgesetz berechnet werden, wenn man an Stelle der Beschleunigung a die Fallbeschleunigung g setzt: $F = m \cdot g$.
Da die Fallbeschleunigung für alle Körper am gleichen Ort konstant ist, besteht zwischen der Masse eines frei fallenden Körpers und der auf ihn wirkenden Anziehungskraft direkte Proportionalität. $F \sim m$.
Stellt man den Körper auf eine Unterlage oder hängt ihn auf, so wirkt die Anziehungskraft der Erde selbstverständlich weiterhin auf den Körper. In der Unterlage oder in der Aufhängung entstehen elastische Verformungen, die eine entgegengerichtete Kraft von gleichem Betrag hervorrufen. Der Körper bleibt deshalb in Ruhe (Bild 35/1). In einem solchen Fall spricht man nicht von einer Anziehungskraft, die auf den Körper wirkt – wie es physikalisch richtig wäre –, sondern sagt, daß der Körper eine **Gewichtskraft** $G = m \cdot g$ hat.

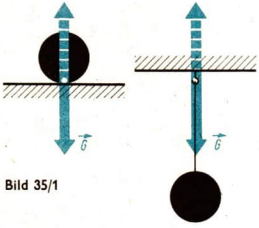


Bild 35/1

Beachten Sie: Masse und Gewichtskraft eines Körpers sind unterschiedliche Größen. Die Gewichtskraft eines Körpers darf deshalb nicht in einer Einheit der Masse, z. B. in Kilogramm, gemessen werden.

▶ Die Gewichtskraft eines Körpers ist die Kraft, mit der er senkrecht nach unten auf eine Unterlage drückt oder an einer Aufhängung zieht.

Gewichtskraft = Masse · Fallbeschleunigung	$G = m \cdot g$

■ Welche Gewichtskraft hat ein Körper mit der Masse 100 kg?

Gegeben:

$m = 100\ \text{kg}$

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

Gesucht:

G

Lösung:

$G = m \cdot g$

$G = 100\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$\underline{\underline{G = 981\ \text{N}}}$

Ein Körper mit der Masse 100 kg hat eine Gewichtskraft von 981 N.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 144, Nr. 63 bis 66

Das Trägheitsgesetz

Bisher wurde das Verhalten von Körpern untersucht, auf die *eine Kraft wirkt*. Welche physikalischen Aussagen ergeben sich aus dem Newtonschen Grundgesetz, wenn *keine Kraft wirkt?*

Mit $F = 0$ ergibt sich aus $F = m \cdot a$ die Gleichung

$m \cdot a = 0$.

Das Produkt zweier Faktoren ist Null, wenn mindestens einer der beiden Faktoren Null ist. Die Möglichkeit

$m = 0$

scheidet aus, denn jeder Körper besitzt eine bestimmte Masse.

Aus der zweiten Möglichkeit

$a = 0$

ergibt sich: Wirkt auf einen Körper keine Kraft, so ist die Beschleunigung Null oder in anderer Formulierung:

Wirkt auf einen Körper keine Kraft, so behält er seine Geschwindigkeit bei.

Beispielsweise behält ein Körper, der sich in geradliniger, gleichförmiger Bewegung befindet, *Betrag und Richtung* der Geschwindigkeit bei, so lange keine Kraft auf ihn wirkt.

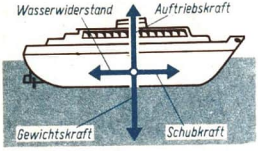


Bild 37/1 Auf das fahrende Schiff wirken Gewichtskraft und Auftriebskraft, Schubkraft und Wasserwiderstand. Die vektorielle Summe aller Kräfte ist Null. Nach dem Trägheitsgesetz bewegt sich das Schiff daher geradlinig, gleichförmig. Warum befindet es sich nicht in Ruhe?

Ein Körper, der die Geschwindigkeit Null hat, das heißt, der sich in Ruhe befindet, bleibt in Ruhe, solange keine Kraft auf ihn wirkt.
Diese Aussagen gelten auch, wenn zwar auf einen Körper Kräfte einwirken, die resultierende Kraft aber Null ist (Bild 37/1). „Keine Kraft" bezieht sich in diesem Fall auf die resultierende Kraft.
Die Eigenschaft eines Körpers, beim Fehlen einer Kraft seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung beizubehalten, heißt die **Trägheit** des Körpers. Sie ist um so größer, je größer die Masse des Körpers ist (↗ S. 32).
Diese Erkennnisse werden im *Trägheitsgesetz* zusammengefaßt. Das Trägheitsgesetz ist ein Sonderfall des Newtonschen Grundgesetzes.

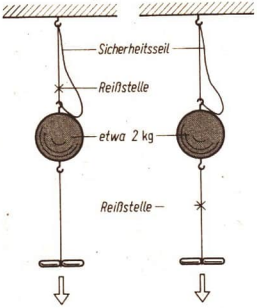


Bild 37/2 und 3

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

Das Trägheitsgesetz wird durch viele Experimente bestätigt (Bilder 37/2 und 3) und vielfach praktisch genutzt (Bilder 37/4 und 5).

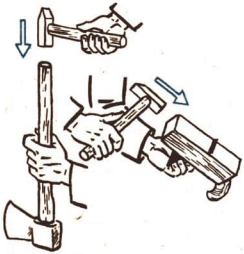


Bild 37/4 und 5

In diesem Abschnitt wurde das Trägheitsgesetz auf deduktivem Wege aus dem Grundgesetz der Mechanik hergeleitet. Aus einem allgemeinen Gesetz (Newtonsches Grundgesetz) wurde ein spezielles Gesetz (Trägheitsgesetz) abgeleitet. Die dabei zugrunde gelegte besondere Bedingung forderte, daß die Kraft gleich Null ist.
Auch mathematische Sätze werden deduktiv gewonnen. Es besteht jedoch ein grundlegender Unterschied zwischen mathematischen Sätzen und physikalischen Gesetzen.
Mathematische Sätze erhält man durch folgerichtige Überlegungen aus bereits bewiesenen Sätzen oder Axiomen. Eine Bestätigung der gefundenen mathematischen Sätze ist nicht erforderlich.
Physikalische Gesetze werden im allgemeinen experimen-

tell gewonnen. Schlägt man in der Physik einen deduktiven Weg ein, so muß in jedem Fall das Ergebnis der Überlegungen, die Formulierung des physikalischen Gesetzes, experimentell überprüft werden.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 144, Nr. 67 bis 71

Ein Raketenstart – physikalisch betrachtet

Einige Gesetzmäßigkeiten der Dynamik sollen am Beispiel des Startes einer bemannten Rakete nochmals erläutert werden.

Der Start der Rakete erfolgt von einer Plattform, auf der die Rakete in senkrechter Startstellung steht. An der Raketenspitze befindet sich das Raumschiff. Auf horizontal angebrachten Sitzen, die der Körperform angepaßt sind, liegen die Kosmonauten (Bild 38/1). Beim Start strömen die unter einem hohen Druck stehenden Verbrennungsgase aus den Düsen ins Freie, wo der Druck geringer ist. Nach dem Wechselwirkungsgesetz wirkt aber nicht nur eine Kraft auf den austretenden Gasstrahl, sondern eine Gegenkraft – die Schubkraft – auch auf die Brennkammern und damit auf die Rakete (↗ Strahltriebwerk). Die Schubkraft wächst nach dem Zündbeginn schnell an und wird nach etwa 5 s bis 10 s größer als die Gewichtskraft der Rakete.

Werden die Haltevorrichtungen gelöst, so bewegt sich die Rakete beschleunigt nach oben (Bild 38/2). Die Startbeschleunigung kurz nach dem Abheben läßt sich näherungsweise nach dem Newtonschen Grundgesetz berechnen.

Bild 38/1

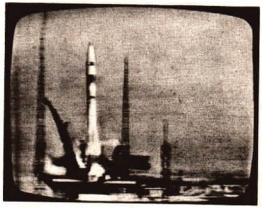


Bild 38/2

■ Wie groß ist die Startbeschleunigung einer Rakete, wenn die Kraft einen Betrag von 600 Mp erreicht? (Beachten Sie: Ein Teil der Schubkraft wirkt der Gewichtskraft der Rakete entgegen, der andere Teil der Schubkraft beschleunigt die Rakete.)

Gegeben:

$m = 513\,\text{t}$

$m = 5{,}13 \cdot 10^5\,\text{kg}$

$F = 600\,\text{Mp}$

$F = 6 \cdot 10^5\,\text{kp}$

$F = 6 \cdot 9{,}81 \cdot 10^5\,\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$

Gesucht:

a

Lösung:

$F = m \cdot g = m \cdot a$

$a = \frac{F}{m} = g$

$a = \frac{6 \cdot 9{,}81 \cdot 10^5\,\text{kg} \cdot \text{m}}{5{,}13 \cdot 10^5\,\text{kg} \cdot \text{s}^2} - 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$a \approx 1{,}7\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Die Startbeschleunigung beträgt etwa $1{,}7\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Die Kosmonauten werden beim Start infolge der Trägheit stark gegen die Sitze gedrückt, wie man etwa beim plötzlichen Anfahren eines PKW gegen die Rücklehne gedrückt wird. Man kann deshalb auch sagen, daß sich die „Gewichtskraft" der Kosmonauten erhöht.
Sie beträgt jetzt

$$G = m \cdot g + m \cdot a = m\,(g + a).$$

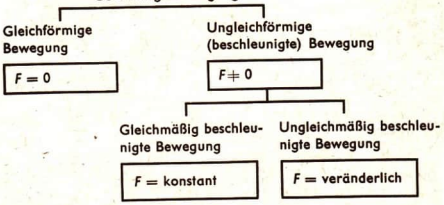
$$G = m\left(9{,}81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} + 1{,}7\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\right) = m \cdot 11{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}.$$

Bei einer Masse von 75 kg würde ein Kosmonaut eine „Gewichtskraft" von rund 88 kp haben.

Die hier durchgeführten Rechnungen gelten nur für das Abheben von der Startrampe. Während des Aufsteigens verliert die Rakete ununterbrochen an Masse, denn in jeder Sekunde werden etwa 2 t Gase ausgestoßen. Eine weitere Massenverminderung tritt durch das Abstoßen der leeren Raketenstufen auf. Schließlich verändert sich auch die Schubkraft, da der Außendruck abnimmt. Aus diesen Gründen wächst die Schubbeschleunigung noch erheblich an.
Durch eine entsprechende Richtungsänderung läßt sich erreichen, daß das Raumschiff bei Brennschluß der letzten Raketenstufe in eine Umlaufbahn um die Erde einbiegt. Die bei der Erdumkreisung gültigen physikalischen Gesetze werden im Abschnitt Gravitation behandelt.

Bewegungsart und Kraft

In der Kinematik werden die Bewegungsarten der Körper untersucht und beschrieben, ohne daß die Kräfte berücksichtigt werden.
Mit unseren Kenntnissen aus der Dynamik sind wir nunmehr imstande, die einzelnen Bewegungsarten *entsprechend den wirkenden Kräften* zu systematisieren. Dabei werden wir uns auf solche Bewegungen beschränken, bei denen Kraft und Weg die gleiche Richtung haben.



Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 144, Nr. 72 bis 74

Die physikalischen Größen und ihre Einheiten

Die Tabelle 6 enthält eine Übersicht über alle physikalischen Größen, die bisher in der Mechanik behandelt wurden.

Tabelle 6: Physikalische Größen und Einheiten

Größe	Formelzeichen	Einheit
Länge, Weg	s	1 m
Zeit	t	1 s
Masse	m	1 kg
Kraft	F	$1\ \frac{kg \cdot m}{s^2}$
Fläche	A	$1\ m^2$
Volumen	V	$1\ m^3$
Geschwindigkeit	v	$1\ \frac{m}{s}$
Beschleunigung	a	$1\ \frac{m}{s^2}$
Dichte	ϱ	$1\ \frac{kg}{m^3}$

Alle physikalischen Größen lassen sich in zwei Gruppen einteilen, in **Basisgrößen** und in **abgeleitete Größen.** Als Basisgrößen bezeichnet man solche physikalischen Größen, die nicht mehr auf andere Größen zurückgeführt werden. Für jede Basisgröße müssen ein **Meßobjekt,** eine **Meßapparatur,** eine **Meßvorschrift** und eine **Einheit** festgelegt werden.

■ *Basisgröße Länge*

Meßobjekt: Stativstab oder ein anderer Körper
Meßapparatur: Stahlbandmaß
Meßvorschrift: Das Bandmaß ist an den Stativstab anzulegen. Der Abstand der Striche der Bandmaßteilung, die mit dem Stabanfang und Stabende übereinstimmen, ist gleich der Länge des Stativstabes.
Einheit: Das Meter

Ein weiteres Beispiel:

Basisgröße Kraft

Meßobjekt: Hakenkörper unter dem Einfluß der Erdanziehung.
Meßapparatur: Zeigerkraftmesser

Meßvorschrift: Der Hakenkörper wird an den Zeigerkraftmesser gehängt. Die Kraft ergibt sich durch Zeigerablesung an der geeichten Skale.

Einheit: Das Newton

Die abgeleiteten physikalischen Größen werden *durch eine Rechenvorschrift* – beispielsweise durch eine **Gleichung** – *definiert*:

$$\text{Fläche} = \text{Länge} \cdot \text{Länge}$$

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Länge}}{\text{Zeit}}$$

$$\text{Beschleunigung} = \frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Zeit}} = \frac{\text{Länge}}{\text{Zeit} \cdot \text{Zeit}}$$

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, möglichst wenige Basisgrößen zu verwenden. In der Mechanik haben wir in diesem Buch drei Basisgrößen benutzt, die Länge, die Zeit und die Kraft.

Bei den Einheiten unterscheidet man **Basiseinheiten** und **abgeleitete Einheiten.** Die Basiseinheiten wurden so ausgewählt und gesetzlich festgelegt, daß sich die Messungen möglichst einfach und genau durchführen lassen. So wurden als Basiseinheiten das Meter, die Sekunde und das Kilogramm festgelegt.

Die abgeleiteten Einheiten erhält man, wenn man in die entsprechenden Größengleichungen Einheiten einsetzt:

$$\frac{s}{t} = v \rightarrow \frac{\text{Längeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}} = \text{Geschwindigkeitseinheit} \rightarrow \frac{1\ \text{m}}{1\ \text{s}} = 1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

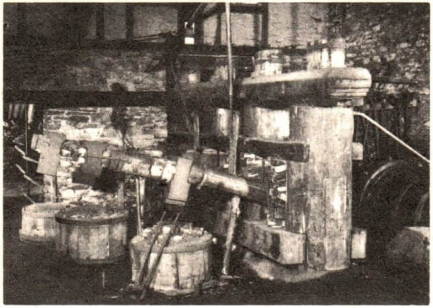
$$\frac{v}{t} = a \rightarrow \frac{\text{Geschwindigkeitseinheit}}{\text{Zeiteinheit}} = \text{Beschleunigungseinheit} \rightarrow \frac{1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1\ \text{s}} = 1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m \cdot a = F \rightarrow \text{Masseneinheit} \cdot \text{Beschleunigungseinheit} = \text{Krafteinheit} \rightarrow 1\ \text{kg} \cdot 1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = 1\ \text{N}$$

Tabelle 7: Größen und Einheiten

Basisgröße	abgeleitete Größe	Basiseinheit	abgeleitete Einheit
Länge		1 m	
Zeit		1 s	
Kraft			$1\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
	Masse	1 kg	
	Geschwindigkeit		$1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$
	Beschleunigung		$1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 145, Nr. 75 und 76



Energie

Vor der Erfindung der Dampfmaschine waren viele Hammerwerke in Betrieb. Das nebenstehende Bild zeigt den „Frohnauer Hammer" im Erzgebirge, der im Jahre 1600 in Betrieb genommen wurde. Ein sich drehendes Wasserrad hebt den Hammer, der dadurch potentielle Energie erhält. Beim Niederschlagen des Hammers wird mechanische Arbeit verrichtet.

Mechanische Arbeit und potentielle Energie

Die Begriffe *Arbeit* und *Energie* wurden bereits in den Klassen 7 und 8 behandelt. Sie sollen in diesem Abschnitt wiederholt und erweitert werden.

Wirkt auf einen Körper in Wegrichtung eine Kraft – das heißt, verschiebt sich der Angriffspunkt der Kraft in Richtung des Weges – so wird mechanische Arbeit verrichtet. Bei konstanter Kraft ist die Arbeit das Produkt aus Kraft und Weg (Bild 42/2).

Die Arbeit ist bei konstanter Kraft das Produkt aus der in Richtung des Weges wirkenden Kraft und dem zurückgelegten Weg.	$W = F \cdot s$

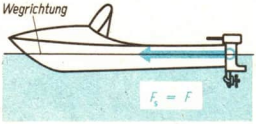


Bild 42/2 Bei der gleichförmigen Bewegung eines Motorbootes im Wasser wird Reibungsarbeit verrichtet. Wirkt die Kraft in Richtung des Weges, so beträgt die Arbeit $W = F \cdot s$.

Wirkt eine Kraft unter einem bestimmten Winkel zur Wegrichtung, so ist für die Arbeit nur die Komponente der Kraft in Richtung des Weges von Bedeutung (Bilder 42/3 und 42/4). Beträgt der Winkel 90°, so ist die Arbeit Null, weil die Kraftkomponente Null ist. Bei konstanter Kraft gilt allgemein:

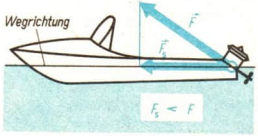


Bild 42/3 Bei einem Boot mit einem Außenbordmotor wirkt die Schubkraft des Motors unter einem Winkel zur Richtung des Weges. Die Arbeit ist dann $W = F_s \cdot s$.

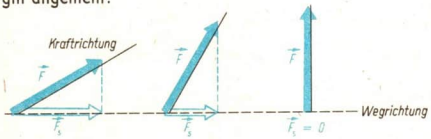


Bild 42/4

Die mechanische Arbeit ist gleich dem Produkt aus der in Wegrichtung wirkenden Kraftkomponente F_s und dem Weg s.	$W = F_s \cdot s$

Bleibt die Kraft während des Verrichtens einer Arbeit nicht konstant, so läßt sich keine so einfache Gleichung angeben. Zur Berechnung der Arbeit müssen dann besondere mathematische Methoden verwendet werden.

Die Einheit der Arbeit ergibt sich als Produkt aus der Krafteinheit Newton und der Wegeinheit Meter zu 1 N · 1 m. Sie wird als **Newtonmeter (1 N · m)** bezeichnet. Die Einheit Newtonmeter ist gleich der in Klasse 8 bereits eingeführten Einheit **Wattsekunde (1 W · s).**

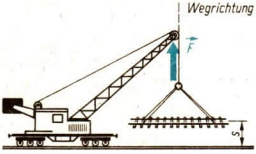


Bild 43/1

Besonders wichtige Formen der mechanischen Arbeit sind die *Hubarbeit* und die *Federspannarbeit*. Dabei wird vorausgesetzt, daß sich der Angriffspunkt der Kraft *gleichförmig* verschiebt.

Ein Eisenbahndrehkran verrichtet beim Heben von Schienen Hubarbeit (Bild 43/1). Die Kraft wirkt in Wegrichtung. Die Hubarbeit beträgt

$W = F \cdot s = G \cdot h.$

Wegen der Beziehung $G = m \cdot g$ (↗ S. 36) kann man $W = m \cdot g \cdot h$ schreiben.

Beim Dehnen einer Feder ist die Kraft nicht konstant. Je stärker die Feder gespannt wird, um so größer ist die notwendige Kraft (Bild 43/2). Bezeichnet man die Endkraft mit F_E und den dazugehörigen Weg (den Weg des Angriffspunktes der Kraft) mit s, so läßt sich die Federspannarbeit mit Hilfe der Gleichung $W_F = \frac{1}{2} F_E \cdot s$ berechnen.

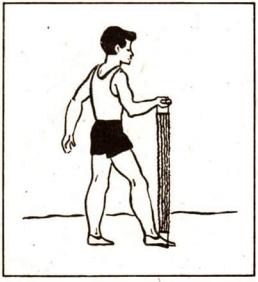


Bild 43/2 Beim Spannen des Expanders ist die Federspannarbeit gleich dem Produkt aus der halben Endkraft und der Federverlängerung:

$W_F = \frac{1}{2} F_E \cdot s$

Wird an einem Körper Hubarbeit oder Federspannarbeit verrichtet, so erlangt der Körper einen besonderen Zustand: Der Körper hat mechanische Energie. Beispielsweise erhält ein Körper potentielle Energie, wenn an ihm Hubarbeit verrichtet wird.

Die mechanische Energie läßt sich durch die aufgewandte Arbeit berechnen. Energieeinheiten sind Newtonmeter und Wattsekunde.

Hubarbeit $W = m \cdot g \cdot h \rightarrow$
potentielle Energie eines gehobenen Körpers $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$

Für die potentielle Energie einer gespannten Feder gilt entsprechend:

Federspannarbeit $W_F = \frac{1}{2} F_E \cdot s \rightarrow$

potentielle Energie einer gespannten Feder:

$$W_F = \frac{1}{2} F_E \cdot s$$

▶ Als potentielle Energie bezeichnet man die Fähigkeit eines Körpers, auf Grund seiner Lage oder seines Spannungszustandes Arbeit verrichten zu können.

■ Welche potentielle Energie besitzt ein Körper mit der Masse 10 kg, wenn er um 10 m gegenüber dem Ausgangsniveau gehoben wurde?

Gegeben:

$m = 10\ \text{kg}$

$h = 10\ \text{m}$

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

Gesucht:

W_{pot}

Lösung:

$W_{pot} = m \cdot g \cdot h$

$W_{pot} = 10\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10\ \text{m}$

$\underline{\underline{W_{pot} = 981\ \text{N} \cdot \text{m}}}$

Die potentielle Energie beträgt 981 N · m.

Beschleunigungsarbeit und kinetische Energie

Für die Hubarbeit und die Federspannarbeit ist kennzeichnend, daß sich der Angriffspunkt der Kraft *gleichförmig* verschiebt. Diese mechanischen Arbeiten faßt man unter dem Begriff *Verschiebungsarbeit* zusammen.
Sehr oft verschiebt sich aber beim Verrichten einer Arbeit der Angriffspunkt einer Kraft *ungleichförmig*. Die dabei verrichtete Arbeit heißt **Beschleunigungsarbeit**.

Beachten Sie: Bei den meisten Bewegungsvorgängen treten Verschiebungs- und Beschleunigungsarbeit gleichzeitig auf. Zur Vereinfachung der Rechnung vernachlässigt man oft eine dieser Arbeiten, wenn sie klein gegenüber der anderen Arbeit ist.

Eine Gleichung zum Berechnen der Beschleunigungsarbeit läßt sich aus bekannten Gesetzmäßigkeiten herleiten.
Man geht davon aus, daß die beschleunigende Kraft konstant ist und in Bewegungsrichtung wirkt.
Aus dem Newtonschen Grundgesetz $F = m \cdot a$ und der Definitionsgleichung der Arbeit $W = F \cdot s$ folgt:

$W = m \cdot a \cdot s.$

Da nach Voraussetzung die Kraft konstant ist und somit eine geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung vorliegt, gilt $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$. Nach Einsetzen in die Gleichung $W = m \cdot a \cdot s$ ergibt sich

$$W = m \cdot a \cdot \frac{a}{2} \cdot t^2 = \frac{m}{2}(a \cdot t)^2.$$

Wegen $a \cdot t = v$ folgt schließlich $W = \frac{m}{2} \cdot v^2$.

Die an einem Körper verrichtete Beschleunigungsarbeit ist genau so groß wie die **kinetische Energie** (Bewegungsenergie), die der Körper dadurch erhält. Man kann daher die Gleichung zum Berechnen der Beschleunigungsarbeit auch zum Bestimmen der kinetischen Energie eines Körpers benutzen.

Die kinetische Energie eines Körpers ist gleich dem Produkt aus der halben Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit.	$W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$

Wie groß ist die kinetische Energie eines Eisenbahnzuges mit einer Masse von $8 \cdot 10^5$ kg bei einer Geschwindigkeit von $50 \frac{km}{h}$? Das Ergebnis ist in Nm und in kpm anzugeben!

Gegeben:

$m = 8 \cdot 10^5$ kg

$v = 50 \frac{km}{h} = \frac{125 \text{ m}}{9 \text{ s}}$

Gesucht:

W_{kin}

Lösung:

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

$$W_{kin} = \frac{8 \cdot 10^5 \text{ kg} \quad 125^2 \text{ m}^2}{2 \cdot 9^2 \text{ s}^2}$$

$$W_{kin} \approx 772 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

$$W_{kin} \approx 79 \cdot 10^5 \text{ kpm}$$

Die kinetische Energie beträgt etwa $77{,}2 \cdot 10^6$ Nm bzw. $79 \cdot 10^5$ kpm.

Der Satz von der Erhaltung der Energie

Die potentielle Energie kann sich vollständig oder teilweise in kinetische Energie umwandeln und umgekehrt die kinetische Energie in potentielle Energie (↗ Wiederholung). Zu jedem beliebigen Zeitpunkt ist aber die Gesamtenergie, die sich aus der potentiellen und kinetischen Energie zusammensetzt, konstant. Das ist der Inhalt des *Energieerhaltungssatzes der Mechanik*, der bereits in Klasse 7 behandelt wurde:

Bei allen mechanischen Vorgängen ist die Summe aus potentieller und kinetischer Energie konstant.	$W_{pot} + W_{kin} =$ konstant

Wie bei allen physikalischen Gesetzen muß man auch für $W_{pot} + W_{kin} =$ konstant die Gültigkeitsgrenzen angeben: Es wird vorausgesetzt, daß keinerlei Reibung auftritt. In Wirklichkeit läßt sich das nie erreichen. Es wandelt sich bei allen mechanischen Vorgängen kinetische Energie in Wärmeenergie um. Man kann den Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie zu einem **allgemeinen Energieerhaltungssatz** erweitern, wenn man alle Energiearten (mechanische Energie, Wärmeenergie, elektrische Energie usw.) einbezieht.

Energie kann weder neu entstehen, noch kann vorhandene Energie verschwinden. Es treten nur Energieumwandlungen auf. **Die Summe aller Energien ist konstant.**

Im folgenden Beispiel werden an einem Fahrrad Energieumwandlungen betrachtet.
Nach einem Anstoß kommt das Rad nach einer gewissen Zeit zum Stillstand. Das sich drehende Vorderrad besitzt kinetische Energie. Sie wird auf das Antriebsrad und den Anker des Fahrraddynamos übertragen. Im Dynamo wandelt sich die mechanische Energie in elektrische Energie und Wärmeenergie (Reibung) um. Die elektrische Energie wandelt sich in der Glühlampe des Scheinwerfers in Wärmeenergie und Lichtenergie um.
Die Summe der Wärmeenergie und der Lichtenergie ist gleich der kinetischen Energie.

Bild 47/1 Schwerkraftfalle

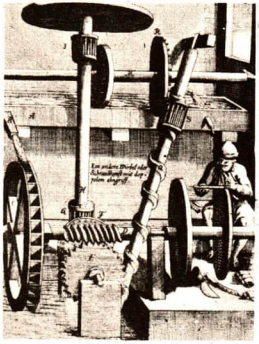


Bild 47/2 Plan eines Perpetuum mobile

Die Bedeutung des Energieerhaltungssatzes

Schon in der Urgemeinschaft wurde bei manchen Fallen (Bild 47/1) und beim Bogen aufgespeicherte mechanische Arbeit genutzt. Selbstverständlich wußten damals die Menschen über die physikalischen Zusammenhänge noch nicht Bescheid. Unsere heutigen Erkenntnisse beruhen aber auch auf den Erfahrungen und Erkenntnissen, die die Menschen im Laufe der Entwicklung sammelten.

Dabei gab es auch infolge unvollkommener Kenntnisse Irrtümer und Fehlschläge. So versuchten seit dem 16. Jahrhundert viele Erfinder, eine Maschine zu bauen, der einmalig Energie zugeführt wird und die dann ständig Arbeit verrichtet. Eine solche Vorrichtung nennt man ein Perpetuum mobile[1]. Jahrhundertelang wurde eine solche Maschine vergeblich gesucht.

Der Satz von der Erhaltung der Energie wurde im 19. Jahrhundert formuliert, als wichtige technisch-ökonomische Fortschritte erzielt worden waren.

Mit der Erfindung der Dampfmaschine wurde es zum Beispiel notwendig, die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Energiearten zu finden, um einen hohen Wirkungsgrad der Maschinen zu erreichen. Unter den vielen Gelehrten, die diese Zusammenhänge aufdeckten, sind vor allem Julius Robert Mayer, James Prescott Joule und Hermann von Helmholtz zu nennen. Unabhängig voneinander gelangten sie zu der Erkenntnis, daß die Energie unerschaffbar und unzerstörbar ist und nur von einer Art in eine andere umgewandelt werden kann. Nun war auch klar, warum der Bau eines Perpetuum mobile unmöglich war.

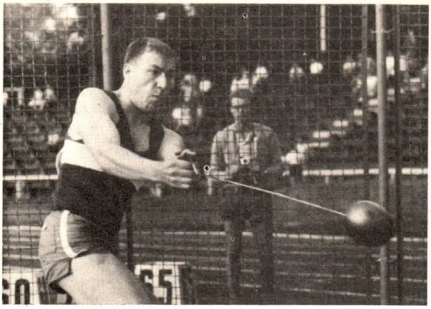
Der Satz von der Energieerhaltung gilt nicht nur für die nichtlebende Natur, sondern auch in der lebenden Natur.

Welche Kenntnisse haben Sie in dieser Hinsicht im Biologieunterricht gewonnen?

Der Energieerhaltungssatz ist für die gesamte Wissenschaft von überragender Bedeutung. Durch ihn kommt zum Ausdruck, daß sich die Entwicklung in der Natur gesetzmäßig vollzieht und nicht durch das Wirken übernatürlicher Kräfte.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 145, Nr. 77 bis 93

[1] perpetuum (lat.): unaufhörlich; mobilis (lat.): beweglich



Die Kreisbewegung

Durch schnelle Umdrehungen erteilt der Athlet beim Hammerwurf dem Wurfgerät eine bestimmte Geschwindigkeit. Um den „Hammer" auf der Kreisbahn zu halten, muß der Sportler eine große Kraft aufwenden.

Die gleichförmige Kreisbewegung

Zur Untersuchung der Kreisbewegung wird eine einfache Experimentieranordnung benutzt:

12 Ein langsam laufender Elektromotor dreht gleichmäßig eine Scheibe. Auf der Scheibe läßt sich eine kleine Kugel befestigen, deren Bewegung beobachtet wird. Die Kugel durchläuft eine Kreisbahn (Bild 48/2).

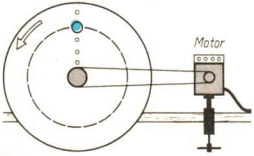


Bild 48/2

Die Geschwindigkeit eines auf einer Kreisbahn umlaufenden Körpers[1] wird als **Bahngeschwindigkeit** bezeichnet. Der *Betrag* der durchschnittlichen Bahngeschwindigkeit ist der Quotient aus dem zurückgelegten Weg s und der dazu benötigten Zeit *t* (Bild 48/3). $v = \frac{s}{t}$. Ist der *Betrag* der Bahngeschwindigkeit *konstant*, so spricht man von einer **gleichförmigen Kreisbewegung**.
Bei der gleichförmigen Kreisbewegung *ändert* sich aber dauernd die *Richtung* der Bahngeschwindigkeit (Bild 48/4). Die gleichförmige Kreisbewegung ist deshalb eine *beschleunigte* Bewegung.

Bild 48/3 In der Zeit t_1 wird vom Massenpunkt der Bogen s_1 durchlaufen, in der Zeit t_2 der Bogen s_2. Die Kreisbewegung heißt gleichförmig, wenn $\frac{s_1}{t_1} = \frac{s_2}{t_2} =$ konstant ist.

[1] Unsere Betrachtungen beziehen sich vorläufig wiederum auf einen umlaufenden Massenpunkt.

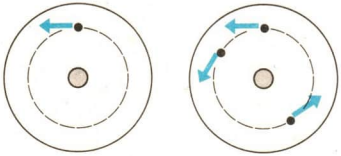


Bild 48/4 Die Bahngeschwindigkeit ist – ebenso wie die Geschwindigkeit bei der geradlinigen Bewegung – eine vektorielle Größe. Sie läßt sich durch einen Vektor $\vec{v}$ darstellen, dessen Richtung mit der Tangente an der Kreisbahn zusammenfällt.

Die Beifügung „gleichförmig" bezieht sich nur auf den Betrag der Bahngeschwindigkeit.

> Die gleichförmige Kreisbewegung ist eine beschleunigte Bewegung.

Bei der Berechnung des Betrages der Bahngeschwindigkeit benutzt man meist nicht beliebige Teile des Kreisbogens, sondern den Kreisumfang. Auf ihm wird bei einem vollen Umlauf der Weg $s = 2 \cdot \pi \cdot r$ zurückgelegt.

Die Zeit, die ein Körper für einen vollen Umlauf benötigt, heißt die **Umlaufzeit** T. Damit ergibt sich für die Bahngeschwindigkeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung:

Bahngeschwindigkeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung	$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$

Welche Bahngeschwindigkeit besitzt ein Raumschiff, das auf einer Kreisbahn mit einem Radius von 6600 km in 90 min einmal die Erde umkreist?

Gegeben:

$r = 6600\ \text{km}$

$T = 90\ \text{min}$

Gesucht:

v

Lösung:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 6600\ \text{km}}{90 \cdot 60\ \text{s}}$$

$$\underline{\underline{v \approx 7{,}7\ \frac{\text{km}}{\text{s}}}}$$

Die Bahngeschwindigkeit des Raumschiffes beträgt etwa $7{,}7\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Radialkraft und Radialbeschleunigung

Die Änderung der Richtung der Geschwindigkeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung eines Körpers ist auf das Wirken einer Kraft zurückzuführen. Sie greift am Körper an und wirkt stets in radialer Richtung und ist zum Mittelpunkt des Kreises gerichtet (Bild 49/1). Deshalb heißt sie **Radialkraft** $\vec{F}_r$. Die auftretende Beschleunigung wird als **Radialbeschleunigung** $\vec{a}_r$ bezeichnet.

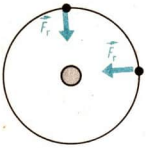


Bild 49/1

Die Radialkraft läßt sich nach folgender Gleichung berechnen:

Radialkraft bei der Kreisbewegung	$F_r = m \cdot \frac{v^2}{r}$

Ein Vergleich dieses Ausdrucks mit dem Newtonschen Grundgesetz liefert uns eine Gleichung für die Radialbeschleunigung:

Radialbeschleunigung bei der Kreisbewegung	$a_r = \frac{v^2}{r}$

Die Radialbeschleunigung $\vec{a}_r$ ist eine vektorielle Größe. Sie ist stets zum Mittelpunkt der Kreisbahn gerichtet.

Beachten Sie: Die Gleichungen für die Radialkraft und die Radialbeschleunigung gelten nur für Kreisbewegungen von Massenpunkten. Auf Drehbewegungen von Körpern (↗ S. 52) darf man sie nicht anwenden!

Da die Radialkraft mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, kann sie auch bei Körpern verhältnismäßig kleiner Masse sehr groß werden.

■ Wie groß ist die Radialkraft, die ein Hammerwerfer (Bild 50/1) kurz vor dem Abwurf aufbringen muß, um das Wurfgerät noch auf der Kreisbahn zu halten? Der „Hammer" hat eine Masse von 7,26 kg, der Bahnradius betrage 2,30 m, die Bahngeschwindigkeit ist im Augenblick des Abwurfes $28\,\frac{m}{s}$. Geben Sie die Radialkraft auch in Kilopond an!

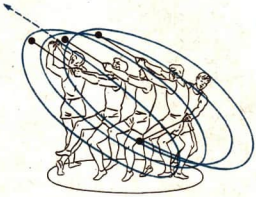


Bild 50/1

Gegeben:

$m = 7{,}26\ \text{kg}$

$v = 28\,\frac{m}{s}$

$r = 2{,}30\ \text{m}$

Gesucht:

F_r

Lösung:

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

$$F_r = 7{,}26\ \text{kg} \cdot \frac{\left(28\,\frac{m}{s}\right)^2}{2{,}30\ \text{m}}$$

$$F_r \approx 2480\ \text{N}$$

$$\underline{\underline{F_r \approx 254\ \text{kp}}}$$

Der Hammerwerfer muß eine maximale Kraft von etwa 254 kp aufwenden.

Nach dem Wechselwirkungsgesetz greift am Sportler eine Gegenkraft an. Sie hat den gleichen Betrag und ist entgegengesetzt gerichtet. Durch Reibung wird sie auf den Boden übertragen.

Warum beeinträchtigt eine nasse Wettkampfanlage die Wurfweite?

Ohne Radialkraft bzw. ohne Radialbeschleunigung ist das Durchlaufen einer Kreisbahn oder eines Teiles einer Kreisbahn nicht möglich. Dabei ist eine mechanische Verbindung zwischen dem umlaufenden Körper und dem Kreismittelpunkt nicht unbedingt notwendig. Dies zeigt der folgende Versuch:

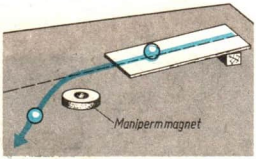


Bild 51/1

Von einer geneigten Ebene rollt eine Stahlkugel auf die Tischplatte. Durch einen starken Magneten wirkt eine Radialkraft, die die Kugel ablenkt (Bild 51/1).

Sehr häufig werden Radialkräfte durch elastische Verformungen hervorgerufen:

Zur Vorbereitung auf Raumflüge benutzen die Kosmonauten *Zentrifugen* (Bild 51/3). Am Ende eines rotierenden Gerüstes befindet sich der Sitz mit dem Kosmonauten (Bild 51/2). Die

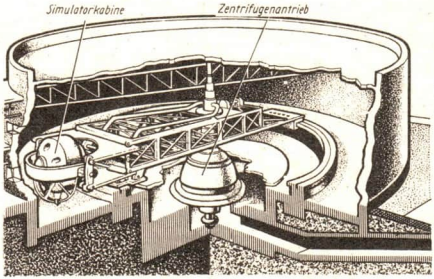


Bild 51/2 Sowjetischer Kosmonaut beim Training im Zentrifugensitz
Bild 51/3 Zentrifuge zum Beschleunigungstraining von Kosmonauten

für die Kreisbewegung des Kosmonauten notwendige Radialkraft wird durch elastische Verformungen des Sitzes und der Aufhängung erzeugt. Bei sehr schneller Drehung der Zentrifuge können Radialbeschleunigungen auftreten, die bis etwa 10mal so groß sind wie die Fallbeschleunigung. Da beim Start und bei der Landung von Raumschiffen Beschleunigungen bis zum achtfachen der Fallbeschleunigung wirksam sind, müssen die Kosmonauten in der Zentrifuge ihren Organismus auf diese starke Belastung vorbereiten (↗ S. 38).

■ Bei der Kurvenfahrt von Straßenfahrzeugen wird die Radialkraft vorwiegend durch die Reibungskraft zwischen Rädern und Straße hervorgerufen. Ist die Bahngeschwindigkeit zu groß oder die Straße vereist bzw. naß, so reicht die Radialkraft für das Durchfahren der Kurve nicht aus. Fahrzeug und Fahrer „werden aus der Bahn getragen". Durch Überhöhen der Kurven läßt sich diese Gefahr vermindern.

Die Drehbewegung (Rotation)

Eine in der Technik sehr häufig vorkommende Bewegung ist die **Drehbewegung** oder **Rotation**. Hierbei dreht sich ein fester Körper[1] um eine Drehachse. Die Scheibe im Experiment 12 auf Seite 48 ist zum Beispiel ein rotierender Körper.
Wir wollen nur solche Drehbewegungen untersuchen, bei denen die Drehachse durch den Körper verläuft. Jeder Punkt eines sich drehenden Körpers durchläuft eine Kreisbahn. Wegen der unterschiedlichen Radien der Kreise besitzen nach der Gleichung $v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$ nicht alle Punkte die gleiche Bahngeschwindigkeit. Je größer die Entfernung des Punktes von der Drehachse ist, um so größer ist die Bahngeschwindigkeit (Bild 52/1).

Bild 52/1 Auf eine Scheibe wird ein bedrucktes Blatt Papier geklebt. Bei Rotation kann man die Buchstaben in der Nähe der Drehachse noch erkennen, während sie weiter außen wegen der größeren Bahngeschwindigkeit verschwimmen.

> Ein fester Körper führt eine Drehbewegung oder Rotation aus, wenn er sich um eine Achse dreht. Jeder Punkt des Körpers durchläuft eine Kreisbahn. Bei einem rotierenden Körper hängt die Bahngeschwindigkeit eines Punktes vom Abstand des Punktes von der Drehachse ab.

■ Ein Laufrad einer Dampfturbine (Bild 53/1) führt in einer Minute 3000 Umdrehungen aus $\left(T = \frac{1}{50}\ \mathrm{s}\right)$.
Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit für zwei Punkte, die eine Entfernung von 0,3 m bzw. 1,0 m von der Drehachse haben?

[1] In diesem Abschnitt soll unter Körper nicht ein Massenpunkt verstanden werden, sondern der Körper selbst.

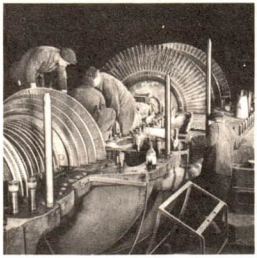


Bild 53/1

Gegeben:

$T = \frac{1}{50}\,\mathrm{s}$

$r_1 = 0{,}3\ \mathrm{m}$

$r_2 = 1{,}0\ \mathrm{m}$

Gesucht:

v_1

v_2

Lösung:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

$$v_1 = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}3\ \mathrm{m} \cdot 50}{1\ \mathrm{s}}$$

$$\underline{\underline{v_1 = 94{,}2\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}}$$

$$v_2 = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1\ \mathrm{m} \cdot 50}{1\ \mathrm{s}}$$

$$\underline{\underline{v_2 = 314\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}}$$

Die Bahngeschwindigkeiten betragen $94{,}2\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ bzw. $314\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Bei einem Körper, der sich um eine Achse dreht, bewegen sich alle Teilchen auf Kreisbahnen. Auf jedes Teilchen wirkt eine Radialkraft F_r. Sie wird von den Kohäsionskräften, die zwischen den Teilchen wirken, aufgebracht. Je schneller der Körper sich dreht, um so größer sind nach $F_r = m \cdot \frac{v^2}{r}$ die notwendigen Radialkräfte, um die Teilchen auf den entsprechenden Kreisbahnen zu halten. Reicht die Kohäsionskraft nicht mehr aus, um die Teilchen auf Kreisbahnen zu halten, so ist der Zusammenhalt des sich drehenden Körpers nicht mehr gewährleistet, er reißt auseinander. Es lösen sich Teile des Körpers, die sich geradlinig weiter bewegen, das heißt, sie fliegen tangential zur bisherigen Kreisbahn weg.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 146, Nr. 94 bis 110

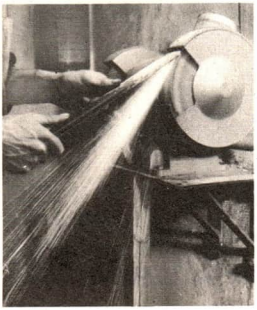
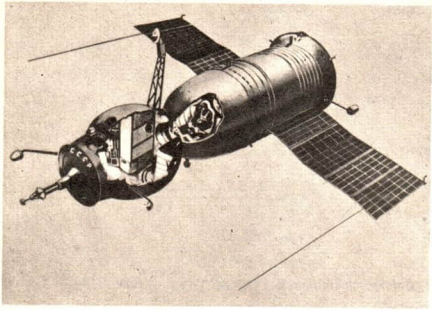


Bild 53/2

Die an einer Schleifscheibe anhaftenden Wassertröpfchen nehmen bei geringer Bahngeschwindigkeit auf Grund der wirkenden Adhäsionskraft an der Drehung teil. Bei großen Bahngeschwindigkeiten reicht die Radialkraft nicht mehr aus; die Tröpfchen entfernen sich tangential, ähnlich den beim Schleifvorgang abgerissenen Schleifmittel- oder Werkstückteilchen (Bild 53/2).

Überall dort, wo schnell rotierende Maschinenteile vorhanden sind, muß sorgfältig darauf geachtet werden, daß die zulässigen Drehzahlen nicht überschritten werden. Auch an diesem Beispiel wird deutlich, daß die Kenntnis der entsprechenden physikalischen Gesetze eine wichtige Grundlage für die Beherrschung technischer Prozesse ist. Für jeden Facharbeiter und Ingenieur sind physikalische Grundkenntnisse deshalb eine Voraussetzung erfolgreicher Arbeit.



Sowjetisches Raumschiff vom Typ „Sojus". Die Bewegung eines derartigen Satelliten unterliegt den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie die Bewegung der Planeten bei ihrem Umlauf um die Sonne.

Die Bewegungen der Planeten

Schon im Altertum beschäftigten sich die Gelehrten mit den Bewegungen der Gestirne. Aus den astronomischen Beobachtungen wurden aber falsche Schlüsse gezogen, da man davon ausging, daß die Erde im Mittelpunkt des Weltalls ruht.

Dieses *geozentrische Weltbild*[1] blieb bis in das 15. Jahrhundert vorherrschend. Durch die praktische Astronomie – sie befaßte sich mit Kalenderrechnungen, Orts- und Zeitbestimmungen (vor allem für die Schiffahrt) – waren aber inzwischen eine Reihe neuer Erkenntnisse gewonnen worden, die im Widerspruch zum geozentrischen Weltbild standen. Begünstigt durch die großen gesellschaftlichen Veränderungen – die Herausbildung frühkapitalistischer Verhältnisse – die auch einen Aufschwung der Wissenschaft mit sich brachten, wurde durch Nikolaus Kopernikus (Bild 54/2) ein neues astronomisches Weltbild geschaffen. In diesem *heliozentrischen Weltbild*[2] umkreisen die Erde und die anderen Planeten die feststehende Sonne, und der Mond umkreist die Erde.

Zu den eifrigsten Anhängern des neuen Weltbildes gehörte auch Galileo Galilei (↗ S. 20), dessen astronomische Beobachtungen die kopernikanische Lehre stützten.

Bild 54/2 Nikolaus Kopernikus (1473 bis 1543)

[1] ge (griech.): Erde; centrum (lat.): Mittelpunkt
[2] helios (griech.): Sonne

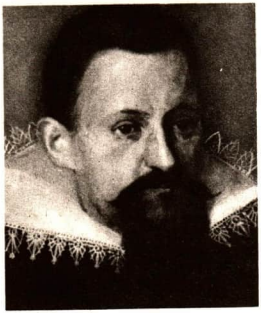


Bild 55/1 Johannes Kepler (1571 bis 1630)

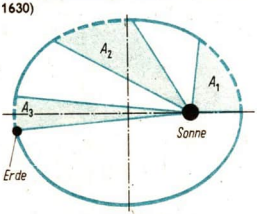


Bild 55/2 Das 2. Keplersche Gesetz am Beispiel der Erde. Die gestrichelten Wege wurden in jeweils 40 Tagen zurückgelegt. Die vom Leitstrahl überstrichenen Flächen A_1, A_2 und A_3 sind gleich groß. (Die Halbachsen sind zur besseren Übersicht nicht maßstabgetreu gezeichnet.)

Die Keplerschen Gesetze

In jahrelanger mühevoller Arbeit gelang es dem Astronomen Johannes Kepler (Bild 55/1), weitere Beweise für die Richtigkeit des heliozentrischen Weltbildes zu finden und neue Gesetzmäßigkeiten über die Bewegung der Planeten um die Sonne zu entdecken.

1. Keplersches Gesetz:

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

Verkleinert man zum Beispiel die Ellipsenbahn der Erde um die Sonne so weit, daß die große Halbachse 7,2 m beträgt, so ist die kleine Halbachse nur 1 mm kürzer. Die Bahn der Erde ist also annähernd kreisförmig. Die Abweichungen zwischen Kreis- und Ellipsenbahn sind auch bei anderen Planeten sehr gering.

2. Keplersches Gesetz:

> Der Leitstrahl von der Sonne zu einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

Die vom Planeten auf seiner Bahn in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege sind unterschiedlich, weil eine Ellipse durchlaufen wird. Deshalb ändert sich die Bahngeschwindigkeit eines Planeten während seines Umlaufes! Sie ist in Sonnennähe größer als in Sonnenferne (Bild 55/2).

Das Gravitationsgesetz

Aus welchem Grunde bewegen sich die Planeten auf *Ellipsenbahnen* um die Sonne? Die Lösung dieses Problems fand Isaac Newton. Er folgerte aus astronomischen Beobachtungen, daß die Ursache dafür Anziehungskräfte sind, die zwischen den Himmelskörpern wirken.
Solche Anziehungskräfte wirken zwischen *allen* Körpern. Man bezeichnet sie als Massenanziehungskräfte oder Gravitationskräfte. Die Massenanziehung oder **Gravitation**[1] ist eine Eigenschaft aller Körper:

[1] gravitas (lat.): schwer

Newton faßte seine Erkenntnisse im Gravitationsgesetz zusammen:

> Die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern ist proportional dem Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung zwischen beiden Körpern.

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

Der Proportionalitätsfaktor γ in der Gleichung heißt *Gravitationskonstante* und hat den Wert

$$\gamma = \frac{6{,}67}{10^{11}} \; \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2}.$$

Das Gravitationsgesetz gilt nur für Massenpunkte. Es darf aber auch auf Körper angewendet werden, wenn deren Abstand groß gegen die Abmessungen der Körper ist.

Das Gravitationsgesetz gilt im gesamten Weltall.

■ Wie groß ist die Gravitationskraft zwischen der Erde und dem Mond? Geben Sie die Gravitationskraft in Newton und in Kilopond an!

Gegeben:

$m_{\text{Erde}} = 6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$
$m_{\text{Mond}} = 7{,}35 \cdot 10^{22}\ \mathrm{kg}$
$r = 384 \cdot 10^{6}\ \mathrm{m}$

Gesucht:

F

Lösung:

$$F = \gamma \cdot \frac{m_E \cdot m_M}{r^2}$$

$$F = \frac{6{,}67\ \mathrm{Nm}^2 \cdot 6 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg} \cdot 7{,}35 \cdot 10^{22}\ \mathrm{kg}}{10^{11}\ \mathrm{kg}^2 \cdot 384^2 \cdot 10^{12}\ \mathrm{m}^2}$$

$$F \approx 2 \cdot 10^{20}\ \mathrm{N}$$

$$\underline{\underline{F \approx 2 \cdot 10^{19}\ \mathrm{kp}}}$$

Die Gravitationskraft beträgt etwa $2 \cdot 10^{20}$ N bzw. $2 \cdot 10^{19}$ kp.

Die Gravitationskraft beschleunigt jeden Körper, der frei beweglich ist. Sie wirkt selbstverständlich auch dann, wenn ein Körper auf einer Unterlage steht oder an einer Aufhängung befestigt ist. In diesem Fall spricht man bekanntlich von der Gewichtskraft des Körpers (↗ S. 35).

Die Bestimmung der Gravitationskonstanten

Um die Gravitationskonstante experimentell zu bestimmen, muß man nach der Gleichung

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

die wirkende Kraft, die Massen der sich anziehenden Körper und deren Abstand messen.
Zwischen Körpern auf der Erde ist die Gravitationskraft im allgemeinen sehr klein. Beispielsweise beträgt sie zwischen zwei Körpern mit einer Masse von je 5 kg bei einem Abstand von 20 cm nur einige Tausendstel Millipond.
Um größere Gravitationskräfte zu erhalten, sind wegen $F \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ große Massen und ein kleiner Abstand erforderlich. Trotzdem benötigt man noch sehr empfindliche Meßapparaturen.

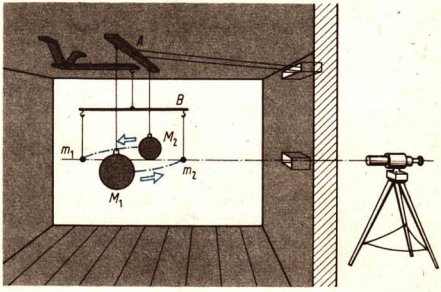


Bild 57/1 An den Enden eines schwenkbaren Querbalkens sind zwei Bleikugeln M_1 und M_2 mit einer Masse von je 158 kg befestigt. Zwei weitere Bleikugeln m_1 und m_2 mit einer Masse von je 730 g befinden sich an einem leichten Stab, der drehbar aufgehängt ist. Werden die großen Kugeln M_1 und M_2 in die Nähe der kleinen Kugeln m_1 und m_2 geschwenkt, so kommt es auf Grund der Gravitationskraft zwischen den Kugeln zu einer sehr, sehr kleinen Drehung des leichten Stabes, die mit einem Fernrohr festgestellt werden kann.

Mit einer Drehwaage (Bild 57/1) gelang es Cavendish 1798, die Gravitationskonstante zu ermitteln. Später erfolgten genauere Messungen mit anderen Versuchsanordnungen. Besonders übersichtlich ist eine Anordnung, die Richarz und Krigar-Menzel 1896 benutzten (Bild 57/2).

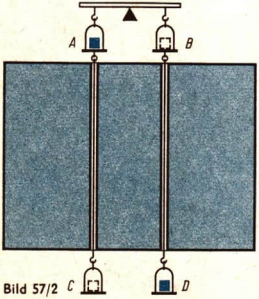


Bild 57/2

Die Waagschalen sind entsprechend der nebenstehenden Zeichnung am Waagebalken einer sehr empfindlichen Hebelwaage befestigt. Zwei Schalen sind oberhalb eines Bleiblocks mit einer Masse von etwa 100 000 kg angebracht, zwei darunter. Auf den oberen Schalen befindet sich je ein Körper mit der Masse von 1 kg. Die Waage ist im Gleichgewicht. Liegen die beiden Körper auf den unteren Schalen,

so ist ebenfalls Gleichgewicht vorhanden. Wird dagegen einer der Körper auf die obere Schale A, der andere auf die untere Schale D gelegt (Bild 57/2), so ist die Waage nicht mehr im Gleichgewicht. Die Gravitationskraft zwischen der Erde und dem Körper bei A wird durch die Gravitationskraft zwischen dem Bleiblock und dem Körper bei A vergrößert. Die Gravitationskraft zwischen der Erde und dem Körper bei D wird dagegen durch die Gravitationskraft zwischen dem Bleiblock und dem Körper bei B verringert. Warum kann durch Vertauschen der Körper (neue Lage bei B und C) ein Kontrollversuch durchgeführt werden?

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 148, Nr. 126

Gravitationsfelder

Die Gewichtskraft eines Körpers auf der Erde ist auf die Gravitation oder Massenanziehung zwischen der Erde und dem Körper zurückzuführen. Sie läßt sich deshalb durch die Gleichungen $G = m \cdot g$ oder $G = \gamma \cdot \frac{m \cdot m_E}{r^2}$ berechnen. Durch Gleichsetzen dieser Ausdrücke erhält man

$$m \cdot g = \gamma \cdot \frac{m \cdot m_E}{r^2}$$ und daraus

$$g = \frac{\gamma \cdot m_E}{r^2}.$$

Da γ und m_E konstant sind, hängt die jeweilige Fallbeschleunigung demnach von der Entfernung zwischen Meßort und Erdmittelpunkt ab.

■ Wie groß ist die Fallbeschleunigung g_h in einer Entfernung von 7 500 km vom Erdmittelpunkt (etwa 1 000 km über der Erdoberfläche)?

Gegeben:

$m_E = 6 \cdot 10^{24}$ kg

$r = 7\,500$ km

Gesucht:

g_h

Lösung:

$$g_h = \frac{\gamma \cdot m_E}{r^2}$$

$$g_h = \frac{6{,}67 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2} \cdot 6 \cdot 10^{24}\ \text{kg}}{10^{11}\ \text{kg}^2 \cdot 7\,500^2 \cdot 10^6\ \text{m}^2}$$

$$g_h \approx 7{,}2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Die Fallbeschleunigung g_h beträgt in einer Höhe von 1000 km etwa $7{,}2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Diese Rechnung gilt für einen in dieser Entfernung ruhenden Körper.

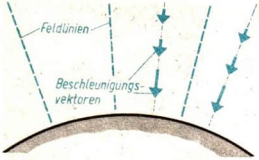


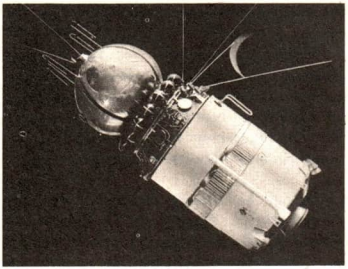
Bild 59/1 Schnitt durch ein Gravitationsfeld. Für einige Punkte wurde die Gravitationsbeschleunigung als Vektor eingezeichnet. Die gestrichelten Linien heißen Gravitationsfeldlinien. Längs dieser Linien (es wurden nur einige eingezeichnet) bewegt sich ein Körper, zum Beispiel ein losgelassener Stein.

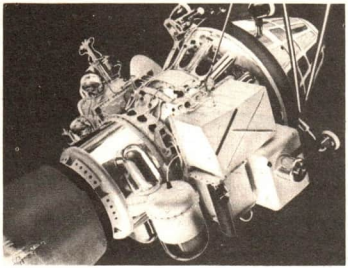
Auf die gleiche Weise kann man für jeden Punkt des die Erde umgebenden Raumes eine Fallbeschleunigung angeben. Die Fallbeschleunigungen unterscheiden sich voneinander hinsichtlich des Betrages und der Richtung (Bild 59/1), sind aber stets zum Erdmittelpunkt gerichtet.
Derartige Betrachtungen lassen sich auch für andere Himmelskörper anstellen; man kann jedem Punkt der Umgebung eines Himmelskörpers eine Beschleunigung zuordnen.
Ähnlich wie man den besonderen Zustand in der Umgebung einer elektrischen Ladung durch den Begriff des elektrischen Feldes erfaßt (↗ Klasse 8), hat man zur Beschreibung der Gravitation den Begriff des *Gravitationsfeldes* eingeführt:

> Jeder Himmelskörper besitzt ein Gravitationsfeld. Für jeden Punkt des Feldes kann eine bestimmte Beschleunigung angegeben werden, die das Feld kennzeichnet.

In jedem Gravitationsfeld wirkt auf dort befindliche Körper nach dem Newtonschen Grundgesetz $F = m \cdot a$ eine Gravitationskraft, die die gleiche Richtung wie die jeweilige Gravitationsbeschleunigung hat und dieser Beschleunigung proportional ist.
Beispielsweise befinden sich die Planeten im **Gravitationsfeld der Sonne**. Deshalb werden auf die Planeten Gravitationskräfte ausgeübt, die stets zur Sonne gerichtet sind. Unter dem Einfluß dieser Kräfte durchläuft jeder Planet eine Ellipsenbahn. Die Bahngeschwindigkeit ist dabei unterschiedlich, wie es die Keplerschen Gesetze aussagen (↗ S. 55).
Im **Gravitationsfeld der Erde** befinden sich der Mond und die künstlichen Erdsatelliten, deren Bahnen ebenfalls durch die Gravitation bestimmt sind.
Felder – dazu gehören außer dem Gravitationsfeld beispielsweise das elektrische oder das magnetische Feld – bestehen unabhängig von unserem Bewußtsein, vom Willen und von den Auffassungen der Menschen. Sie sind physikalisch durch ihre Wirkungen nachweisbar und meßbar. Die Felder unterscheiden sich allerdings erheblich von den Stoffen, die ebenfalls objektiv existieren. Die Gesetzmäßigkeiten der Felder sind – wie die historische Entwicklung zeigt – von der Wissenschaft erkannt und genutzt worden.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 147, Nr. 111 bis 120





Künstliche Erdsatelliten

Am 4. Oktober 1957 begann ein neuer Abschnitt in der Geschichte der Wissenschaft und der Technik. Zum erstenmal umkreiste mit dem sowjetischen Erdsatelliten „Sputnik 1" ein künstlicher Trabant unseren Planeten. Seitdem erfolgte eine stürmische Entwicklung, die wesentlich durch weitere bahnbrechende Taten der Sowjetunion bestimmt wurde (Bilder 60/1 bis 60/3). Sie zeigen anschaulich den hohen Stand, den Wissenschaft und Technik in 50 Jahren Sowjetmacht erreicht haben. Das betrifft viele Gebiete, beispielsweise die Raketentechnik, die Elektronik, die Nachrichtentechnik, die Chemie, die Metallurgie, die Mathematik u. a.

Die sozialistischen Staaten arbeiten bei der Erforschung des Weltraumes eng zusammen (Bild 60/4). Beispielsweise liefert die DDR Zubehörteile für elektronische Apparate und Geräte zur Satellitenbeobachtung an die Sowjetunion. An der Bahnverfolgung kosmischer Flugkörper beteiligen sich auch Stationen in unserer Republik. Andererseits stellt uns die Sowjetunion die durch Erdsatelliten gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse zur Verfügung.

Aber die Weltraumforschung ist auch mit großen Kosten verknüpft. Man kann deshalb die Frage stellen, ob sich der Aufwand lohnt. Diese Frage läßt sich eindeutig positiv beantworten, denn durch Erdsatelliten wurden und werden z. B. folgende wissenschaftliche und technische Aufgaben gelöst:

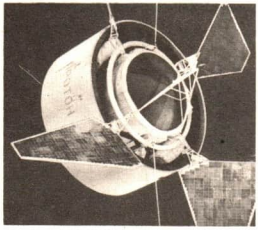


Bild 60/1 Weltraumschiff „Wostok"
Bild 60/2 Weltraumschiff „Luna 9"
Bild 60/3 Raumstation „Proton"
Bild 60/4 Erdsatellit „Interkosmos 1"

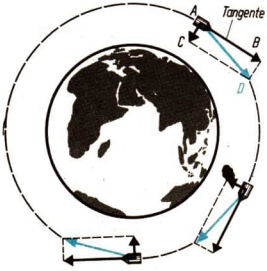
- Untersuchungen des magnetischen Erdfeldes in verschiedenem Abstand von der Erde, des die Erde umgebenden Strahlungsgürtels; kernphysikalische Untersuchung hoch-

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 148, Nr. 121 bis 125

energetischer Teilchen; astronomische Beobachtungen, ohne Störung durch die Erdatmosphäre; Beobachtungen meteorologischer Art (Entstehung von Wirbelstürmen, Wolkenbildungen) als Grundlage von Wettervorhersagen; Zusammenstellung geologischer und botanischer Karten der Erde; Herstellung von Funkverbindungen zur Übertragung von Fernsehsendungen, Telefongesprächen usw.

Informieren Sie sich an Hand geeigneter Literatur über weitere Aufgaben künstlicher Erdsatelliten und planetarer Sonden!

Die Weltraumfahrt hat noch in anderer Hinsicht Bedeutung: Durch den Bau von Erdsatelliten und deren Trägerraketen wurden große Fortschritte auf metallurgischem Gebiet (hochtemperaturfeste Stoffe), auf dem Gebiete der Automatisierung (Steuerungssysteme) und der Nachrichtentechnik (Miniaturbauweise) erreicht, die sich auch für andere Anwendungsbereiche als wichtig und vorteilhaft erwiesen haben. Auch die Medizin profitiert von der Weltraumforschung (Einsatz der zur Überwachung des Gesundheitszustandes der Kosmonauten benutzten Geräte in Kliniken). Im imperialistischen Lager gibt es aber Kräfte, die die großartigen Leistungen der Menschen bei der Erschließung des Weltraumes mißbrauchen wollen. Während die Sowjetunion dafür eintritt, daß der Weltraum ausschließlich für friedliche Zwecke benutzt wird, werden von den USA in erheblichem Umfang Erdsatelliten für militärische Zwecke eingesetzt.
Der weltweite Kampf der Friedenskräfte richtet sich gegen diesen Mißbrauch der Wissenschaft.



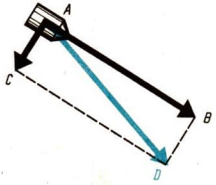


Bild 61/1 Das Raumschiff „fällt" während des Umlaufes dauernd auf die Erde zu; die Kosmonauten ebenfalls. Sie drücken wegen des „freien Fallens" nicht mehr gegen den Boden des Raumschiffes und sind deshalb wie alle anderen Gegenstände im Raumschiff „schwerelos".

Die Fluchtgeschwindigkeiten

Mit den Kenntnissen über die Kreisbewegung (↗ S. 48) läßt sich erklären, warum ein die Erde umkreisendes Raumschiff nicht „herunterfällt". Beim Einlenken in die Umlaufbahn besitzt das Raumschiff eine bestimmte Bahngeschwindigkeit $\vec{v}$, deren Betrag konstant ist; die Triebwerke arbeiten nicht mehr. Ohne Gravitationskraft würde sich das Raumschiff nach dem Trägheitsgesetz in der Zeit Δt geradlinig von A nach B bewegen (Bild 61/1). In der gleichen Zeit „fällt" es durch die Wirkung der Gravitationskraft von A nach C. Beide Bewegungen überlagern sich zu einer resultierenden Bewegung, so daß das Raumschiff von A nach D gelangt. Für jeden Punkt der Bahn muß diese Betrachtung wiederholt werden, wobei $\vec{v}$ zwar den gleichen Betrag beibehält, aber laufend die Richtung ändert.

Bei einer bestimmten Geschwindigkeit $\vec{v}$ bleibt der Abstand Raumschiff – Erde konstant; es wird eine Kreisbahn durchlaufen. Weicht $\vec{v}$ von dieser *Kreisbahngeschwindigkeit* $\vec{v}_K$ ab, so ist die durchlaufene Bahn eine Ellipse (Bild 62/1).

Der Betrag der Kreisbahngeschwindigkeit $\vec{v}_K$ ergibt sich durch Gleichsetzen der Ausdrücke $F = m \cdot \frac{v^2}{r}$ und

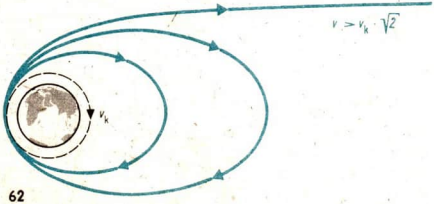
$F = \gamma \cdot \frac{m\ M}{r^2}$ zu $v_K = \sqrt{\frac{\gamma\ M}{r}}$. (Darin ist M die Erdmasse, r die Entfernung Erdmittelpunkt – Raumflugkörper). Für eine theoretische Umlaufbahn unmittelbar über der Erdoberfläche erhält man eine *Minimum-Kreisbahngeschwindigkeit* von etwa $7{,}9\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

In größeren Höhen über der Erdoberfläche ist die Kreisbahngeschwindigkeit kleiner. Sie beträgt beispielsweise bei einem Abstand von 25000 km von der Erdoberfläche nur noch $3{,}6\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Das bedeutet allerdings nicht, daß diese Geschwindigkeit leichter zu erreichen ist als die Geschwindigkeit für eine erdnahe Bahn. Die Gesamtenergie (zum Heben gegenüber der Gravitation, zum Überwinden des Luftwiderstandes und zur Beschleunigung) ist in diesem Falle sogar bedeutend größer.

Wenn für einen Raumflugkörper die Bahngeschwindigkeit $v > \sqrt{2} \cdot v_K$ ist, so wird keine Ellipse mehr durchlaufen; der Raumflugkörper verläßt auf einer gekrümmten Bahn den Anziehungsbereich der Erde und wird zu einem Satelliten des Sonnensystems (Bild 62/2). Diese planetare[1] *Flucht- oder Entweichgeschwindigkeit* beträgt in Nähe der Erdoberfläche etwa $\sqrt{2} \cdot 7{,}9\ \frac{\text{km}}{\text{s}} = 11{,}2\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Beachten Sie auch hier: In größeren Höhen ist die Entweichgeschwindigkeit zwar kleiner, jedoch ist die erforderliche Gesamtenergie größer.

Soll ein Raumflugkörper den Anziehungsbereich der Sonne verlassen, so ist dazu eine *solare*[2] *Fluchtgeschwindigkeit* von etwa $16{,}5\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$ notwendig, vorausgesetzt, daß der Start an der Erdoberfläche in Richtung der Erdbewegung um die Sonne erfolgt.

[1] planetar: bezogen auf den Planeten, hier auf die Erde
[2] solar: bezogen auf die Sonne



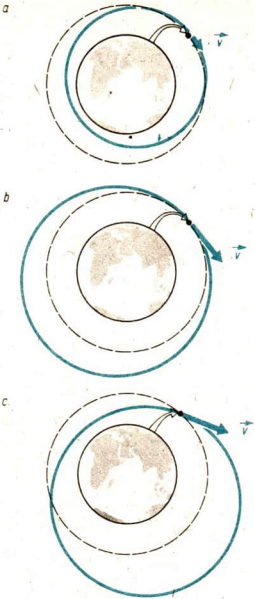


Bild 62/1 a) Der Betrag der Bahngeschwindigkeit beim Einschwenken in die Umlaufbahn ist kleiner als die erforderliche Kreisbahngeschwindigkeit. Es wird eine Ellipsenbahn durchlaufen.
b) Der Betrag der Bahngeschwindigkeit beim Einschwenken in die Umlaufbahn ist größer als die erforderliche Kreisbahngeschwindigkeit. Es wird eine Ellipsenbahn durchlaufen.
c) Die Richtung der Bahngeschwindigkeit beim Einschwenken in die Umlaufbahn und der Betrag entsprechen nicht der Kreisbahngeschwindigkeit. Es wird eine Ellipsenbahn durchlaufen.

Bild 62/2 Je größer der Betrag der Bahngeschwindigkeit $\vec{v}$ im Vergleich zur notwendigen Kreisbahngeschwindigkeit $\vec{v}_K$ ist, um so langgestreckter sind die Ellipsen. Für $v > \sqrt{2} \cdot v_K$ „entweicht" der Satellit auf einer Parabelbahn aus dem Anziehungsbereich der Erde (Mars- und Venussonden).

Zur Wiederholung

Bewegung und Energie

In der Philosophie umfaßt der Begriff Bewegung alle vor sich gehenden Veränderungen in der belebten und unbelebten Natur. Die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft ist im philosophischen Sinne ebenso Bewegung wie etwa das Wachsen und Vergehen von Pflanzen oder ein ablaufender chemischer Prozeß.

Der Bewegungsbegriff in der Mechanik ist demgegenüber enger gefaßt, denn man versteht unter mechanischer Bewegung allein die Orts- oder Lageänderung eines Körpers im Raum.

Am Beispiel einer elastischen Stahlkugel, die auf eine dicke Glasplatte oder Stahlplatte fällt, sollen einige wichtige Begriffe der Mechanik – die mit der mechanischen Bewegung in Beziehung stehen – wiederholt und angewendet werden.[1] Die Wirkungen der Reibung und des Luftwiderstandes bleiben vorläufig unberücksichtigt.

↗ Gravitation (Seite 55)

Die Kugel wird auf die Ausgangshöhe gebracht. Da sich die Kugel im Gravitationsfeld der Erde befindet, wirkt auf sie die Gewichtskraft G. Solange die Kugel festgehalten wird, ist die vektorielle Summe aus Gewichtskraft und Muskelkraft Null. Die Kugel befindet sich deshalb in Ruhe.

↗ Kraftgesetz (Seite 30)
↗ freier Fall (Seite 18)

Läßt man sie los, so wirkt nur noch die Gewichtskraft. Da diese (für den gleichen Körper) konstant ist, bewegt sich die Kugel gleichmäßig beschleunigt nach den Gesetzen des freien Falls. Der Betrag der Geschwindigkeit[2] der Kugel errechnet sich aus $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. Die Geschwindigkeit nimmt also mit der Wurzel aus der Fallhöhe zu.

↗ beschleunigte Bewegung (Seite 11)

Beim Auftreffen auf die Platte wird die Kugel verzögert (negativ beschleunigt), bis die Geschwindigkeit den Betrag Null hat.

Die zum Abbremsen notwendige Kraft entsteht durch molekulare Vorgänge (Kohäsion zwischen den Teilchen), die bei der Verformung der Kugel und der Unterlage wirksam werden.

Da die beteiligten Körper vollkommen elastisch sind (vereinfachende Annahme!), suchen sie den ursprünglichen Zustand wieder anzunehmen. Die Kugel wird dadurch erneut beschleunigt; sie erreicht den gleichen Betrag der Geschwindigkeit, den sie unmittelbar vor dem Aufprall besaß. Der Richtungssinn hat sich um 180° geändert.

[1] Die Pfeile am Rand weisen auf Lehrbuchabschnitte hin, die Sie beherrschen müssen, um die Darstellung des Bewegungsablaufes zu verstehen. Wiederholen Sie gegebenenfalls den Lehrstoff!

[2] Vgl. Fußnote Seite 18.

Für die sich nach oben bewegende Kugel gelten die Gesetze des senkrechten Wurfes nach oben. Der Betrag der Geschwindigkeit nimmt mit der Zeit ab und wird im Umkehrpunkt der Bahn schließlich Null. Dann wiederholt sich der gesamte Bewegungsablauf.

↗ senkrechter Wurf (Seite 24)

Die Energieverhältnisse für die springende Kugel sind im Bild 64/1 dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden Abwärts- und Aufwärtsbewegung nebeneinander gezeichnet.

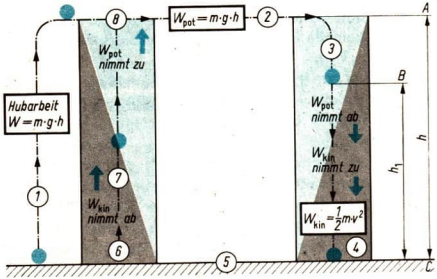


Bild 64/1

Verfolgen Sie die einzelnen Phasen von 1 beginnend!

1 Es wird einmalig eine Hubarbeit $W = m \cdot g \cdot h$ verrichtet.

2 Die gehobene Kugel besitzt nur potentielle Energie der Lage: $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$

3 Während des freien Falls wird Beschleunigungsarbeit verrichtet. Die Kugel erlangt dadurch in zunehmendem Maße kinetische Energie; die potentielle Energie nimmt ab:
$W_{pot} \rightarrow$ Beschleunigungsarbeit $\rightarrow W_{kin}$

4 Die auftreffende Kugel besitzt nur noch kinetische Energie. Diese wandelt sich durch Verformungsarbeit in potentielle Energie der Kugel und der Platte um:
$W_{kin} \rightarrow$ Verformungsarbeit $\rightarrow W_{pot}$

5 Es ist nur potentielle Energie der verformten Körper vorhanden.

6 Die potentielle Energie wandelt sich beim Entspannen der verformten Körper durch Beschleunigungsarbeit in kinetische Energie um. Unmittelbar über der Platte ist nur kinetische Energie vorhanden:
$W_{pot} \rightarrow$ Beschleunigungsarbeit $\rightarrow W_{kin}$

7 Da die Geschwindigkeit der aufwärts bewegten Kugel abnimmt, wird negative Beschleunigungsarbeit verrichtet. Die kinetische Energie nimmt ab, die potentielle Energie zu:
$W_{kin} \rightarrow$ negative Beschleunigungsarbeit $\rightarrow W_{pot}$

8 Der Ausgangszustand ist wieder erreicht.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 148, Nr. 127 bis 135

Tabelle 8;
Potentielle, kinetische und Gesamtenergie für drei Bahnpunkte

Wie die Tabelle 8 erkennen läßt, ist die Gesamtenergie $W_{ges} = W_{pot} + W_{kin}$ an allen Stellen der durchlaufenen Bahn konstant.

Bahnpunkt	Höhe über der Platte	$W_{pot} = m \cdot g \cdot h$	$W_{kin} = \frac{m}{2} v^2$	$W_{pot} + W_{kin} = W_{ges}$
A	h	$m \cdot g \cdot h$	0 (da $v = 0$)	$m \cdot g \cdot h + 0 = m \cdot g \cdot h$
B (gilt für alle Punkte $0 < h_1 < h$)	$h - h_1$	$m \cdot g \cdot (h - h_1)$ $= m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h_1$	$\frac{m}{2} (\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1})^2$ $= m \cdot g \cdot h_1$	$m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h_1$ $+ m \cdot g \cdot h_1 = m \cdot g \cdot h$
C	0	0 (da $h = 0$)	$\frac{m}{2} (\sqrt{2 \cdot g \cdot h})^2$ $= m \cdot g \cdot h$	$0 + m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot h$

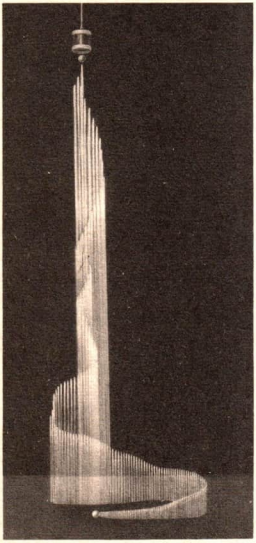


Bild 65/1 Bahnspuren einer springenden Stahlkugel. Die Sprunghöhe nimmt ab, da sich ständig mechanische Energie in Wärmeenergie umwandelt.

Es wurde eingangs darauf hingewiesen, daß Reibung und Luftwiderstand unberücksichtigt blieben. Da sich dies in der Praxis nicht erreichen läßt, kommt die springende Stahlkugel im Versuch schließlich zur Ruhe (Bild 65/1). Die gesamte mechanische Energie hat sich in Wärmeenergie umgewandelt.

Nennen Sie weitere Beispiele für derartige Energieumwandlungen!

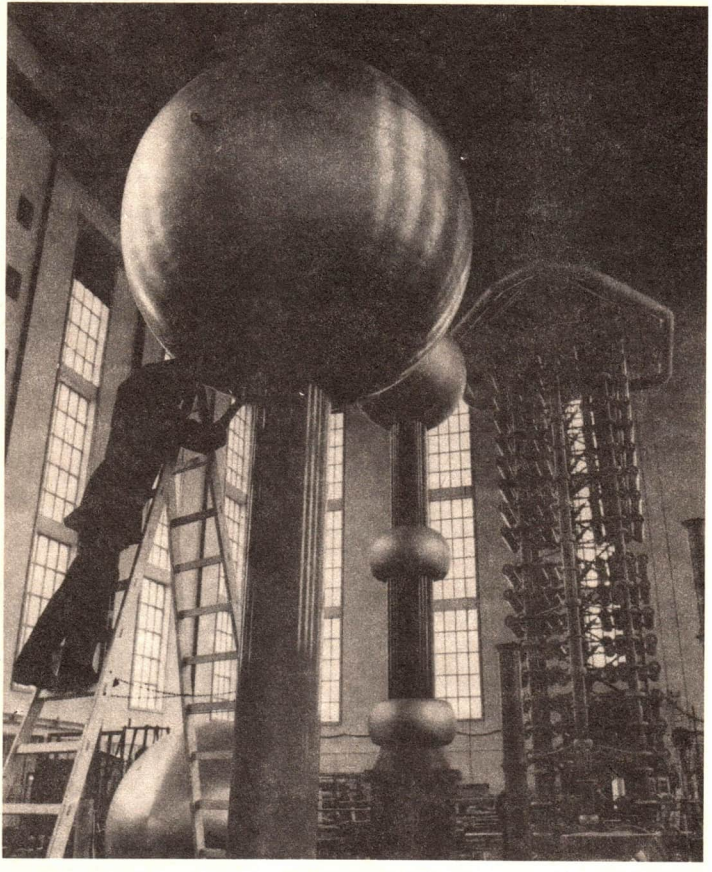
Die Bewegungsarten

Ein wichtiges Hilfsmittel in der Wissenschaft ist eine Systematisierung, das heißt die Einordnung irgendwelcher Erscheinungen, Vorgänge, Körper usw. in Gruppen mit gemeinsamen Merkmalen.
Die Bewegungsarten der Körper lassen sich unter Berücksichtigung der Geschwindigkeiten und der Kraft nach dem Muster der Tabelle 9 (S. 66) systematisieren:

Vergleichen Sie für die einzelnen Bewegungsarten den Betrag der wirkenden Kraft und der Bahngeschwindigkeit!
Wodurch unterscheiden sich beschleunigte Bewegungen von gleichförmigen Bewegungen?
Wann spricht man von negativ beschleunigter Bewegung?
Bei welcher beschleunigten Bewegung ist der Betrag der Bahngeschwindigkeit konstant und die Richtung veränderlich?
Nennen Sie weitere Beispiele und ordnen Sie diese den Bewegungsarten zu!

Bahngeschwindigkeit		wirkende Kraft		Bewegungsart		
Betrag	Richtung	Betrag	Richtung	Hauptgruppe	Untergruppe	Beispiel
konstant	konstant	$F = 0$		gleichförmige Bewegung	geradlinige, gleichförmige Bewegung	Raumschiff außerhalb eines Gravitationsfeldes nach Ausschalten der Triebwerke
veränderlich (nimmt zu)	konstant	$F \neq 0$, konstant	in Bewegungsrichtung	beschleunigte Bewegung	geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung	freier Fall
		$F \neq 0$, nicht konstant	in Bewegungsrichtung	beschleunigte Bewegung	geradlinige, ungleichmäßig beschleunigte Bewegung	Anfahren eines Autos
veränderlich (nimmt ab)	konstant	$F \neq 0$, nicht konstant	entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung	(negativ) beschleunigte Bewegung	geradlinige, ungleichmäßig verzögerte Bewegung	Bremsen eines Fahrrads
konstant	veränderlich	$F \neq 0$, konstant	senkrecht zur Bewegungsrichtung	beschleunigte Bewegung	gleichförmige Kreisbewegung	Satellit auf Kreisbahn
veränderlich	veränderlich	$F \neq 0$, konstant	beliebiger Winkel zur Bewegungsrichtung $\alpha \neq 0°, 90°, 180°, 270°$	beschleunigte Bewegung	krummlinige Bewegung	schräger Wurf

Tabelle 9



Elektrizitätslehre

Das elektrische Feld

Die auf Seite 67 abgebildete 7,2 Millionen Volt-Stoßspannungsanlage ist eine der größten dieser Art. Sie wurde im VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden errichtet und an die Sowjetunion geliefert. Mit solchen Anlagen wird das Verhalten von Werkstoffen und Bauelementen der Hochspannungstechnik in sehr starken elektrischen Feldern untersucht, wie sie z. B. bei Gewittern auftreten.

Die elektrische Ladung

Um elektrische Vorgänge beschreiben und erklären zu können, wurde in Klasse 8 die **elektrische Ladung** Q eingeführt. (Im folgenden wird meist abkürzend von Ladung gesprochen.)

- *Erläutern Sie den Aufbau des Wasserstoff- und des Schwefelatoms! Welche Rolle spielen elektrische Ladungen im Atom?*

Der Betrag der Ladung eines Elektrons wird **Elementarladung** e genannt. Alle größeren Ladungen sind ganze Vielfache der Elementarladung e. Die gesetzliche Ladungseinheit ist das Coulomb (1 C).
1 Coulomb = $6{,}2 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen;
1 C = $6{,}2 \cdot 10^{18}$ e.
Zwischen den Einheiten der Ladung, der Stromstärke und der Zeit besteht der Zusammenhang

1 Coulomb = 1 Ampere · 1 Sekunde	1 C = 1 A · s

Ladungen können durch Messen der Stromstärke und der Zeit bestimmt werden.

Ladungstrennung. Das Atom ist elektrisch neutral. Atomkern und Atomhülle enthalten Ladungen gleichen Betrages, aber unterschiedlichen Vorzeichens. Wenn sich

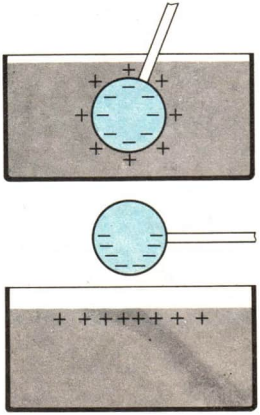


Bild 68/2 Ladungstrennung zwischen einer Paraffinkugel und Wasser

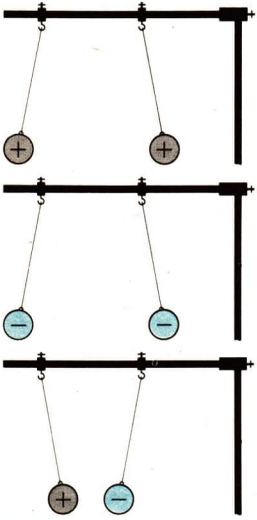


Bild 69/1 Kräfte zwischen geladenen Körpern

zwei ungeladene Körper aus verschiedenen Stoffen berühren, kommt es zu einer **Ladungstrennung** (Bild 68/2). Der eine Körper gibt Elektronen ab, es entsteht ein Elektronenmangel. Der andere Körper nimmt Elektronen auf, es entsteht ein Elektronenüberschuß.

Durch Reiben wird die Ladungstrennung begünstigt, weil sich hierbei die Grenzflächen der Körper bis auf sehr kleine Abstände nähern.

Kräfte zwischen Ladungen. Elektrische Ladungen sind an Kräften erkennbar (Bild 69/1).

Zwischen gleichartig geladenen Körpern wirken Abstoßungskräfte. Zwischen ungleichartig geladenen Körpern wirken Anziehungskräfte.

Diese Kräfte werden beim Nachweis elektrischer Ladungen mit **Elektrometern** (Bild 69/2) genutzt.

Erläutern Sie den Versuch zur Teilung elektrischer Ladungen nach Bild 69/3!
Wie läßt sich in einem Versuch mit einem Elektrometer nachweisen, daß gleich große positive und negative Ladungen einander neutralisieren?

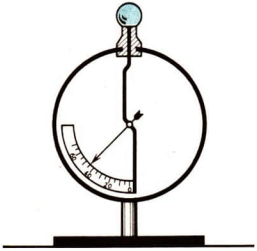


Bild 69/2 Braunsches Elektrometer. Wenn ein geladener Körper die mit dem Zeiger verbundene Kugelelektrode des Elektrometers berührt, wird ein Teil der Ladung an das Meßgerät abgegeben. Der Zeiger schlägt aus, bis sich die Wirkungen der Gewichtskraft und der elektrischen Kraft aufheben.

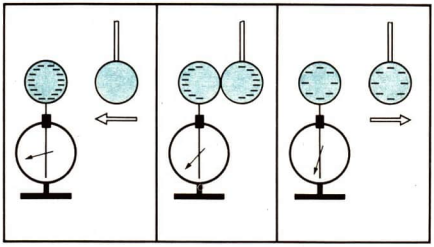


Bild 69/3 Teilung elektrischer Ladungen

Das elektrische Feld. In Klasse 8 wurde das elektrische Feld zwischen den Platten eines geladenen Kondensators untersucht (Bild 70/1). Auf einen geladenen Probekörper mit der Probeladung Q_p wirkt im Raum zwischen den Platten eine Kraft. Diese Kraft beruht auf einer Wechselwirkung zwischen dem elektrischen Feld und dem Ladungsträger: Während auf dem Ladungsträger die Kraft

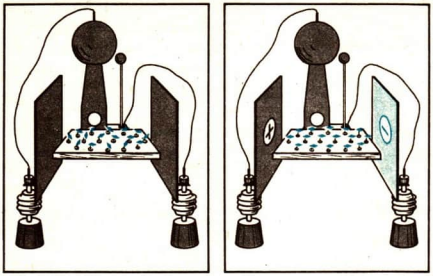


Bild 70/1 Papierfähnchen zwischen a) ungeladenen und b) geladenen Kondensatorplatten

ausgeübt wird, verändert der Ladungsträger zugleich das elektrische Feld in seiner Umgebung.

▶ Ein elektrisches Feld ist an seiner Wechselwirkung mit Ladungsträgern erkennbar. Es besteht in der Umgebung jedes elektrisch geladenen Körpers.

Die elektrische Feldstärke

Das elektrische Feld soll nun quantitativ[1] untersucht werden. Das Feld darf beim Meßvorgang nicht wesentlich verändert werden. Deshalb muß die Probeladung Q_p klein gegenüber den felderzeugenden Ladungen sein; dann sind auch die auf den Probekörper ausgeübten Kräfte sehr klein.
Mit der folgenden Versuchsanordnung können solche kleinen Kräfte gemessen werden.

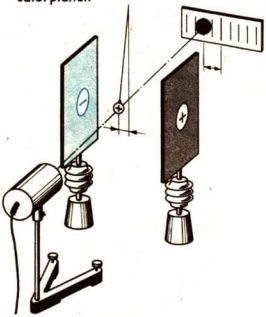


Bild 70/2

14 ▼ Als Probekörper verwendet man eine kleine, leichte leitende Kugel, die positiv geladen wird. Sie hängt an einem langen Seidenfaden zwischen den Platten eines ungeladenen Kondensators. Beim Laden des Kondensators wird ein elektrisches Feld aufgebaut. Auf die Kugel wirkt eine Kraft, sie wird zur negativ geladenen Platte hin ausgelenkt (Bild 70/2).

Durch Messungen, die hier nicht beschrieben sind, hat man für *kleine* Auslenkungen den folgenden Zusammenhang ermittelt (Bild 70/3):

Bild 70/3 Kräfte an der geladenen Kugel im elektrischen Feld. Die Resultierende aus der Gewichtskraft und der vom Feld ausgeübten Kraft hat die Richtung des Fadens. Mit ihrer Hilfe läßt sich der Betrag von F ermitteln.

[1] zahlenmäßig; der Menge nach

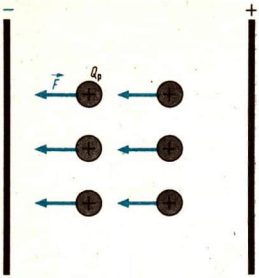


Bild 71/1 Kraft auf eine Probeladung im Feld eines Plattenkondensators

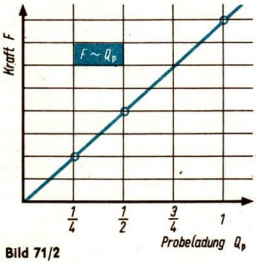


Bild 71/2

Die auslenkende Kraft ist der Auslenkung proportional.	$F \sim s$

Mit Hilfe der Anordnung des Versuches 14 werden die folgenden beiden Messungen durchgeführt:

Der geladene Plattenkondensator wird zuerst in horizontaler, danach in vertikaler Richtung verschoben, und hierbei wird jeweils die Auslenkung der Kugel gemessen. 15 ▼

Das Ergebnis ist in Bild 71/1 dargestellt. Die auf den geladenen Probekörper ausgeübte Kraft ist im Innenraum des Kondensators überall annähernd gleich.

Die Ladung wird nun halbiert, indem die geladene Kugel mit einer gleichen, ungeladenen Kugel berührt wird (Bild 69/3). Wiederholt man dieses Verfahren, verbleibt auf der Kugel nur noch ein Viertel der ursprünglich vorhandenen Ladung. Hierbei geht auch die Auslenkung auf die Hälfte bzw. ein Viertel ihres Ausgangswertes zurück (Bild 71/2). 16 ▼

Durch zahlreiche Messungen ergibt sich der folgende Zusammenhang:

Die im elektrischen Feld auf einen Probekörper ausgeübte Kraft ist der Ladung des Probekörpers proportional.	$F \sim Q_p$

Das Versuchsergebnis läßt sich auch in der Form aussprechen: Der Quotient aus der Kraft und der Ladung des Probekörpers ist von der gewählten Ladung des Probekörpers unabhängig und nur durch das elektrische Feld bestimmt. Mit Hilfe dieses Quotienten ist es daher möglich, ein elektrisches Feld quantitativ zu erfassen und elektrische Felder miteinander zu vergleichen. Auf Grund dieser Überlegung wird eine physikalische Größe, die **elektrische Feldstärke** E, definiert:

Die elektrische Feldstärke in einem Punkte eines elektrischen Feldes ist der Quotient aus der Kraft auf einen geladenen Probekörper und der Ladung des Probekörpers.	$E = \frac{F}{Q}$

◀

Aus der Krafteinheit Newton und der Ladungseinheit Amperesekunden ergibt sich die Einheit der elektrischen Feldstärke $1\,\frac{N}{A \cdot s}$.

$$1\,\frac{N}{A \cdot s} = 1\,\frac{V}{m}$$

Eine weitere Einheit der elektrischen Feldstärke ist das Volt je Meter $\left(1\,\frac{V}{m}\right)$.

Ebenso wie die Kraft $\vec{F}$ ist die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ eine vektorielle Größe. Sie ist durch Betrag, Richtung und Richtungssinn bestimmt. Hierbei gilt die folgende Vereinbarung: Der Richtungssinn der elektrischen Feldstärke ist gleich dem Richtungssinn der Kraft, die auf einen positiv geladenen Probekörper wirkt (Bild 72/1).

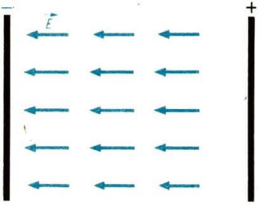


Bild 72/1 Feldstärke im Feld eines Plattenkondensators

Das elektrische Feld als Träger von Energie

Der folgende Versuch soll zeigen, wie das elektrische Feld an Energieumwandlungen beteiligt ist.

17 Zwischen zwei Kondensatorplatten, die mit einem Bandgenerator geladen wurden, hängt an einem langen Seidenfaden eine mit Aluminiumfolie umhüllte Holundermarkkugel (Bild 72/2a). Die Kugel wird mit einem Plaststab leicht gegen die linke, negativ geladene Platte gestoßen. Sie nimmt hierbei eine negative Ladung auf und bewegt sich unter dem Einfluß des Feldes zur rechten, positiv geladenen Platte (Bild 72/2b). Dort wird die negative Ladung der Kugel abgegeben und danach eine positive Ladung aufgenommen. Die Kugel bewegt sich nun zur negativ geladenen Platte, gibt ihre positive Ladung ab und nimmt eine negative Ladung auf. Diese Vorgänge wiederholen sich, und die Kugel pendelt zwischen den Platten, bis der Kondensator entladen ist.

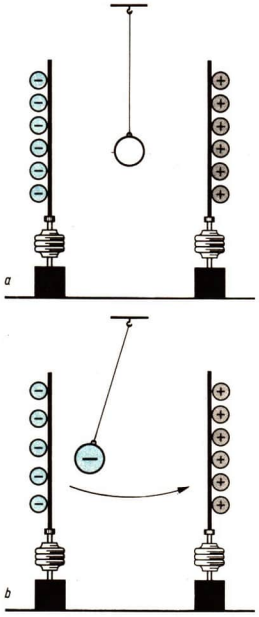


Bild 72/2 Bewegung einer Kugel im elektrischen Feld

Die an der Kugel auf ihrem Wege von der einen zur anderen Platte verrichtete Arbeit kann berechnet werden. Wir benutzen dazu die aus der Klasse 8 bekannte Definition der Spannung.

Spannung $= \frac{\text{Verschiebungsarbeit}}{\text{Ladung}}$	$U = \frac{W}{Q}$

Durch Umformen erhält man $W = Q \cdot U$.

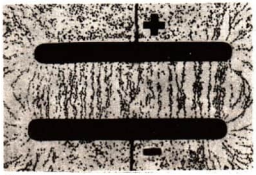
In der Mechanik wurde nachgewiesen, daß beim Verrichten einer Arbeit eine Energieumwandlung stattfindet.

Erläutern Sie diese Aussage am Beispiel des freien Falls eines Körpers!

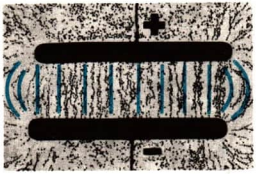
Es soll nun gezeigt werden, daß auch die an einem Ladungsträger im elektrischen Feld verrichtete Arbeit mit einer Energieumwandlung verbunden ist. Hierzu betrachten wir nochmals den Ablauf des Versuchs 17 (Bild 72/2). Bei jeder Berührung wird die jeweilige Ladung der Platten um die Ladung der Kugel verkleinert. Dabei nimmt auch jedesmal die elektrische Feldstärke zwischen den Platten ab. Hieraus ist zu schließen, daß die an der Kugel verrichtete mechanische Arbeit zuvor im elektrischen Feld gespeichert war.

Das elektrische Feld ist Träger von Energie.

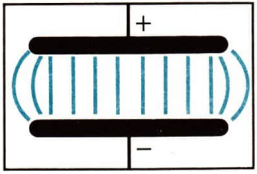
Da Energie nicht aus dem Nichts entstehen kann, muß die im elektrischen Feld gespeicherte Energie vorher beim Aufbau des Feldes aus einer anderen Energieart umgewandelt worden sein.
Im Versuch 17 wurde durch das Antreiben des Bandgenerators mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.



a



b



c

Bild 73/1 Es ist zu beachten, daß die Feldlinien nur in einer Ebene dargestellt werden, während das Feld räumlich ist.

Feldlinien

In Klasse 8 wurde das elektrische Feld eines Plattenkondensators durch Feldlinien veranschaulicht. Der folgende Versuch zeigt, wie sich kleine Körper unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes entlang der Feldlinien ordnen.

18

In das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten wird eine mit zerstoßenen Gipskristallen oder Faserhäcksel bestreute Glasplatte gebracht. Klopft man leicht gegen die Platte, ordnen sich die kleinen länglichen Körper (Bild 73/1 a).

Beschreiben Sie das Feldlinienbild (Bild 73/1 c)!

Die Feldlinien sind ein anschauliches **Modell** für das unsichtbare elektrische Feld. Zwischen dem wirklich vorhandenen elektrischen Feld und den Feldlinien als Modell

des elektrischen Feldes muß unterschieden werden. Das Modell spiegelt nicht sämtliche Eigenschaften des wirklichen Feldes wider. Man darf z. B. nicht annehmen, daß das Feld nur längs der einzelnen Feldlinien besteht. Das Feld erfüllt den gesamten Raum in der Umgebung geladener Körper.

Im folgenden werden noch drei weitere Beispiele für Feldlinienbilder gegeben (Bilder 74/1 bis 3). Die Ladungen befinden sich hierbei auf kleinen Kugeln. Wenn die Abmessungen des Ladungsträgers sehr klein sind, kann man den Modellbegriff **Punktladung** benutzen.

Bei der Betrachtung der Feldlinienbilder liegt die Frage nahe, wie weit das Feld in den Raum reicht.

In großer Entfernung von den Ladungen werden die vom Feld ausgeübte Kraft und damit auch die Feldstärke so klein, daß ein Nachweis nicht mehr möglich ist. Das Feld hat keine scharfe Grenze.

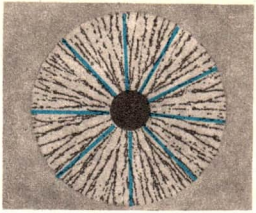


Bild 74/1 Feldlinien in der Umgebung einer geladenen Kugel

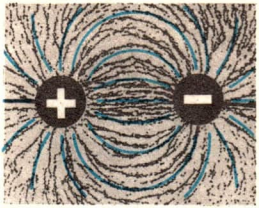


Bild 74/2 Feldlinien in der Umgebung zweier ungleichartig geladener Kugeln

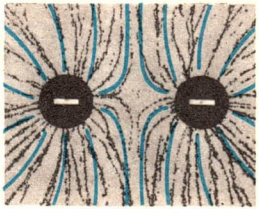


Bild 74/3 Feldlinien in der Umgebung zweier gleichartig geladener Kugeln

Das Coulombsche Gesetz

Die Feldstärke in der Umgebung einer Punktladung nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Wird z. B. die Entfernung verdoppelt, beträgt die Feldstärke ein Viertel ihres Anfangswertes. In gleicher Weise ändert sich auch die Kraft, die eine andere Punktladung in diesem Felde erfährt. Mit den Bildern 74/2 und 3 wird deutlich gezeigt, daß zwischen den beiden Ladungen eine Wechselwirkung besteht. Für die Kraft F, die zwei Punktladungen Q_1 und Q_2 im Abstand r aufeinander ausüben, gilt das **Coulombsche Gesetz**

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

Dieses Gesetz hat die gleiche Form wie das Gravitationsgesetz. Den Massen m_1 und m_2 entsprechen die elektrischen Ladungen Q_1 und Q_2. Der Gravitationskonstanten γ entspricht die Konstante $\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}$.

$$\left(\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{A \cdot s}}{\mathrm{V \cdot m}}\right)$$

Trotz der hier gefundenen Übereinstimmungen handelt es sich bei den Anziehungskräften im Gravitationsfeld und den Kräften des elektrischen Feldes um verschiedenartige Erscheinungen.

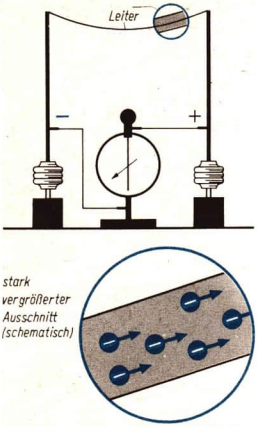


Bild 75/1 Ladungsausgleich beim Plattenkondensator

Ladungsausgleich

Im Versuch 17 wurde ein Kondensator entladen, indem eine leitende Kugel zwischen den Platten hin- und herpendelte und dabei Ladungsträger von einer Platte zur anderen transportierte. Man sagt auch, es findet ein Ladungsausgleich statt.
Die entgegengesetzten Ladungen der Kondensatorplatten können sich aber auch durch einen elektrischen Leiter ausgleichen (Bild 75/1). Auch hierbei werden die Ladungsträger – bei Metallen die Elektronen – durch das zwischen den Platten bestehende elektrische Feld bewegt, es fließt ein elektrischer Strom. Wir erkennen:

> Das elektrische Feld ist eine notwendige Voraussetzung für das Fließen eines elektrischen Stromes.

Beim Ladungsausgleich wird dem elektrischen Feld Energie entzogen, das Feld wird immer schwächer, bis es schließlich verschwindet. Es ist zu vermuten, daß beim Ladungsausgleich (Entladen des Kondensators) auch die Stromstärke immer kleiner wird. Diese Vermutung soll experimentell geprüft werden.

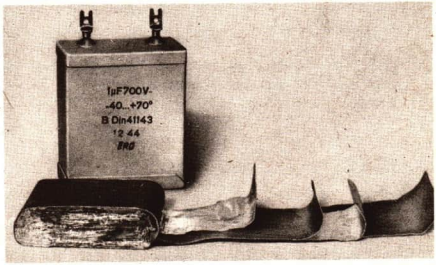


Bild 75/2 Ein Wickelkondensator besteht aus einem dünnen Ölpapier- oder Plaststreifen, der beiderseits mit Aluminiumfolie belegt ist. Diese Folien treten an die Stelle der Platten. Das Band wird aufgewickelt und in einem Metallgehäuse untergebracht.

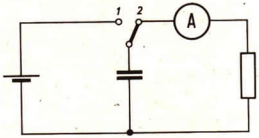


Bild 75/3 Messen der Entladestromstärke eines Kondensators

Wir verwenden einen Wickelkondensator (Bild 75/2). Dieser kann größere Ladungen aufnehmen als der Plattenkondensator aus Versuch 17. Der Wickelkondensator wird geladen, indem man seine Klemmen kurzzeitig mit einer Spannungsquelle verbindet. Danach wird an den Kondensator ein sehr großer Widerstand in Reihe mit einem empfindlichen Strommesser angeschlossen (Bild 75/3). Die Stromstärke beim Entladen wird in Zeitabständen von einer Sekunde abgelesen.

19 ▼

Das Versuchsergebnis ist in Bild 76/1 dargestellt. Die Stromstärke sinkt zu Beginn sehr schnell. Je mehr der Kondensator entladen wird, desto langsamer nimmt die Stromstärke ab. Schließlich wird sie so klein, daß die Empfindlichkeit des Strommessers für die Messung nicht mehr ausreicht. Durch das Versuchsergebnis ist unsere Vermutung bestätigt worden.

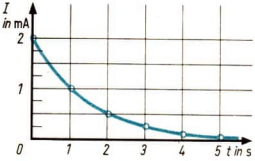


Bild 76/1 Stromstärke des Entladestroms in Abhängigkeit von der Zeit

- *Wie ändert sich die Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit, wenn ein kleinerer Widerstand benutzt wird?*

Der Strom im Versuch 19 ist *ein zeitlich veränderlicher Strom*. Die aus Klasse 8 bekannte Definition der elektrischen Stromstärke

$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}}$	$I = \frac{Q}{t}$

gilt nur für einen *konstanten* Strom. Für einen zeitlich veränderlichen Strom muß diese Definition verallgemeinert werden. Zur Berechnung der Stromstärke werden ein hinreichend kleiner Zeitabschnitt Δt und die dabei transportierte Teilladung ΔQ herangezogen. Es gilt dann

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Eine ähnliche Verallgemeinerung haben Sie bereits bei der Definition der Geschwindigkeit einer ungleichförmigen Bewegung kennengelernt (↗ S. 11).

Die elektrische Stromrichtung

Als die Stromrichtung festgelegt wurde, waren Einzelheiten über das Wesen des elektrischen Stromes noch nicht bekannt. Man legte damals willkürlich fest, daß der elektrische Strom vom Pluspol zum Minuspol fließt. Diese Stromrichtung wird die *elektrische Stromrichtung* genannt. Die Elektronen bewegen sich entgegengesetzt zur elektrischen Stromrichtung.

▶ Man bezeichnet die Richtung vom positiven zum negativen Pol als die elektrische Stromrichtung.

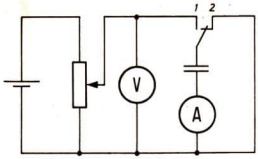


Bild 77/1 Messung von Ladung und Spannung beim Kondensator

Die elektrische Kapazität

Um den Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung für einen Kondensator quantitativ zu erfassen, benötigen wir ein Meßverfahren für Ladungen.

Die Platten eines Kondensators tragen immer entgegengesetzte Ladungen gleichen Betrages. Unter der „Ladung eines Kondensators" wollen wir immer die positive Ladung verstehen.

Es wird eine Schaltung nach Bild 77/1 aufgebaut. Der Wickelkondensator wird bei der Schalterstellung 1 aufgeladen. Dabei ist ein kurzer Zeigerausschlag des Strommessers zu beobachten. Beim Umschalten auf die Schalterstellung 2 wird der Kondensator über den Strommesser entladen. Hierbei ist der Zeigerausschlag gleich groß, hat aber die entgegengesetzte Richtung. 20

Der Lade- und der Entladestrom fließen nur während einer sehr kurzen Zeit. Die Drehspule und der Zeiger des Strommessers drehen sich während dieser Zeit wegen ihrer Trägheit nur um einen kleinen Winkel. Der zu beobachtende Höchstausschlag tritt ein, wenn der Entladevorgang bereits beendet ist. Der Höchstausschlag a_{max} ist deshalb nicht durch die größte Stromstärke bestimmt, sondern proportional dem Produkt aus der mittleren Stromstärke I und der Zeit t des Lade- oder Entladevorganges.

$a_{max} \sim I \cdot t$.

Auf Grund des Zusammenhanges zwischen Ladung und Stromstärke

$Q = I \cdot t$

gilt somit auch:

Der Höchstausschlag des Strommessers ist proportional der Ladung des Kondensators.

$a_{max} \sim Q$.

Der Strommesser kann auf Grund dieses Zusammenhanges auch mit einer Skale versehen werden, die in Coulomb geteilt ist. Er kann dann als Ladungsmeßgerät eingesetzt werden.

Es sollen nun mit diesem Gerät die Beziehungen zwischen Ladung und Spannung beim Kondensator untersucht werden.

Es wird eine Meßreihe mit der Versuchsanordnung nach Bild 77/1 aufgenommen. Die an den Kondensator gelegte Spannung wird durch Verschieben des Gleitkontaktes am Spannungsteiler stufenweise vergrößert. Für jeden Lade- und Entladevorgang werden die vom Meßgerät angezeigten Ladungen abgelesen. 21

Das Versuchsergebnis ist in Bild 78/1 wiedergegeben. Aus der ansteigenden Geraden des Diagramms ist zu erkennen:

Bei einem Kondensator sind Ladung und Spannung einander proportional.	$Q \sim U$

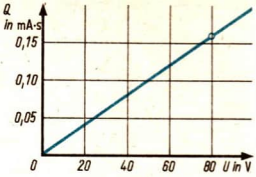


Bild 78/1 Zusammenhang zwischen der Spannung und der Ladung beim Kondensator

Diese Gesetzmäßigkeit kann auch in anderer Form ausgedrückt werden:
Der Quotient aus Ladung und Spannung ist für jeden Kondensator konstant. Man nennt diese Konstante die **elektrische Kapazität** C, kurz Kapazität des Kondensators.

Die Kapazität eines Kondensators ist der Quotient aus Ladung und Spannung.	$C = \frac{Q}{U}$

Die Einheit der Kapazität wird zu Ehren des englischen Physikers Michael Faraday mit **Farad** bezeichnet. Diese Einheit ergibt sich aus der Ladungseinheit Amperesekunde und der Spannungseinheit Volt.

$$1\,\text{F} = \frac{1\,\text{A} \cdot \text{s}}{1\,\text{V}}.$$

Die Kapazität 1 Farad ist außerordentlich groß. Ein Plattenkondensator mit der Kapazität von 1 F müßte zum Beispiel bei einem Plattenabstand von 1 mm eine Plattenfläche von 113 km² besitzen! Technische Kondensatoren haben erheblich kleinere Kapazitäten. Für diese sind die folgenden kleineren Einheiten gebräuchlich:

1 Mikrofarad $1\,\mu\text{F} = 10^{-6}\,\text{F}$,
1 Nanofarad $1\,\text{nF} = 10^{-9}\,\text{F}$,
1 Picofarad $1\,\text{pF} = 10^{-12}\,\text{F}$.

Welche Kapazität hat der beim Versuch 21 verwendete Kondensator?
Aus dem Diagramm (Bild 78/1) ist abzulesen, daß bei der Spannung 80 V vom Kondensator die Ladung $0{,}16 \cdot 10^{-3}\,\text{A} \cdot \text{s}$ aufgenommen wird.

Nach der Gleichung $C = \frac{Q}{U}$

erhält man $C = \frac{0{,}16\ 10^{-3}\,\text{A} \cdot \text{s}}{80\,\text{V}}$

$$C = 2 \cdot 10^{-6}\,\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}$$

$$\underline{C = 2\,\mu\text{F}}$$

Die Kapazität beträgt 2 μF.

Kapazität des Plattenkondensators

Die Kapazität eines Kondensators ist von den Abmessungen und dem Stoff zwischen seinen Platten abhängig. Für einen Plattenkondensator soll diese Abhängigkeit durch Versuche näher bestimmt werden. Hierzu kann wieder die Schaltung nach Bild 77/1 benutzt werden. Bei den Versuchen wird immer nur die Beziehung zwischen zwei Größen untersucht, die anderen bleiben unverändert (↗ auch S. 89).

1. Teilversuch:

Es soll die Beziehung zwischen der Kapazität und der Plattenfläche untersucht werden. Dazu werden Plattenkondensatoren mit verschieden großen Plattenflächen, aber gleichen Plattenabständen und Luft zwischen den Platten geladen (Bild 79/1). Es wird jedesmal die Ladung Q gemessen. Mit der Beziehung $C = \frac{Q}{U}$ ergibt sich: 22 ▼

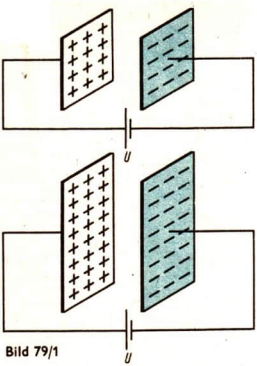


Bild 79/1

> Die Kapazität des Plattenkondensators wächst mit der Plattenfläche.

2. Teilversuch:

Es soll die Beziehung zwischen der Kapazität und dem Plattenabstand untersucht werden. Dazu werden bei einem Plattenkondensator nacheinander mehrere verschieden große Plattenabstände eingestellt. Bei gleichbleibender Spannung und gleichem Stoff zwischen den Platten wird jedesmal die aufgenommene Ladung gemessen (Bild 79/2). 23 ▼

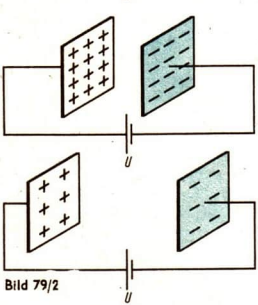


Bild 79/2

> Die Kapazität des Plattenkondensators wird mit zunehmendem Plattenabstand kleiner.

Der Raum zwischen den Kondensatorplatten kann mit Luft oder anderen Gasen, mit flüssigen oder festen Isolatoren ausgefüllt werden. Es kann aber auch ein Vakuum zwischen den Platten vorhanden sein.
Der Stoff, in dem sich das elektrische Feld ausbildet, wird **Dielektrikum** genannt.

3. Teilversuch:

Es soll die Beziehung zwischen der Kapazität und dem Dielektrikum untersucht werden. Dazu werden zwischen die Platten des Kondensators der Versuchsanordnung nach Bild 77/1 nacheinander Glas, Paraffin und PVC eingeführt. 24 ▼

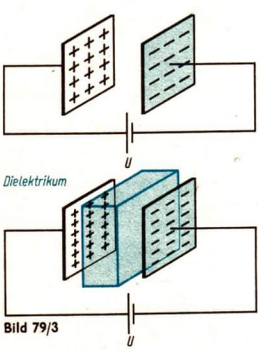


Bild 79/3

Spannung, Abstand und Fläche bleiben konstant. Man beobachtet, daß der Kondensator in jedem Falle eine größere Ladung aufnimmt, als wenn sich Luft zwischen den Platten befindet (Bild 79/3).

> Die Kapazität eines Kondensators hängt vom Dielektrikum ab.

- *Fassen Sie die Ergebnisse der 3 Teilversuche zusammen!*

Technische Kondensatoren

Wickelkondensatoren. Der Aufbau eines Wickelkondensators ist auf Seite 75 erklärt worden. Um große Kapazitäten auf kleinem Raum unterzubringen, werden sehr dünne Isolierschichten verwendet. Dadurch besteht die Gefahr einer Funkenentladung durch das Dielektrikum, die den Kondensator unbrauchbar macht. Die auf dem Kondensator angegebene Betriebsspannung darf deshalb nicht überschritten werden.

Drehkondensatoren. In der Funktechnik werden auch Kondensatoren mit *veränderlicher* Kapazität benötigt. Hierzu werden Drehkondensatoren (Bild 80/1) eingesetzt. Auch der Drehkondensator ist eine besondere Ausführungsform des Plattenkondensators. Als Dielektrikum werden z. B. Luft und Glimmer verwendet. Die Kapazität wird verändert, indem beim Drehen die einander gegenüberliegenden Teile der Plattenflächen verkleinert oder vergrößert werden.

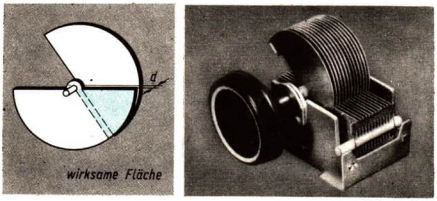


Bild 80/1

Elektrolytkondensatoren (Bild 81/1). Das Dielektrikum dieser Kondensatoren ist eine sehr dünne Aluminiumoxidschicht. Beim Gebrauch der Elektrolytkondensatoren ist zu beachten, daß das Gehäuse immer an den Minuspol

Fragen, Aufträge, Versuche,
Seite 150, Nr. 136 bis 157

Bild 81/1

der Spannungsquelle anzuschließen ist, weil sonst die Oxidschicht zerstört wird.

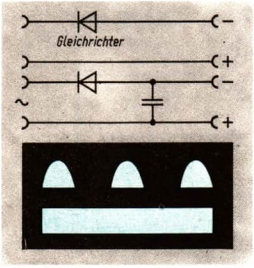


Bild 81/2

Glättung pulsierenden Gleichstroms

Beim Gleichrichten von Wechselstrom entsteht ein pulsierender Gleichstrom (Bild 81/2). Die Schwankungen der Stromstärke werden mit Hilfe eines Elektrolytkondensators ausgeglichen. Während die Spannung anwächst, nimmt der Kondensator Ladungen auf. Beim Abnehmen der Spannung gibt er wieder Ladungen ab. Auf diese Weise wird der Gleichstrom „geglättet".

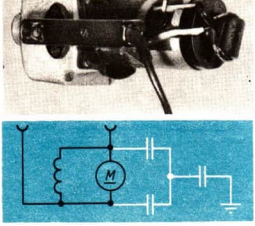
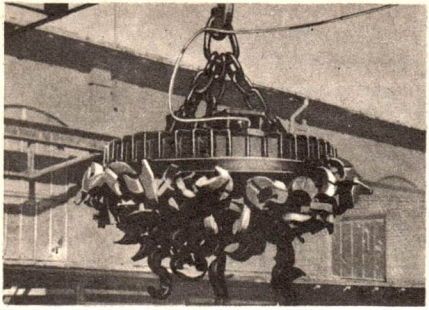


Bild 81/3

Störschutzkondensatoren

Auch für die Funkenunterdrückung bei Schaltvorgängen und am Kollektor von Elektromotoren werden Kondensatoren eingesetzt. Sie nehmen die sich sonst durch Funken ausgleichenden Ladungen auf. Auf diese Weise lassen sich Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs vermeiden. Bild 81/3 zeigt die Schaltung eines Störschutzkondensators an einem Elektromotor.



Das magnetische Feld

Die Eigenschaft des Magneteisensteins, Körper aus Eisen anzuziehen, war schon im Altertum bekannt. Im Jahre 1820 entdeckte der dänische Physiker Oerstedt den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen. Heute sind elektromagnetische Bauelemente eine wichtige Grundlage der modernen Technik.

Kräfte zwischen stromführenden Leitern

Im vorigen Abschnitt wurden Kräfte zwischen geladenen Körpern untersucht. Durch den folgenden Versuch soll festgestellt werden, ob auch Kräfte zwischen elektrischen Leitern auftreten, wenn durch die Leiter ein elektrischer Strom fließt.

25 ▼ Zwei Aluminiumstreifen werden als Leiter nach Bild 82/2 an Klemmenstangen befestigt, jedoch nicht straff gespannt. Beide Leiter werden in Parallelschaltung mit einer Spannungsquelle verbunden. Die Leiter nähern sich einander, wenn ein elektrischer Strom fließt.

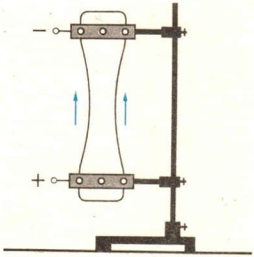


Bild 82/2 Kraftwirkungen zwischen stromdurchflossenen Leitern. Die Ströme fließen in gleicher Richtung.

Die beobachtete Annäherung beruht auf Anziehungskräften, die zwischen den beiden stromführenden Leitern wirken.
Es soll nun untersucht werden, ob die Kräfte zwischen stromführenden Leitern von der Stromrichtung abhängen.

26 ▼ Die beiden Aluminiumstreifen werden in Reihenschaltung mit der Spannungsquelle verbunden (Bild 82/3). Hierbei wölben sich die Leiter nach außen.

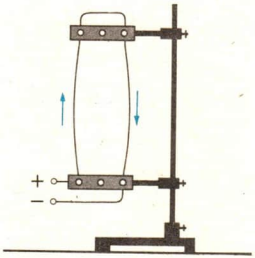


Bild 82/3 Die Ströme fließen in entgegengesetzten Richtungen.

▶ Parallele, stromführende Leiter ziehen einander an, wenn die Ströme in gleicher Richtung fließen. Sie stoßen einander ab, wenn die Ströme in entgegengesetzter Richtung fließen.

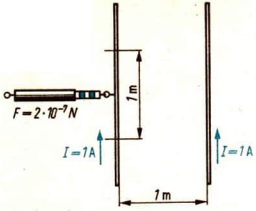


Bild 83/1 Das Ampere ist die Stärke des Stromes durch zwei sehr lange geradlinige Leiter. Die Leiter sind im Abstande von 1 m ausgespannt. Zwischen je 1 m Länge der Doppelleitung wirkt eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N. (Die Definition ist hier vereinfacht wiedergegeben.)

Mit Hilfe der Kraftwirkung zwischen parallelen, von Gleichströmen durchflossenen Leitern wurde die gesetzliche Einheit der elektrischen Stromstärke – das Ampere – definiert (Bild 83/1).

Strom und Dauermagnet

Auf Grund von Erfahrungen, die wir im Werkunterricht mit Elektromagneten und elektrischen Klingeln gewinnen konnten, ist zu vermuten, daß die Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern magnetischer Natur sind. Diese Vermutung wird durch einen Versuch überprüft.

Neben einem lotrecht gespannten Kupferdraht befindet sich eine drehbar gelagerte Magnetnadel (Kompaßnadel). Sie zeigt in Nord-Süd-Richtung (Bild 83/2 a). Beim Einschalten des Stromes nimmt die Magnetnadel die Lage nach Bild 83/2 b ein. 27

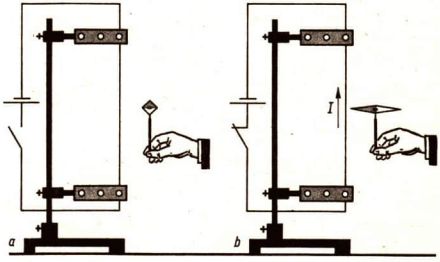


Bild 83/2 a) der Leiter ist stromlos, b) durch den Leiter fließt ein Gleichstrom

Auch der folgende Versuch zeigt ein entsprechendes Ergebnis.

Ein schmales Band aus Aluminiumfolie befindet sich zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten. Nach Einschalten des elektrischen Stromes ist zu beobachten, daß sich der Leiter bewegt (Bild 83/3). Beim Ausschalten des Stromes nimmt das Aluminiumband seine ursprüngliche Lage ein. 28

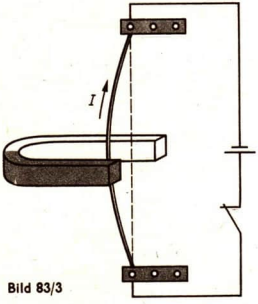


Bild 83/3

Aus dem Versuch ist zu schließen:

> Zwischen stromführenden Leitern und Dauermagneten wirken Kräfte.

Wodurch unterscheiden sich die Versuche 27 und 28?

Eigenschaften der Dauermagnete

Zur weiteren Untersuchung der Kräfte zwischen stromführenden Leitern und Dauermagneten werden Kenntnisse über den Magnetismus benötigt. Deshalb werden im folgenden grundlegende Eigenschaften von Dauermagneten beschrieben.

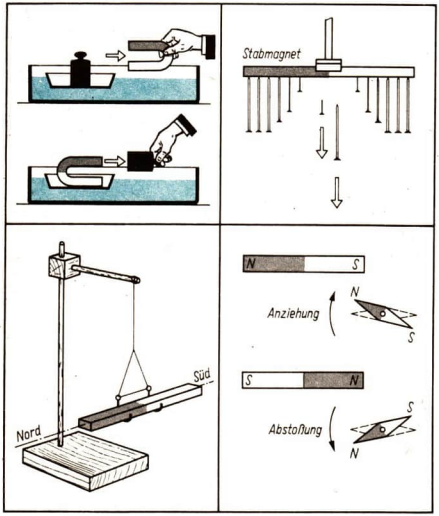


Bild 84/1 Zwischen Magneten und Körpern aus Eisen wirken Anziehungskräfte. Zwischen Magneten und Körpern aus den meisten anderen Stoffen (z. B. Glas, Aluminium, Plaste) wirken keine Kräfte.
Bild 84/2 Die Kraftwirkung zwischen Magneten und Körpern ist längs eines Magnetstabes unterschiedlich. Sie ist am größten in der Nähe der Stabenden, an den Magnetpolen. In der Stabmitte ist keine Kraftwirkung festzustellen.

Bild 84/3 Wird ein Stabmagnet leicht drehbar aufgehängt, stellt er sich annähernd in Nord-Süd-Richtung ein. Dabei weist immer derselbe Pol nach Norden. Dieser wird magnetischer Nordpol, der andere magnetischer Südpol genannt.
Bild 84/4 Auch zwei Magnete üben aufeinander Kräfte aus. Hierbei ist zu beobachten: Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab, ungleichnamige Magnetpole ziehen einander an.

Das magnetische Feld

Die Versuche 25 bis 28 zeigen, daß stromführende Leiter und Magnete Kräfte aufeinander ausüben.
Bei der Behandlung der elektrischen Ladung (↗ S. 69) wurde festgestellt, daß auch zwischen geladenen Körpern Kräfte wirken. Ihre Übertragung wurde mit Hilfe des elektrischen Feldes erklärt. Es liegt deshalb nahe, die bisher untersuchten Kraftwirkungen zwischen zwei stromführenden Leitern, Dauermagneten und Eisenkörpern auf magnetische Felder zurückzuführen.

Im Raum um stromdurchflossene Leiter und Dauermagnete besteht ein besonderer Zustand. Man sagt: In diesem Raum besteht ein magnetisches Feld. Die Eigenschaften des magnetischen Feldes werden durch Kraftwirkungen auf Probekörper aus Eisen, auf Dauermagnete und auf stromführende Leiter beschrieben.

Der Zusammenhang zwischen elektrischen Strömen und magnetischen Feldern kann durch äußere Einflüsse, z. B. Temperatur- oder Druckänderungen, nicht aufgehoben werden. Auch in der Umgebung stromführender Flüssigkeiten und Gase bestehen magnetische Felder. Es gibt keinen elektrischen Strom ohne Magnetfeld.
Die beobachteten Kraftwirkungen zwischen den stromdurchflossenen Leitern bei den Versuchen 25 und 26 können jetzt mit Hilfe der Kenntnisse über das magnetische Feld erklärt werden.
Beim Einschalten des Stromes entstehen in der Umgebung beider Leiter Magnetfelder. Dadurch befindet sich der rechte Leiter im Magnetfeld des linken Leiters und der linke Leiter im Magnetfeld des rechten Leiters. Die wechselseitige Anziehung bewirkt die beobachtete Bewegung der stromdurchflossenen Leiter.
Auch zwischen Dauermagneten wurden Kraftwirkungen beobachtet (↗ S. 84). Schließlich wurde im Versuch 28 festgestellt, daß auch zwischen einem stromdurchflossenen Leiter und einem Dauermagneten Kraftwirkungen auftreten.
Aus all diesen Beobachtungen ist zu schließen, daß es sich bei dem Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters und dem Magnetfeld eines Dauermagneten um die gleiche physikalische Erscheinung handelt.

Energie des magnetischen Feldes

Im Versuch 28 wird das Aluminiumband in den Hufeisenmagneten hineingezogen. Hieraus ist zu schließen, daß an dem Aluminiumband mechanische Arbeit verrichtet wird, die zuvor im magnetischen Feld gespeichert war. Eine mechanische Arbeit wird auch verrichtet, wenn sich ein Körper aus Weicheisen unter dem Einfluß eines magnetischen Feldes bewegt (Bild 84/1). Ein weiteres Beispiel ist die Drehung einer Magnetnadel.
Aus diesen Überlegungen geht hervor:

▶ Das magnetische Feld ist Träger von Energie.

In den genannten Beispielen finden Energieumwandlungen statt. Die Energie des magnetischen Feldes verkleinert sich um die abgegebene mechanische Arbeit. Diese kann in Wärmeenergie, in kinetische oder potentielle Energie umgewandelt werden.

Feldlinien des magnetischen Feldes

Auch das Magnetfeld kann durch Feldlinien veranschaulicht werden. Beim folgenden Versuch wird ein Feldlinienbild für die Umgebung eines langen, geraden stromdurchflossenen Leiters hergestellt.

29 ▼ Ein Leiter wird senkrecht durch eine waagerecht liegende Kartonscheibe geführt. Diese wird gleichmäßig mit einer dünnen Schicht Eisenfeilspäne bestreut. Nach dem Einschalten des Stromes ordnen sich die Eisenteilchen (Bild 86/1). Sie veranschaulichen den Verlauf der magnetischen Feldlinien.

Bild 86/1 Magnetische Feldlinien in der Umgebung eines geraden stromführenden Leiters. Durch leichtes Klopfen gegen die Unterlage kann das Ordnen unterstützt werden. Warum?

Aus Bild 86/1 ist zu erkennen:

Die magnetischen Feldlinien in der Umgebung eines geraden stromführenden Leiters sind konzentrische Kreise, deren Mittelpunkt im Leiter liegt. Die Kreisebenen stehen senkrecht auf dem Leiter.

Wir müssen wieder zwischen dem Modell Feldlinien und dem wirklich vorhandenen Feld unterscheiden.

Um den Verlauf magnetischer Feldlinien auch ohne Eisenfeilspäne zu bestimmen, kann eine Magnetnadel verwendet werden.

30 ▼ Der Versuch 27 mit dem stromführenden Leiter und der Magnetnadel wird etwas abgewandelt. Die Magnetnadel wird in gleichbleibendem Abstand um den Leiter herumgeführt. Aus Bild 86/2 geht hervor, welche Lage sie jeweils einnimmt.

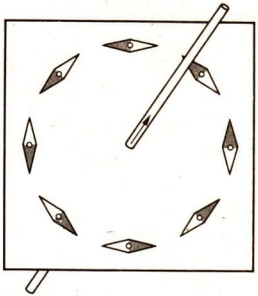


Bild 86/2 Einstellen einer Magnetnadel im Magnetfeld eines stromführenden Leiters

Beim Vergleich der Bilder 86/1 und 86/2 ist zu erkennen:

Eine drehbar gelagerte Magnetnadel zeigt in einem Magnetfeld die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

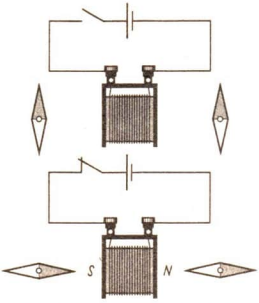


Bild 87/1 Der magnetische Nordpol der Magnetnadel wird von dem einen Ende der stromführenden Spule abgestoßen und von dem anderen Ende angezogen.

Für den Richtungssinn der magnetischen Feldlinien wurde festgelegt:

> Der Nordpol der Magnetnadel gibt den Richtungssinn der Feldlinien an.

Spule und Stabmagnet

In vielen technischen Anwendungen werden Spulen benutzt. Die Bilder 87/1 und 87/2 lassen erkennen, daß sich eine Spule ähnlich wie ein Stabmagnet verhält. An den Spulenenden entsteht – je nach der Richtung des Stromes – ein magnetischer Nordpol bzw. Südpol. Gemeinsame Eigenschaften von Spule und Stabmagnet sind bei einem Vergleich ihrer Feldlinienbilder zu erkennen.

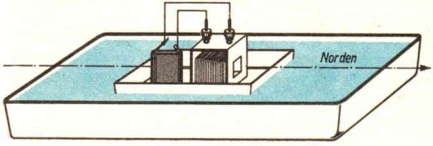


Bild 87/2 Eine stromdurchflossene Spule schwimmt auf einer wassergefüllten Schale und ist hierdurch leicht drehbar. Sie stellt sich mit ihrer Achse etwa in Nord-Süd-Richtung ein.

31

Ein Kartonblatt wird mit einem Ausschnitt versehen, über eine Spule geschoben und durch untergelegte Klötze waagerecht in der Mittelebene der Spule gehalten. Der Karton wird gleichmäßig mit Eisenfeilspänen bestreut. Nach dem Einschalten des Stromes erhält man bei leichtem Klopfen gegen den Karton das Feldlinienbild (Bild 87/3). In entsprechender Weise wird auch das Feldlinienbild eines Stabmagneten hergestellt (Bild 87/4).

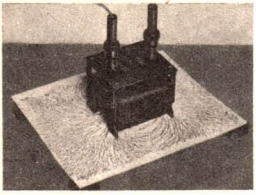


Bild 87/3 Magnetische Feldlinien in der Umgebung einer stromführenden Spule

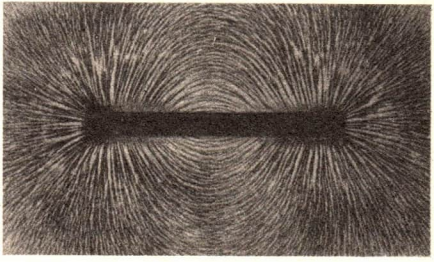


Bild 87/4 Magnetische Feldlinien in der Umgebung eines Stabmagneten

Beim Vergleich der Bilder 87/3 und 87/4 ist zu erkennen:

> Die magnetischen Felder in der Umgebung von Dauermagneten und stromführenden Spulen haben die gleiche Form.

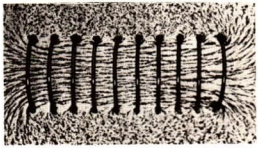


Bild 88/1 Magnetische Feldlinien im Innenraum einer Spule

Den Verlauf der Feldlinien im *Innenraum* einer Spule zeigt das Bild 88/1.

> Im Innenraum einer stromführenden Spule verlaufen die Feldlinien annähernd parallel.

Vergleicht man den Verlauf der Feldlinien in elektrischen Feldern und in magnetischen Feldern, erkennt man einen grundlegenden Unterschied:
Die Feldlinien des elektrischen Feldes erstrecken sich von den positiven zu den negativen Ladungen. Die Feldlinien des magnetischen Feldes in der Umgebung stromführender Leiter sind geschlossene Kurven.

Das Magnetfeld der Erde

Die Ausrichtung der Kompaßnadel in die Nord-Süd-Richtung wird ebenfalls durch ein magnetisches Feld bewirkt. Es handelt sich dabei um das Magnetfeld der Erde. Die Erde kann als ein sehr großer Dauermagnet betrachtet werden (Bild 88/2).
Der auf der nördlichen Halbkugel der Erde liegende Magnetpol ist ein magnetischer Südpol; der Magnetpol auf der südlichen Halbkugel ist ein magnetischer Nordpol.

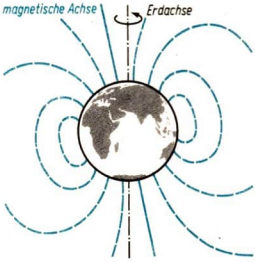


Bild 88/2 Magnetisches Feld der Erde

Der Einfluß des magnetischen Feldes der Erde ist bei allen magnetischen Messungen zu berücksichtigen. Bei Versuch 27 war das Magnetfeld der Erde wesentlich schwächer als das Magnetfeld des stromführenden Leiters und konnte deshalb vernachlässigt werden.
Die Ursachen des Erdmagnetismus sind noch nicht in allen Einzelheiten geklärt. Für die weitere Forschung auf diesem Gebiet sind die magnetischen Messungen der Weltraumlaboratorien in der Umgebung der Planeten und des Mondes von großem Nutzen.

Die Stärke des Magnetfeldes einer Spule

Es soll nun untersucht werden, von welchen physikalischen Größen das Magnetfeld einer stromführenden Spule abhängt. Zum Vergleich der Stärken der Magnetfelder messen wir ähnlich wie beim elektrischen Feld die auf einen Probekörper ausgeübten Kräfte (Bild 89/1).

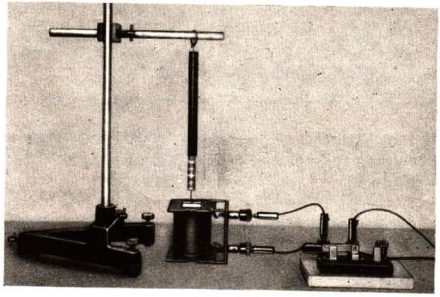


Bild 89/1 Versuchsanordnung zum Vergleich der Stärken magnetischer Felder in Spulen

An einem Federkraftmesser wird ein Eisenkörper befestigt, der etwa 1 cm tief in die Spule hineinragt. Beim Einschalten des Stromes wird der Eisenkörper tiefer in die Spule hineingezogen. Die im Magnetfeld wirkende Kraft wird abgelesen. 32 ▼

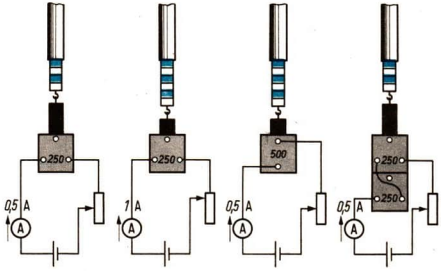


Bild 89/2 Kraftwirkung auf einen Eisenkörper im magnetischen Feld einer stromführenden Spule

Bei den Messungen der wirkenden Kraft werden die Stromstärke, die Windungszahl und die Länge der Spule verändert. Damit sich die verschiedenen Einflüsse nicht überlagern, werden immer nur die Beziehungen zwischen zwei Größen untersucht, die anderen werden konstant gehalten. Eine solche Arbeitsmethode wird bei physikali-

schen Untersuchungen mit mehreren variablen Größen vielfach angewendet (↗ S. 79). Bild 89/2 veranschaulicht die Meßergebnisse.
Aus den Meßergebnissen ist zu erkennen:

> Die Stärke des Magnetfeldes einer stromführenden Spule wächst bei konstanter Länge, wenn die Stromstärke und die Windungszahl vergrößert werden. Die Stärke des Magnetfeldes verkleinert sich mit zunehmender Länge der Spule, wenn Stromstärke und Windungszahl konstant bleiben.

Die magnetischen Eigenschaften einer stromführenden Spule werden beim Einführen eines Eisenkerns wesentlich verändert.

33 Quer zu einer in Nord-Süd-Richtung eingespielten Magnetnadel wird eine Spule aufgestellt (Bild 90/1 a). Beim Einschalten des Stromes dreht sich die Nadel in die gezeichnete Stellung (Bild 90/1 b). Wird jetzt ein Eisenkern in die Spule gebracht, stellt sich die Magnetnadel nahezu in Ost-West-Richtung ein (Bild 90/1 c).
Die Magnetnadel wird nach dem Einschalten des Stromes gleichzeitig von dem Magnetfeld der Erde und vom Magnetfeld der Spule beeinflußt.

Das Versuchsergebnis zeigt:

> Durch einen Eisenkern wird die Stärke des magnetischen Feldes in der Umgebung der stromführenden Spule vergrößert.

Bei Versuchen mit Körpern aus Stahl und Weicheisen im Magnetfeld sind verschiedenartige Eigenschaften erkennbar. Körper aus *Stahl* werden durch den Einfluß des Feldes zu Dauermagneten. Körper aus *Weicheisen* sind außerhalb des Feldes wieder unmagnetisch.

I in A	N	l in cm	F in N
0,5	250	10	1
1	250	10	2
0,5	500	10	2
0,5	500	20	1

Tabelle 10: Meßreihe

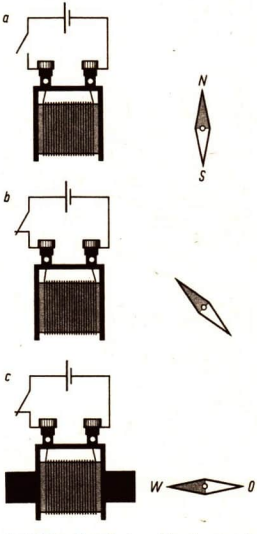


Bild 90/1 Einfluß eines Eisenkerns auf das Magnetfeld einer Spule

Magnetische Werkstoffe

Für technische und wissenschaftliche Zwecke werden Werkstoffe mit genau festgelegten magnetischen Eigenschaften benötigt. In der Hochfrequenz- und Fernmeldetechnik spielen *Ferrite* eine wesentliche Rolle. Bekannte

Bild 90/2 Ferrit-Antenne in einem Transistor-Empfänger

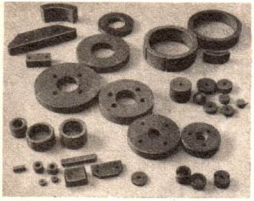
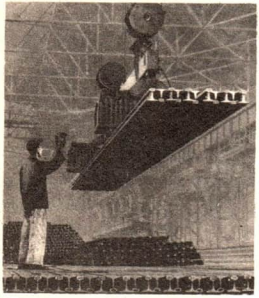


Bild 91/1 Keramische Magnete

Anwendungen sind die Ferrit-Antennen der Rundfunkgeräte (Bild 90/2) und die Maniperm-Haftplättchen. Bild 91/1 zeigt noch weitere keramische Magnete.
Wichtigster Hersteller dieser keramischen Magnetwerkstoffe ist in unserer Republik der VEB Keramische Werke Hermsdorf. Die Grundbestandteile der Ferrite sind Oxide von Eisen und anderen zweiwertigen Metallen. Die Rohstoffe werden fein gemahlen, in die gewünschten Formen gebracht und bei Temperaturen von etwa 1400 °C gesintert.
Die meisten Ferrite haben eine sehr kleine elektrische Leitfähigkeit und eine viel kleinere Dichte als metallische Magnetwerkstoffe.



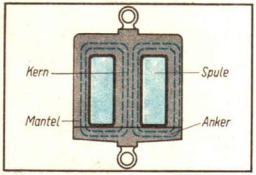
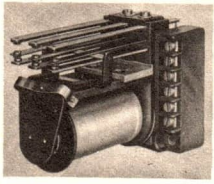


Bild 91/2 Lastenhebemagnet. Ansicht und Querschnitt durch den Magneten

Der Elektromagnet

Eine stromführende Spule, die mit einem Weicheisenkern ausgestattet ist, wird als Elektromagnet bezeichnet. Mit Elektromagneten lassen sich Magnetfelder sehr großer Stärke aufbauen. Das Magnetfeld eines Elektromagneten besteht nur, solange Strom durch die Spule fließt. Der Elektromagnet kann deshalb durch elektrische Schaltvorgänge gesteuert werden und selbst – mit Schaltkontakten versehen – wieder als Schalter dienen.
Im folgenden werden einige Beispiele für Anwendungen gegeben.
Elektrokran. In unseren Stahl- und Walzwerken werden vielfach Kräne eingesetzt, die an Stelle des Greifers einen großen Topfmagneten haben. Die Elektrokräne werden z. B. verwendet, um Eisenschrott zu befördern und große Stahlblöcke zu heben (Bild 91/2).
Relais. Bei der Mechanisierung und Automatisierung von Produktionsvorgängen ist es oftmals notwendig, von einer Zentrale aus viele Stromkreise zu schalten. Hierbei werden elektromagnetische Relais als Fernschalter eingesetzt. Der Aufbau eines Relais ist aus Bild 91/3 ersichtlich. Wenn man den Spulenstromkreis schließt, wird der Anker an-

Schülerexperiment E 1a und E 1b,
Seite 159 und 161,
Fragen, Aufträge, Versuche,
Seite 150, Nr. 145



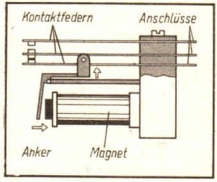


Bild 91/3 Relais

gezogen. Er verformt hierbei die Kontaktfedern. Auf diese Weise können mehrere andere Stromkreise geschlossen oder unterbrochen werden.

Elektrische Klingel. Der Strom wird dem Elektromagneten über eine Kontaktschraube zugeführt, die eine mit dem Anker verbundene Blattfeder berührt. Beim Einschalten des Stromes zieht der Elektromagnet den Anker an. Hierbei wird der Stromkreis zwischen der Kontaktschraube und der Blattfeder unterbrochen; damit besteht kein magnetisches Feld mehr. Der Anker federt in seine ursprüngliche Lage zurück und schließt den Stromkreis von neuem. Diese beiden Schaltvorgänge wiederholen sich in kurzen Zeitabständen. Die elektrische Klingel liefert ein Beispiel für die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie.

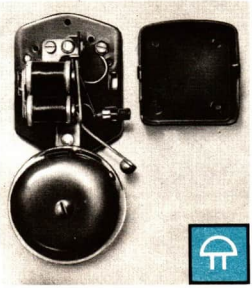


Bild 92/1 Elektrische Klingel und Schaltzeichen

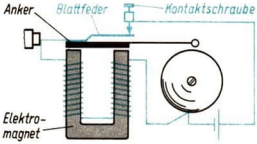


Bild 92/2 Stromkreis einer elektrischen Klingel

Das elektromotorische Prinzip

Die Versuche 31 bis 33 haben gezeigt, daß ein stromdurchflossener Leiter durch ein Magnetfeld bewegt werden kann. Das ist das Grundprinzip des Elektromotors.

Die Zusammenhänge zwischen dem Magnetfeld, dem elektrischen Strom und der auf den Leiter ausgeübten Kraft sollen jetzt weiter untersucht werden. Für die technischen Anwendungen muß festgestellt werden, wovon die Richtung dieser Kraft abhängig ist. Mit dem folgenden „Schaukelversuch" soll diese Frage beantwortet werden.

34 ▼ Ein Leiterstück wird nach Bild 92/3 zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagneten so befestigt, daß es frei schwingen kann. Die beiden Metallbänder werden an eine Spannungsquelle angeschlossen. Sobald der Strom eingeschaltet ist, wird die „Schaukel" in Pfeilrichtung ausgelenkt.

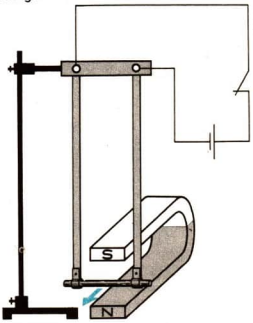


Bild 92/3 Schaukelversuch

In Bild 92/4 sind für den „Schaukelversuch" die Richtungen der *Feldlinien*, des *Stromes* und der *Kraft* dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Kraft sowohl senkrecht zu den Feldlinien als auch senkrecht zum stromdurchflossenen Leiter gerichtet ist.

Um zu prüfen, ob der gefundene Zusammenhang allgemein gültig ist, verändern wir die Versuchsbedingungen.

35 ▼ Die Anschlüsse an der Spannungsquelle werden vertauscht. Der Strom durchfließt den Leiter jetzt von B nach A. Das Leiterstück wird jetzt in den Magneten hinein bewegt. Der Zusammenhang ist in Bild 93/1 dargestellt.

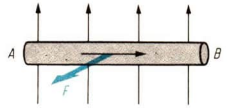


Bild 92/4 magnetische Feldlinien

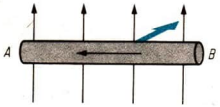


Bild 93/1

Es ist zu erkennen, daß die Kraft wieder senkrecht zu den Feldlinien und zum stromdurchflossenen Leiter gerichtet ist. Es hat sich jedoch der Richtungssinn der Kraft geändert.
Auch weitere Versuche ergeben immer wieder:

> Die im Magnetfeld auf einen stromführenden Leiter ausgeübte Kraft ist senkrecht zu den Feldlinien und zum stromdurchflossenen Leiter gerichtet.
> Der Richtungssinn der Kraft hängt von der Richtung des Stromes ab.

Die Versuchsanordnung nach Bild 92/3 kann schließlich auch noch verwendet werden, um die Abhängigkeit des Betrages der Kraft von der Stromstärke und der Stärke des Magnetfeldes zu bestimmen. Hierbei ist festzustellen:
Die auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld ausgeübte Kraft nimmt zu, wenn die Stromstärke und wenn die Stärke des Magnetfeldes vergrößert werden.

Ladungsträger im Magnetfeld

Wie ist es zu erklären, daß auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Kraft wirkt? Es ist zu vermuten, daß zwischen den bewegten Ladungsträgern und dem Magnetfeld eine Wechselwirkung besteht. Die beobachtete Kraftwirkung auf den Leiter könnte dann in folgender Weise zustande kommen:
Zunächst wirkt auf die Elektronen im Magnetfeld eine Kraft. Diese wird durch Zusammenstöße mit den Metallionen des Gitters auf den Leiter übertragen und setzt diesen in Bewegung.
Diese Überlegungen werden durch Versuche mit Ladungsträgern im Vakuum bestätigt (↗ S. 117).

> Auf bewegte Ladungsträger wirkt im Magnetfeld eine Kraft.

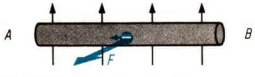


Bild 93/2 Kraftwirkung auf bewegte Ladungsträger im magnetischen Feld

Aus Bild 93/2 geht hervor, welchen Richtungssinn die auf ein bewegtes Elektron im Magnetfeld ausgeübte Kraft hat. Die Zusammenhänge können aus Bild 92/4 übernommen werden. Es ist aber zu beachten, daß die Elektronen sich entgegen der festgelegten elektrischen Stromrichtung (↗ S. 76) bewegen.

Das Drehspulinstrument

Die auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld wirkende Kraft kann zur Messung der Stromstärke genutzt werden. Beim Drehspulinstrument fließt der zu messende Strom durch eine drehbar gelagerte Spule, die sich im Felde eines Dauermagneten befindet. Die Pole eines Hufeisenmagneten werden mit zylindrisch ausgesparten Polschuhen versehen. Dazwischen wird ein zylindrischer Eisenkern eingesetzt. Die Form des Magnetfeldes ist in Bild 94/1 zu erkennen. In dem schmalen Luftspalt befindet sich eine auf einen Aluminiumrahmen gewickelte Drehspule. Diese wird durch zwei Spiralfedern elastisch in ihrer Ruhelage gehalten. Die Federn dienen gleichzeitig zur Stromzuführung.

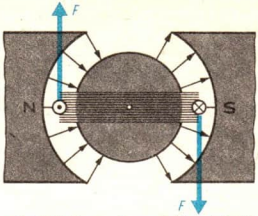
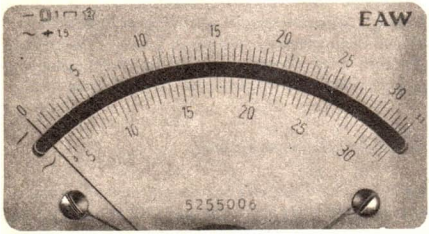


Bild 94/1 Strom, Magnetfeld und Kräfte bei der Drehspule



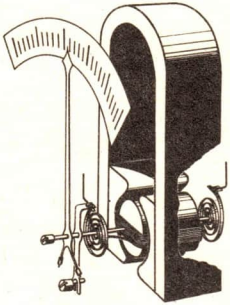


Bild 94/2 Drehspulmeßgerät. Links: Skale; rechts: Aufbau

Sobald Strom durch die Drehspule fließt, wird sie aus ihrer Ruhelage gedreht, bis Gleichgewicht zwischen den magnetischen Kräften und den Kräften der verformten Federn besteht.

Der Gleichstrommotor

In den Elektromotoren wird durch die im Magnetfeld auf stromdurchflossene Leiter wirkende Kraft eine Drehbewegung hervorgerufen. Der Elektromotor wandelt auf diese Weise elektrische Energie in mechanische Energie um. Die Wirkungsweise eines Gleichstrommotors zeigen die Bilder 94/3 und 95/1 bis 95/4.

Um größere Kräfte als in unserem Beispiel zu erhalten, wird die Leiterschleife durch eine Spule mit Eisenkern ersetzt. Die abgebildete Spule wird nach ihrer Form als Doppel-T-Anker bezeichnet (Bild 95/5). Um das magnetische Feld zu verstärken, wird an Stelle eines Dauermagneten ein Elektromagnet benutzt.

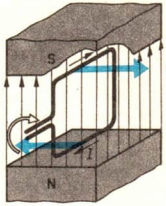
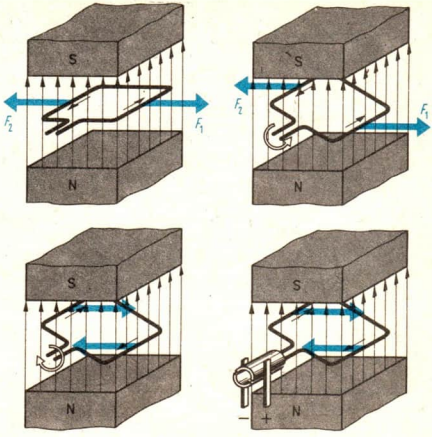
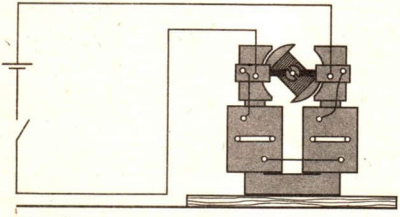


Bild 94/3 In einem Magnetfeld befindet sich eine drehbar gelagerte, rechteckige Leiterschleife. Durch die Schleife fließt ein Strom in der gezeichneten Richtung. Auf die Teile der Schleife wirken Kräfte. Die Kräfte F_1 und F_2 rufen eine Drehbewegung der Schleife hervor.

Bild 95/1 Die Schleifenebene erreicht die Horizontallage. Die Kräfte F_1 und F_2 rufen keine Drehbewegung hervor. Man bezeichnet diese Lage der Schleife daher als Totlage.
Bild 95/2 Infolge ihrer Trägheit bewegt sich die Schleife über die Totlage hinaus. Die Kräfte F_1 und F_2 rufen jetzt eine Drehung im entgegengesetzten Sinn hervor.
Bild 95/3 Um aber die ursprüngliche Drehrichtung beizubehalten, wird die Richtung des Stromes beim Gang durch die Totlage umgekehrt. Dabei ändern aber auch die Kräfte ihren Richtungssinn. Die ursprüngliche Drehrichtung wird dadurch beibehalten.
Bild 95/4 Die Umkehrung der Richtung des Stromes kann mit Hilfe eines *Kollektors* selbsttätig ausgeführt werden. Dieser besteht aus zwei gegeneinander isolierten Halbzylindern. Die Stromzufuhr erfolgt über Schleifkontakte.





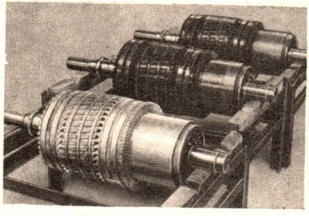


Bild 95/5 Damit größere Kräfte wirksam sind, wird die Leiterschleife durch eine Spule mit Eisenkern ersetzt. Diese wird als Anker bezeichnet. Das magnetische Feld kann von einem Elektromagneten erzeugt werden, der parallel oder in Reihe mit dem Anker an die Spannungsquelle geschaltet wird.

Mit Hilfe komplizierter Anker- und Kollektorformen erreicht man einen gleichmäßigen Lauf des Motors und einen günstigen Wirkungsgrad (Bild 95/6).

Bild 95/6

Übersicht zu den Anwendungen des Elektromagneten

Funktion unabhängig von der Richtung des Stromes	Funktion abhängig von der Richtung des Stromes
Elektrokran	Drehspulinstrument
Relais	Gleichstrommotor
Klingel	

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 151, Nr. 158 bis 173

Die elektromagnetische Induktion

Seit der Gründung unserer Republik sind zahlreiche Großkraftwerke errichtet worden. Hierdurch ist es beispielsweise möglich, immer mehr Produktionsprozesse zu automatisieren. Das abgebildete Kraftwerk Thierbach entstand in Gemeinschaftsarbeit der Werktätigen mehrerer sozialistischer Länder. Unser Bild zeigt einen Blick vom 300 m hohen Schornstein auf die Baustelle.

Motor und Generator

In einem Wärmekraftwerk wird die bei der Verbrennung von Kohle oder anderen Brennstoffen frei werdende Wärmeenergie zunächst in mechanische Energie umgewandelt. Das geschieht in Wärmekraftmaschinen, vor allem Dampfturbinen. Diese mechanische Energie wird dann von Generatoren (↗ Klasse 8) in elektrische Energie umgewandelt.
Man kann vermuten, daß die Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie im Generator mit ähnlichen Mitteln erreicht werden kann, wie die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie im Elektromotor. Mit dem folgenden Versuch soll diese Vermutung überprüft werden.

36 ▼ Der Schalter wird in die Stellung 1 gebracht (Bild 96/2). Dadurch ist die elektrische Maschine an die Spannungsquelle angeschlossen. Der Anker beginnt zu rotieren.
Der Schalter wird in die Stellung 2 gebracht. Wir können beobachten, daß die Lampe aufleuchtet. Sie erlischt allmählich, während der Anker zum Stillstand kommt.

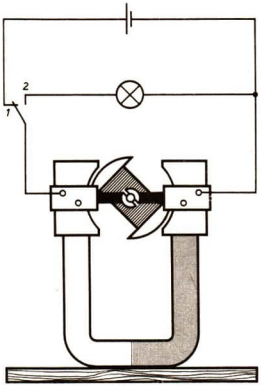


Bild 96/2

Beim Umlegen des Schalters in die Stellung 2 wurde die Lampe an die elektrische Maschine angeschlossen. Der Anker rotierte noch. (Warum?) Seine kinetische Energie wurde in elektrische Energie umgewandelt. Die elektrische Maschine arbeitete als Generator. Der Versuch zeigt: Die von einem Elektromotor bewirkte Energieumwandlung ist umkehrbar. Die gleiche elektrische Maschine

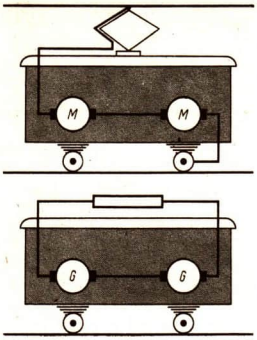


Bild 97/1 Schaltung der elektrischen Maschine im Triebwagen einer Straßenbahn beim Anfahren und Bremsen (Schema). Beim Bremsen wird die elektrische Maschine des Triebwagens von der Oberleitung getrennt und mit einem auf dem Dach montierten Widerstand verbunden. Die zum Antrieb des Generators erforderliche Energie wird der kinetischen Energie des Fahrzeuges entnommen.

kann als Elektromotor und als Generator betrieben werden (Bild 97/1).
Die im Generator stattfindende Energieumwandlung beruht auf einer Erscheinung, die als **elektromagnetische Induktion**[1] bezeichnet wird. Diese soll im folgenden näher untersucht werden.

Die elektromagnetische Induktion

Die Einzelteile der im Versuch 36 verwendeten elektrischen Maschine sind uns von der Behandlung des Gleichstrommotors her bekannt. Eine wesentliche Voraussetzung für die Energieumwandlung im Generator ist, daß sich eine Spule – der Anker – in einem magnetischen Feld bewegt. Um die Gesetzmäßigkeiten der elektromagnetischen Induktion festzustellen, wird eine Versuchsreihe durchgeführt.

An eine Kastenspule wird ein empfindlicher Spannungsmesser mit Nullpunkts-Mittellage angeschlossen. Die Kastenspule dient als *Induktionsspule*. Außerdem wird ein Dauermagnet zur Erzeugung eines magnetischen Feldes benötigt. An Stelle des Dauermagneten kann auch eine zweite Spule benutzt werden, die an eine Spannungsquelle angeschlossen wird. Wir wollen diese zweite Spule *Erregerspule* nennen. 37 ▼

1. Teilversuch

Die Induktionsspule wird auf verschiedene Arten im Felde des Dauermagneten bzw. der Erregerspule bewegt (Bild 97/2). Das Meßgerät zeigt eine Spannung an, sofern die Induktionsspule nicht um ihre Längsachse gedreht wird. 38 ▼

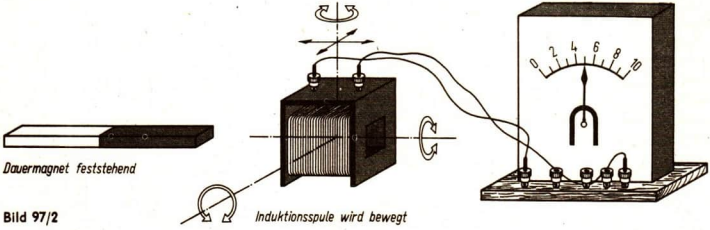


Bild 97/2

Auf Grund unserer Kenntnisse über die Form der Magnetfelder von Dauermagneten und stromdurchflossenen Spulen können wir feststellen:

[1] inducere (lat.): hineinleiten, -führen

Wenn sich während der Bewegung die Stärke des Magnetfeldes innerhalb der Induktionsspule ändert, wird eine Spannung erzeugt. Diese Spannung heißt Induktionsspannung, der Vorgang selbst elektromagnetische Induktion.

2. Teilversuch

39 ▼ Dauermagnet bzw. Erregerspule werden in der Umgebung der feststehenden Induktionsspule bewegt (Bild 98/1). Es werden wieder Induktionsspannungen angezeigt. Bei der Drehung des Dauermagneten bzw. der Erregerspule um die Längsachse wird keine Spannung angezeigt.

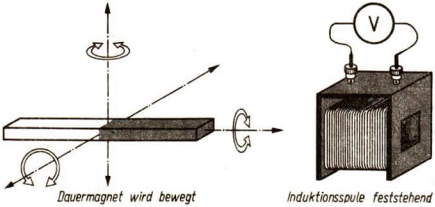


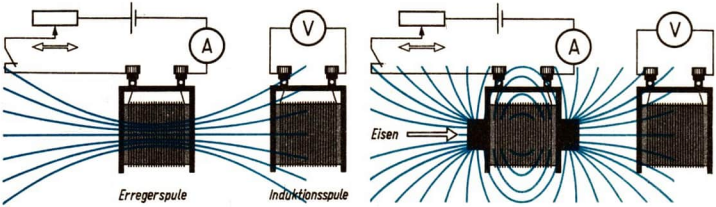
Bild 98/1

Die mit dem ersten Teilversuch gewonnene Erkenntnis ist bestätigt worden. Außerdem ist festzustellen, daß es nur auf eine Relativbewegung zwischen Dauermagnet (bzw. Erregerspule) und Induktionsspule ankommt.

3. Teilversuch

40 ▼ Die Induktionsspule wird vor der Erregerspule aufgestellt (Bild 98/2). Diese liegt in Reihe mit einem Strommesser, einem Schiebewiderstand, einem Schalter und einer Spannungsquelle. Beim Ein- und Ausschalten sowie beim Ändern der Stromstärke in der Erregerspule mit Hilfe des Widerstandes treten Induktionsspannungen auf.
Schließlich wird bei konstanter Stromstärke eine Spannung induziert, während ein Eisenkern in die Erregerspule eingeführt wird (Bild 98/3).

Bilder 98/2 und 98/3



Aus dem 3. Teilversuch geht hervor, daß eine Induktionsspannung auch ohne mechanische Bewegung der Induktionsspule oder des Dauermagneten erzeugt werden kann. Bei dem Versuch werden jedoch wieder Änderungen der Stärke des magnetischen Feldes in der Induktionsspule herbeigeführt. Es ist zu erkennen, daß die Induktionsspannung um so größer ist, je schneller die Änderungen des Magnetfeldes ablaufen.
Die bisher gewonnenen Erkenntnisse über den Induktionsvorgang sind im **Induktionsgesetz** zusammengefaßt:

> In einer Induktionsspule wird eine Spannung induziert, solange sich die Stärke des von der Spule umschlossenen Magnetfeldes ändert.

Die Induktionsspannung

Es ist zu vermuten, daß die Induktionsspannung von der Stärke des Magnetfeldes und von der Beschaffenheit der Induktionsspule abhängt. Diese Vermutungen sollen durch eine Versuchsreihe geprüft werden.

1. Teilversuch

Wir verwenden den gleichen Versuchsaufbau wie beim vorigen Versuch. In der Erregerspule werden nacheinander Ströme der Stärke 1 A, 2 A, 3 A, 4 A eingeschaltet bzw. ausgeschaltet. Bei jedem Schaltvorgang wird die Induktionsspannung gemessen.
Es ist festzustellen, daß die Induktionsspannung mit der Änderung der Stromstärke in der Erregerspule zunimmt. Da durch die Stromstärke in der Erregerspule die Stärke des Magnetfeldes bestimmt ist, kann man aus diesem Ergebnis schließen:

> Die Induktionsspannung ist um so größer, je größer die Änderung der Stärke des Magnetfeldes innerhalb der Induktionsspule ist.

2. Teilversuch

Es werden Induktionsspulen mit 500, 1 000 und 1 500 Windungen benutzt. Die Induktionsspannungen beim Ein- und Ausschalten werden wieder gemessen. Die Stromstärke in der Erregerspule wird während des Versuchs nicht geändert.

> Die Induktionsspannung ist um so größer, je größer die Windungszahl der Induktionsspule ist.

3. Teilversuch

43 In den Innenraum der Erregerspule werden Induktionsspulen mit verschieden großen Querschnitten, aber gleichen Windungszahlen gebracht. Die Stromstärke in der Erregerspule wird nicht geändert. Die Induktionsspannung beim Ein- und Ausschalten wird wieder gemessen.

> Die Induktionsspannung nimmt mit wachsendem Querschnitt der Induktionsspule zu.

Wir fassen die Ergebnisse der Untersuchung zusammen:

> Die Induktionsspannung nimmt zu, wenn die Änderung der Stärke des Magnetfeldes, die Windungszahl und der Querschnitt der Induktionsspule vergrößert werden.

Beim Induktionsvorgang werden in den Windungen der Spule Elektronen beschleunigt. Auf Grund unserer Kenntnisse über das Fließen eines elektrischen Stromes wissen wir, daß zum Bewegen von Elektronen ein elektrisches Feld erforderlich ist. Dieses Feld ist beim Induktionsvorgang entstanden.

> Ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld ist immer mit einem elektrischen Feld verknüpft.

Der Induktionsvorgang beim Bewegen der Induktionsspule kann auf folgende Weise erklärt werden. Wir betrachten hierzu Bild 100/1.
Der abgebildete Leiter bewegt sich in einem Magnetfeld. Er enthält frei bewegliche Elektronen. Sie erfahren bei der Bewegung des Leiters eine Kraft, die senkrecht zu den Feldlinien des Magnetfeldes und zum Geschwindigkeitsvektor steht. Die Elektronen bewegen sich unter dem Einfluß dieser Kraft im Leiter. Es entsteht an einem Ende des Leiters ein Elektronenüberschuß, am anderen Ende ein Elektronenmangel. Zwischen den Enden des Leiters besteht daraufhin eine elektrische Spannung, die Induktionsspannung.

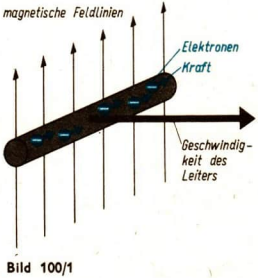


Bild 100/1

Der MHD-Generator

Der Induktionsvorgang findet auch statt, wenn sich ein leitendes Gas in einem Magnetfeld bewegt. Elektrisch leitend sind z. B. die bei Verbrennungsprozessen anfallenden Gase hoher Temperaturen. Solche Gase enthalten eine große Anzahl positiver und negativer Ladungsträger. Auf dieser Erscheinung beruht eine neuartige Spannungsquelle, der **magnetohydrodynamische Generator** (abgekürzt MHD-Generator). Bild 101/1 zeigt den Aufbau eines MHD-Generators in stark vereinfachter Form.

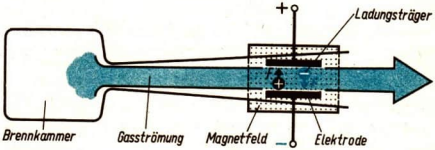


Bild 101/1

In der Brennkammer wird ein gasförmiger Brennstoff verbrannt. Die heißen Verbrennungsgase strömen mit großer Geschwindigkeit durch einen Kanal, der zwischen den Polen eines starken Elektromagneten hindurchgeführt wird. Die im Gas enthaltenen positiven und negativen Ladungsträger werden senkrecht zu den magnetischen Feldlinien abgelenkt und gelangen je nach ihrer Ladung zu der unteren oder oberen Elektrode. Diese Elektroden werden durch die Ladungsträger des Gases entgegengesetzt aufgeladen. Zwischen den Elektroden besteht daraufhin eine Induktionsspannung.
Durch den MHD-Generator wird Wärmeenergie ohne Beteiligung einer Wärmekraftmaschine in elektrische Energie umgewandelt.
Es ist zu erwarten, daß durch den Einsatz von Großanlagen nach dem Prinzip des MHD-Generators die Wirtschaftlichkeit von Kraftwerken erheblich gesteigert werden kann.

Die Richtung des Induktionsstromes

Beim Versuch 38 wurde eine Spule in einem Magnetfeld bewegt. Wir wiederholen den Versuch und achten diesmal auf die Zusammenhänge zwischen Zeigerausschlag und Bewegungsrichtung. Es ist zu beobachten, daß beim Umkehren des Richtungssinnes der Bewegung der Spule auch der Zeiger des Spannungsmessers nach der entgegengesetzten Seite ausschlägt.

Beim Meßvorgang fließt durch die Spule und den Spannungsmesser der Induktionsstrom. Aus dem Versuchsergebnis ist daher zu schließen, daß die Richtung des Induktionsstromes vom Richtungssinn der Bewegung der Spule abhängt.
Zur weiteren Untersuchung wird folgender Induktionsversuch durchgeführt.

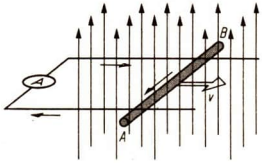


Bild 102/1

44 ▼ Ein gerades Leiterstück AB wird in einem Magnetfeld bewegt (Bild 102/1). Die Punkte AB laufen auf zwei Leiterschienen, zwischen denen ein Strommesser eingeschaltet ist. Die magnetischen Feldlinien sollen senkrecht auf der Schienenebene stehen. Der hohle Pfeil zeigt den Richtungssinn der Bewegung des Leiters an. Von der Reibung soll abgesehen werden. Solange der Leiter AB bewegt wird, fließt ein Induktionsstrom von B nach A.

Im Magnetfeld wirkt auf den vom Induktionsstrom durchflossenen Leiter eine weitere Kraft. Uns ist bereits bekannt, daß diese Kraft senkrecht zum stromdurchflossenen Leiter und senkrecht zu den Feldlinien gerichtet ist. Der Richtungssinn der Kraft kann dem Bild 93/1 (Schaukelversuch) entnommen werden.
Es ist zu erkennen, daß Kraft und Bewegung entgegengesetzt gerichtet sind.

Beachte: Die hier genannte Kraft ist die auf den Leiter als Folge des Induktionsstromes wirkende Kraft. Die hier genannte Bewegung ist die den Induktionsstrom verursachende Bewegung.

Das Lenzsche Gesetz

Der russische Physiker H. E. Lenz (1804 bis 1865) faßte die Richtungsbeziehungen beim Induktionsvorgang in dem nach ihm benannten Gesetz zusammen:

> Der Induktionsstrom ist immer so gerichtet, daß er der Ursache des Induktionsvorganges entgegenwirkt.

● *Nennen Sie Ursachen für den Induktionsvorgang!*

Das Lenzsche Gesetz folgt aus dem Satz von der Erhaltung der Energie. Es wird dazu nochmals der Versuch 44 betrachtet.
Der Leiter führt unter dem Einfluß der Kraft eine verzögerte Bewegung aus. Seine kinetische Energie nimmt

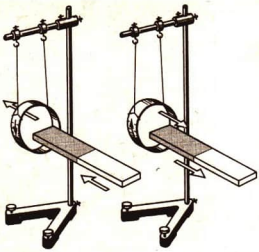


Bild 103/1

ab. Beim Fließen des Induktionsstromes wird elektrische Energie abgegeben. Es wird also mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Einen solchen Umwandlungsprozeß hatten wir bereits beim Motor-Generator-Versuch (↗ S. 96) kennengelernt.
Das Lenzsche Gesetz soll nun bei der Auswertung eines weiteren Induktionsversuches angewendet werden.

An die Stelle der Induktionsspule tritt ein leichter, an zwei Fäden aufgehängter Aluminiumring (Bild 103/1). Ein Stabmagnet wird durch die Ringöffnung gestoßen und wieder herausgezogen. Der Ring folgt den beiden Bewegungen des Magneten ein wenig. 45 ▼

Beim Hineinstoßen ist der Induktionsstrom im Ring so gerichtet, daß er der Annäherung des Magneten entgegenwirkt. Der Ring wird deshalb vom sich nähernden Magneten abgestoßen (Bild 103/2a).
Beim Herausziehen des Magneten ist der Induktionsstrom so gerichtet, daß er dem Entfernen des Magneten entgegenwirkt. Der Ring wird deshalb vom sich entfernenden Magneten angezogen (Bild 103/2b).

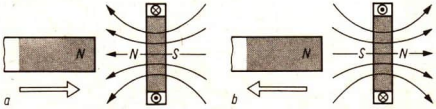


Bild 103/2 a) Erklärung des Ringversuches mit Hilfe der Magnetfelder. Beim Hineinstoßen des Magneten befindet sich gegenüber dem Nordpol des Dauermagneten der Nordpol des Magnetfeldes des Ringes. b) Beim Herausziehen befindet sich gegenüber dem Nordpol des Dauermagneten der Südpol des Magnetfeldes des Ringes.

Sowohl beim Nähern als auch beim Entfernen des Magneten wird eine mechanische Arbeit verrichtet.

Die Selbstinduktion

Die Erregerspule befindet sich beim Ein- und Ausschalten des Stromes in ihrem eigenen, zeitlich veränderlichen Magnetfeld. Sie kann deshalb als Erreger- und zugleich als Induktionsspule betrachtet werden.
Um diese Vermutung zu prüfen, wird der folgende Versuch durchgeführt:

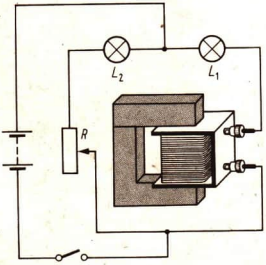


Bild 103/3

Die Lampe L_1 liegt in Reihe mit einer Spule, die zur Verstärkung des Magnetfeldes mit einem Eisenkern ausgestattet ist (Bild 103/3). Parallel zur Spule liegt die Lampe L_2, die in Reihe mit einem veränderlichen Widerstand geschaltet ist. Dieser wird so eingestellt, daß bei Dauerstrom beide Lampen gleich hell leuchten. Es wird mehrmals der Einschaltvorgang beobachtet. Es ist zu erkennen, daß die Lampe L_1 ihre volle Helligkeit immer etwas später als die Lampe L_2 erreicht. 46 ▼

Offenbar ist diese Erscheinung auf einen Induktionsvorgang zurückzuführen, der in der Erregerspule stattfindet. Man bezeichnet diesen Vorgang als **Selbstinduktion**.
Nach der Lenzschen Regel muß die Selbstinduktionsspannung so gerichtet sein, daß sie ihrer Ursache entgegenwirkt. Die Ursache ist das Entstehen des Magnetfeldes. So ist die Selbstinduktionsspannung der angelegten Spannung entgegengerichtet und verzögert das Anwachsen der Stromstärke (Bild 104/1).
Der Einfluß der Selbstinduktion ist auch beim Ausschaltvorgang zu beobachten. Beim Ausschalten nimmt die Stromstärke gemäß Bild 104/1 ab, weil durch die Änderung des Magnetfeldes beim Ausschalten ein Induktionsstrom entsteht, der die gleiche Richtung hat.

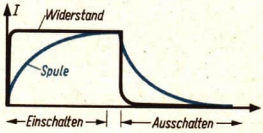


Bild 104/1 Änderung der Stromstärke beim Ein- und Ausschaltvorgang.

> Beim Ändern der Stromstärke in einer Spule tritt die Selbstinduktion auf. Durch die Selbstinduktion werden die Änderungen der Stromstärke beim Ein- und Ausschalten verzögert.

Der Zeitablauf der Ein- und Ausschaltvorgänge wird durch den Widerstand des Stromkreises und die Eigenschaften der Spule bestimmt. So ist z. B. festzustellen, daß sich die Stromstärke um so langsamer ändert, je größer die Windungszahl der Spule ist.
Die Eigenschaft der Spule beim Vorgang der Induktion kann durch eine neue physikalische Größe, die **Induktivität**, quantitativ erfaßt werden.
Die Einheit der Induktivität ist das Henry (H).
Mit dem folgenden Versuch wird gezeigt, daß die Selbstinduktionsspannung unter bestimmten Bedingungen sehr hohe Werte annehmen kann.

47 ▼ Parallel zur Spule wird eine Glimmlampe geschaltet (Bild 104/2). Diese zündet erst bei einer Spannung von etwa 100 V. Wenn beim Einschaltvorgang eine Spannung von 4 V angelegt wird, bleibt die Lampe dunkel. Beim Unterbrechen des Stromes leuchtet sie kurz auf.

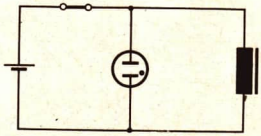


Bild 104/2

Durch das Zünden der Glimmlampe wird eine Induktionsspannung von über 100 V angezeigt.
Das Ergebnis dieses Versuches hat große Bedeutung für Schaltvorgänge in der Technik.

■ Beim Abschalten von Stromkreisen mit großen Induktivitäten sind Maßnahmen erforderlich, damit sich keine unerwünschten Funken- oder Bogenentladungen ausbilden können. So kann man z. B. den Lichtbogen durch Preßluft löschen.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 153, Nr. 174 bis 179

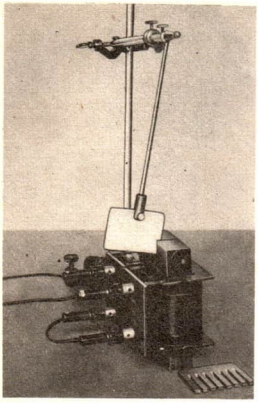


Bild 105/1 Pendelversuch zum Nachweis der Wirbelströme.

Wirbelströme

In den bisherigen Untersuchungen traten Induktionsströme in Drähten auf. Auch in anders geformten Metallkörpern müssen nach unseren bisherigen Erfahrungen Induktionsströme fließen, wenn sich diese Körper in einem Magnetfeld bewegen oder in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld befinden.

Zwischen den Polen eines zunächst stromlosen Elektromagneten pendelt eine Metallscheibe (Bild 105/1). Beim Einschalten des Stromes ist zu beobachten, daß das Pendel nach kurzer Zeit zur Ruhe kommt. Stößt man das Pendel erneut an, verhält es sich, als befände es sich in einer zähen Flüssigkeit. 48

Eine Erklärung kann wieder mit Hilfe des Lenzschen Gesetzes gegeben werden:
Die in der Metallscheibe induzierten Ströme wirken durch ihr eigenes Magnetfeld der Bewegung des Pendels entgegen. Da sich bei diesem Vorgang die Elektronen innerhalb des Körpers auf geschlossenen Bahnen bewegen, bezeichnet man diese Induktionsströme als **Wirbelströme**.

> In einem Metallkörper, der sich in einem Magnetfeld veränderlicher Stärke befindet, werden Wirbelströme induziert.

Mit dem folgenden Versuch soll festgestellt werden, ob die Ausbildung der Wirbelströme durch eine Änderung der Form des Leiters beeinflußt werden kann.

Die beim Versuch 48 verwendete massive Platte wird durch eine kammartig geschlitzte Platte ersetzt (Bild 105/2). 49
Mit diesem neuen Pendelkörper dauert die Schwingung des Pendels länger an.

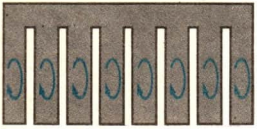


Bild 105/2

Durch die Unterteilung des Leiters wird gleichsam der den Wirbelströmen zur Verfügung stehende Leiterquerschnitt verkleinert. Damit vergrößert sich der Widerstand, und die Stromstärke der Wirbelströme nimmt ab.
Durch die Wirbelströme wird mechanische bzw. elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Wirbelstromverlusten*. Diese werden in den Eisenteilen elektrischer Maschinen und Transformatoren besonders durch die zeitlich veränderlichen Magnetfelder der Wechselströme verursacht. Sie

führen zu einer schädlichen Erwärmung der Maschine und zu einer Verringerung des Wirkungsgrades.
Der zweite Pendelversuch zeigt eine Möglichkeit, die Wirbelstromverluste zu verkleinern: Man unterteilt die Eisenteile in dünne, gegeneinander isolierte Blechlamellen. Außerdem werden Eisensorten mit großem spezifischem Widerstand verwendet. In der Schwachstromtechnik spielen dabei die schlecht leitenden Ferrite eine immer größere Rolle.
Die Wirbelströme können aber auch technisch genutzt werden. Bild 106/1 zeigt das Modell einer **Wirbelstrombremse**.

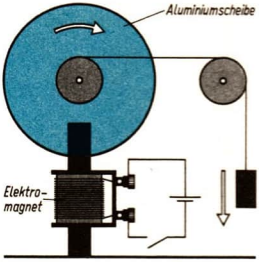
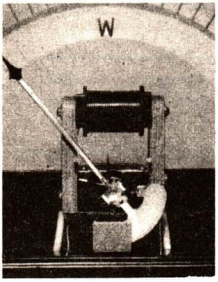


Bild 106/1

50 ▼ Die Aluminiumscheibe wird durch den absinkenden Körper in Bewegung gesetzt. Wird der Stromkreis des Elektromagneten geschlossen, wird die Scheibe abgebremst. Die Bremskraft kann mit Hilfe des Schiebewiderstandes verändert werden.

■ Bei empfindlichen Waagen und elektrischen Meßgeräten wird eine Wirbelstromdämpfung benutzt (Bild 106/2).



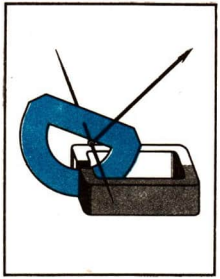


Bild 106/2 Wirbelstromdämpfung bei einem Meßinstrument. Eine Aluminiumscheibe befindet sich zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten. Auf diese Weise wird erreicht, daß bei der Messung nicht eine länger dauernde Schwingung stattfindet.

Michael Faraday

Durch die zuerst in England einsetzende industrielle Revolution erhielt an der Wende zum 19. Jahrhundert die Naturwissenschaft neue Aufgaben bei der Erforschung der Rohstoffe und Arbeitsmittel für die industrielle Produktion. In dieser Zeit trugen Söhne der englischen Arbeiterklasse entscheidend zum wissenschaftlichen und technischen Fortschritt in der Welt bei.
James Watt war Sohn eines Zimmermanns, Stephensons Vater war Grubenarbeiter, und Michael Faraday ent-

Bild 107/1 Michael Faraday (1791 bis 1867).

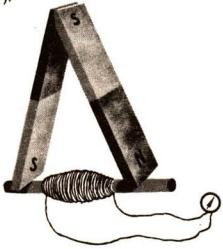


Bild 107/2 Induktionsversuch nach Faraday

stammte der Familie eines Grobschmiedes. In der damaligen Volksschule lernte er kaum mehr als Lesen und Schreiben. Durch die Hilfe seines Bruders konnte er mit 13 Jahren eine Abendschule besuchen. Als Buchbinderlehrling begann er sich mit physikalischen und chemischen Fragen zu beschäftigen, so daß er bei dem berühmten Chemiker Davy Assistent wurde. 1824 wählte ihn die Königliche Akademie zum Mitglied.

Faraday war ein hervorragender Experimentator. In seinen Tagebüchern sind mit großer Gewissenhaftigkeit über 16000 Versuche verzeichnet. Faradays Entdeckungen berührten fast alle Gebiete der Physik. Mit genialer Einfühlung in die Naturzusammenhänge prägte er den Feldbegriff und begründete die Modellvorstellung der elektrischen und magnetischen Feldlinien. So schuf er sich selbst das Begriffssystem zur Formulierung des Induktionsgesetzes. Seine Persönlichkeit, seine exakte Arbeitsweise und sein auf Einheit der Naturerkenntnis gerichteter Sinn werden für Naturforscher stets vorbildlich sein. Die von ihm aufgedeckte Wechselwirkung zwischen elektrischen und magnetischen Vorgängen wurde die Grundlage für die allgemeine Elektrifizierung und auch für die weltumspannende Nachrichtenübermittlung durch elektromagnetische Wellen. So hat Faradays Lebenswerk größte Bedeutung für die Entwicklung der Gesellschaft erlangt.

Übersicht zu den elektrischen und magnetischen Feldern

	konstantes elektrisches Feld	konstantes magnetisches Feld
verbunden mit	ruhenden elektrischen Ladungen	Dauermagneten oder elektrischen Strömen
nachweisbar durch	Kraft auf geladene Probekörper	Kraft auf Probekörper aus Eisen, auf Dauermagnete und stromführende Leiter
Feldlinien	Modell zur Darstellung des Feldes	Modell zur Darstellung des Feldes
parallele Feldlinien	im Plattenkondensator	in langen Spulen
Anwendung	Plattenkondensator Wickelkondensator Drehkondensator	Elektromagnet Relais Klingel Drehspulinstrument Elektromotor

Elektrische Leitungsvorgänge

In Industrie und Wirtschaft sind moderne Rechenautomaten zur Lösung wissenschaftlich-technischer und ökonomischer Aufgaben eingesetzt. In diesen Rechenautomaten befinden sich sehr viele Bauelemente, deren Wirkungsweise auf elektrische Leitungsvorgänge in festen Körpern, in Gasen und im Vakuum beruht.

Aufbau der Stoffe

Zur Untersuchung der elektrischen Leitungsvorgänge wollen wir unsere Kenntnisse über den Aufbau der Stoffe wiederholen (↗ Lehrbuch Physik Klasse 6, S. 40, Physik Klasse 8, S. 6, und Chemie Klasse 8, S. 9).

Atom und Ion. Jedes Atom besteht aus einem **Atomkern** und einer **Atomhülle**. Der Atomkern enthält elektrisch positiv geladene Teilchen, die *Protonen*, und elektrisch neutrale Teilchen, die *Neutronen*. Die Atomhülle besteht aus elektrisch negativ geladenen Teilchen, den *Elektronen* (Bild 108/2).

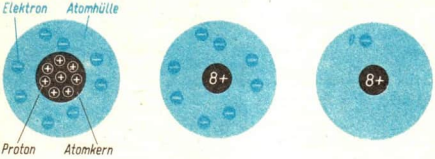
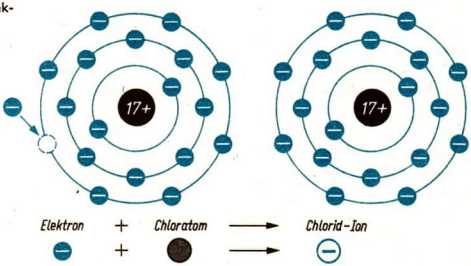


Bild 108/2 Modelle des Sauerstoffatoms in ebener Darstellung. Die Angaben sind in den drei Modellen verschieden stark vereinfacht.

In einem Atom sind die Beträge der elektrischen Ladungen von Protonen und Elektronen gleich. Die Anzahl der Elektronen in der Atomhülle ist gleich der Anzahl der Protonen im Atomkern. Jedes Elektron hält sich mit größter Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten kugelförmigen Raum um den Atomkern auf. Diesem Aufenthaltsraum des Elektrons in der Atomhülle entspricht seine Energie. Elektronen mit annähernd gleicher Energie werden zu Energieniveaus zusammengefaßt. Die Räume des

wahrscheinlichen Aufenthaltes der Elektronen mit annähernd gleicher Energie und die ihnen entsprechenden Energieniveaus werden als Elektronenschalen oder Schalen der Atomhülle bezeichnet.
Für die elektrischen Leitungsvorgänge kommen hauptsächlich die Elektronen der Außenschale, die Außenelektronen, in Frage.
Durch Energiezufuhr ist es möglich, ein Elektron oder auch mehrere Elektronen der Außenschale vom Atom zu lösen. Aus dem vorher elektrisch neutralen Atom wird damit ein elektrisch **positiv geladenes Ion**. Ebenso ist es möglich, daß ein Atom in seine Außenschale Elektronen aufnimmt. Dadurch entsteht ein elektrisch **negativ geladenes Ion** (Bild 109/1).

Bild 109/1 Ionenbildung durch Elektronenaufnahme beim Chlor



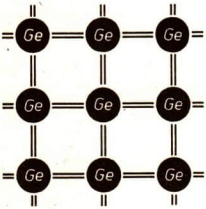


Bild 109/2 Atombindung beim Germanium

Atombindung. Von Atombindung spricht man, wenn ein oder mehrere Außenelektronen eines Atoms mit einem oder mit mehreren Außenelektronen umliegender Atome gemeinsame *Elektronenpaare* bilden.

Germaniumatome besitzen vier Außenelektronen. Jedes Germaniumatom hat mit den Germaniumatomen, die in unmittelbarer Nachbarschaft liegen, je ein Elektronenpaar gemeinsam (Bild 109/2). Es enthält somit jedes Atom acht Elektronen in seiner Außenschale.

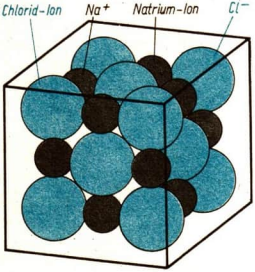


Bild 109/3 Ionenbeziehung beim Natriumchlorid

Ionenbeziehung. Sie beruht auf der elektrischen Anziehung von elektrisch entgegengesetzt geladenen Ionen.

Natriumchlorid ist aus elektrisch negativ geladenen Chlorid-Ionen und elektrisch positiv geladenen Natrium-Ionen aufgebaut (Bild 109/3). Die Ionisierung von neutralen Chlor- bzw. Natriumatomen kommt zustande, indem ein Chloratom, das bekanntlich sieben Elektronen auf der Außenschale besitzt, das eine Elektron, das sich auf der äußeren Schale des Na-

triumatoms befindet, aufnimmt. Das Natriumatom wird damit zum positiven Natrium-Ion, das Chloratom zum negativen Chlorid-Ion.

Metallbindung. Im Metall sind die Atome regelmäßig angeordnet.
Die Metallatome im Metallgitter geben leicht ihre Außenelektronen ab, die sich als freie Elektronen (Leitungselektronen) im Gitter bewegen. Die Atome im Gitter werden dabei zu positiven Ionen. Zwischen den positiven Metallionen und den sie umgebenden freien Elektronen bestehen elektrische Anziehungskräfte (Bild 110/1).

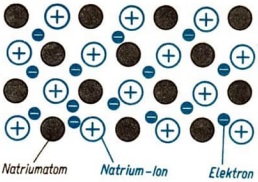


Bild 110/1 Metallbindung beim Natrium

Elektrische Ladung, elektrisches Feld. Körper, die gleiche Anzahl von positiv und negativ geladenen Teilchen tragen, wirken nach außen elektrisch neutral. Durch bestimmte Verfahren (Ladungstrennung, ↗ S. 68/69) können neutralen Körpern Elektronen entzogen oder zugeführt werden. Sie weisen dann einen **Elektronenmangel** bzw. einen **Elektronenüberschuß** auf und wirken elektrisch positiv bzw. elektrisch negativ.
Um jeden elektrisch geladenen Körper existiert ein **elektrisches Feld** (Bild 110/2). Das elektrische Feld ist Träger elektrischer Energie. Befinden sich in einem elektrischen Feld Ladungsträger (Elektronen, Ionen), so wird Feldenergie auf die Ladungsträger übertragen, die Ladungsträger werden beschleunigt. Durch die Bewegung der Ladungsträger kann ein **Ladungsausgleich** zwischen unterschiedlich geladenen Körpern erfolgen.

Bild 110/2 Modellhafte Darstellung des elektrischen Feldes eines Plattenkondensators

Nachweis der Leitung des elektrischen Stromes

Die folgenden Versuche sind Beispiele für die Leitung des elektrischen Stromes *in festen Körpern* (Metallen, Halbleitern), *in Flüssigkeiten* (wäßrigen Lösungen von Säuren, Basen, Salzen) und *in Gasen* (z. B. Luft). Schließlich ist auch eine Leitung des elektrischen Stromes *im Vakuum*[1] möglich.
Es soll durch Analysieren und Vergleichen festgestellt werden, welche Gemeinsamkeiten zwischen den Leitungsvorgängen in den Körpern verschiedener Aggregatzustände bestehen.

51 ▼ In einen Stromkreis, der aus einer Gleichspannungsquelle, einem Schalter und einem Drahtwiderstand besteht, werden ein Spannungsmesser und ein Strommesser geschaltet (Bild 110/3). Nach dem Schließen des Schalters fließt ein elektrischer Strom.

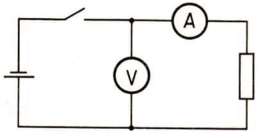


Bild 110/3 Leitung in festen Körpern

[1] Ein Vakuum ist ein annähernd gasleerer Raum.

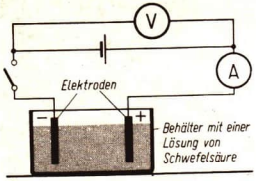


Bild 111/1 Leitung in flüssigen Körpern

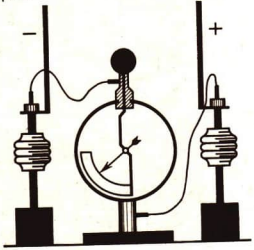


Bild 111/2 Leitung in Gasen

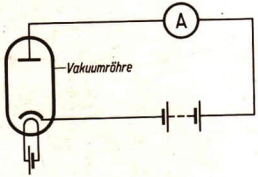


Bild 111/3 Leitung im Vakuum

Ersetzt man den Drahtwiderstand durch einen Halbleiterwiderstand, so fließt bei geeigneter Polung ebenfalls ein elektrischer Strom.

52 ▼ Man ersetzt den Drahtwiderstand durch einen Behälter mit einer Lösung von Schwefelsäure, in die zwei Elektroden ragen (Bild 111/1). Der Schalter wird geschlossen und die Spannung stufenweise erhöht, bis der Strommesser durch einen Ausschlag das Fließen eines elektrischen Stromes anzeigt.

53 ▼ Verbindet man zwei gegenüberstehende Kondensatorplatten mit einem Elektroskop (Bild 111/2) und lädt die Platten elektrisch auf, dann zeigt das Elektroskop einen Ausschlag. Der Ausschlag bleibt längere Zeit erhalten. Bringt man zwischen die Kondensatorplatten eine Flamme, dann geht der Ausschlag schnell zurück. Es erfolgt ein Ladungsausgleich zwischen den Platten. Die heiße Luft leitet den elektrischen Strom.

54 ▼ Der Versuch nach Bild 111/3 wird aufgebaut. Nach Einschalten der Spannungsquellen ist festzustellen, daß durch die Vakuumröhre ein elektrischer Strom fließt.

Es ist festzustellen, daß sowohl feste, flüssige und gasförmige Stoffe als auch das Vakuum den elektrischen Strom leiten können. Trotz der unterschiedlichen Stoffe und Versuchsanordnungen kann man alle gezeigten Leitungsvorgänge mit einem allgemeinen Modell beschreiben.

Das allgemeine Modell des elektrischen Leitungsvorganges

Mit den Kenntnissen über das elektrische Feld und den elektrischen Strom können wir ein Modell entwickeln, mit dessen Hilfe wir die Vorgänge in den verschiedenen Stoffen und im Vakuum erklären können. Wir nennen es deshalb das **allgemeine Modell** des elektrischen Leitungsvorganges.

1 Voraussetzung für einen elektrischen Leitungsvorgang sind
a) freibewegliche Ladungsträger (Elektronen, Ionen) und
b) ein elektrisches Feld im zu untersuchenden Raum.

Die Ladungsträger bewegen sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes. So bewegen sich beispielsweise die negativ geladenen Elektronen zum positiven Pol eines Kondensators (Bild 111/2). Dabei entziehen sie dem elektrischen Feld Energie, die in kinetische Energie umgewandelt wird.
Für das allgemeine Modell kann demnach eine zweite Aussage getroffen werden:

❷ Bei einem elektrischen Leitungsvorgang wird Feldenergie auf die Ladungsträger übertragen. Die Ladungsträger werden beschleunigt.

In Klasse 8 wurde der elektrische Strom als die gerichtete Bewegung der Elektronen erkannt. Da es aber neben den Elektronen noch andere negative Ladungsträger (negative Ionen) und auch positive Ladungsträger (positive Ionen) gibt, müssen die Aussagen auf diese Ladungsträger erweitert werden. Für das allgemeine Modell bedeutet das:

❸ Bei einem elektrischen Leitungsvorgang entsteht ein elektrischer Strom als gerichtete Bewegung positiver und negativer Ladungsträger.	$I = I_+ + I_-$

Es soll nun das allgemeine Modell auf Leitungsvorgänge in den verschiedenen Stoffen und im Vakuum angewendet werden.

Dabei werden die Leitungsvorgänge im *Halbleiter* wegen der besonderen Bedeutung nicht zusammen mit den Metallen bei den festen Körpern, sondern *erst nach* den Leitungsvorgängen im *Vakuum* behandelt.

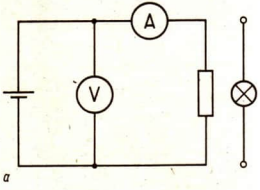
Leitungsvorgänge in Metallen

Die frei beweglichen Elektronen der Metalle vollführen im Metallgitter eine ungeordnete Wärmebewegung. Legt man eine Spannung an den Leiter, dann entsteht ein elektrisches Feld, das eine Kraft auf die Elektronen ausübt. Dadurch kommt zur ungeordneten Bewegung eine

gerichtete Bewegung hinzu (Punkte 1, 2 und 3 des allgemeinen Modells).

> Ladungsträger des elektrischen Stromes in Metallen sind die Elektronen.

Positive Ladungsträger sind nicht beteiligt ($I_+ = 0$).



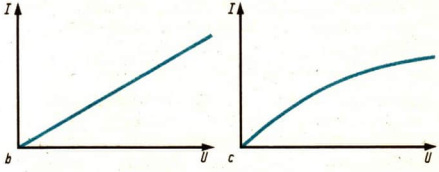


Bild 113/1 a) Schaltbild zur Aufnahme der *I-U*-Kennlinie eines Drahtwiderstandes und einer Glühlampe.
b) Diagramm für den Drahtwiderstand. Der Drahtwiderstand genügt dem Ohmschen Gesetz $I \sim U$. Er gibt die Wärmeenergie über seine große Oberfläche schnell an die Umgebung ab, so daß seine Temperatur T nicht wesentlich ansteigt.
c) Diagramm für die Glühlampe. Der Glühfaden der Glühlampe erwärmt sich beim Fließen des Stromes sehr stark. Die Wärmeenergie wird nicht so schnell an die Umgebung abgegeben wie beim Drahtwiderstand. Die Temperatur des Glühfadens steigt weiter an, sein Widerstand wird mit zunehmender Temperatur größer. Dieser Leiter genügt nicht mehr dem Ohmschen Gesetz, da T nicht konstant ist.

Die Elektronen „stoßen" bei ihrer Bewegung mit den Gitterbausteinen „zusammen" (treten in Wechselwirkung). Bei diesen „Zusammenstößen" geben die Elektronen einen Teil ihrer kinetischen Energie an die Gitterbausteine ab (Überwindung eines Widerstandes). Das Metall erwärmt sich (Stromwärme). Durch die Energiezufuhr werden die Schwingungsweiten der um ihre Ruhelage schwingenden Gitterbausteine größer. Mit zunehmenden Schwingungsweiten kommt es aber zu häufigeren „Zusammenstößen" zwischen Elektronen und Gitterbausteinen. Der elektrische Widerstand wird größer (Bild 113/1).

> Der elektrische Widerstand von Metallen wird bei zunehmender Temperatur größer.

Das Ohmsche Gesetz ($I \sim U$) gilt nur für den Fall, daß die Temperatur konstant ist.

Leitungsvorgänge in wäßrigen Lösungen

Es sollen nun die Leitungsvorgänge in wäßrigen Lösungen mit dem allgemeinen Modell beschrieben werden. Bei genauer Beobachtung des Versuchs 52 stellt man fest, daß an den Elektroden eine Gasentwicklung einsetzt. Eine nähere Untersuchung ergibt, daß sich an der positiven Elektrode (Anode)[1] Sauerstoff abscheidet und an der negativen Elektrode (Katode)[2] Wasserstoff.

[1] Anode (griech.): Hinaufweg [2] Katode (griech.): Hinabweg

55 ▼ **Verwendet man statt der Schwefelsäurelösung eine Kupfersulfatlösung und Kupferelektroden, dann stellt man fest, daß sich bei angelegter Spannung an der Katode metallisches Kupfer abscheidet. Die gleiche Kupfermenge geht an der Anode in Lösung (Bild 114/1).**

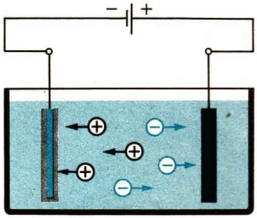


Bild 114/1 An eine Salzlösung, aus deren Metall ein Überzug auf einen elektrisch leitenden Gegenstand hergestellt werden soll, wird eine Gleichspannung gelegt. Der Gegenstand wird als Katode in den Stromkreis gebracht. Der metallische Überzug haftet fest am Gegenstand und kann sehr dünn und gleichmäßig hergestellt werden.

Aus den angeführten Beispielen und weiteren Versuchen erkennt man:

> **Die elektrische Leitung in Flüssigkeiten ist mit einer Abscheidung von Stoffen an den Elektroden verbunden.**

Kupfersulfat besteht aus Cu-Ionen und SO_4-Ionen. Die SO_4-Ionen tragen (gegenüber neutralen SO_4-Molekülen) zwei zusätzliche Elektronen, die sie von den Cu-Atomen erhalten haben. Die SO_4-Ionen sind deshalb negative Ionen, und die Cu-Atome sind positive Cu-Ionen geworden. Löst man die $CuSO_4$-Kristalle in Wasser, dann gelangen Wassermoleküle zwischen die (SO_4^{2-})-Ionen und die (Cu^{2+})-Ionen. Die Ionen werden dabei voneinander getrennt.
Man nennt einen solchen Vorgang **Dissoziation.** Die Ionen sind in der Lösung frei beweglich (Punkt 1 des allgemeinen Modells).
Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes, das eine Kraft auf die Ionen ausübt, werden die Ionen beschleunigt (Punkt 2 des allgemeinen Modells). Die positiven Ionen wandern zur Katode. Dort nehmen sie Elektronen auf. Die negativen (SO_4^{2-})-Ionen wandern zur Anode und geben dort ihre überschüssigen Elektronen ab (Punkt 3 des allgemeinen Modells).
Ähnliche Vorgänge finden auch in wäßrigen Lösungen anderer Salze sowie in wäßrigen Lösungen von Säuren und Basen statt.

> ▶ **Ladungsträger des elektrischen Stromes in wäßrigen Lösungen von Säuren, Basen und Salzen sind die positiven Ionen, die sich zur Katode bewegen, und die negativen Ionen, die sich zur Anode bewegen.**

Nimmt man die *I-U*-Kennlinie einer elektrolytischen Lösung mit Hilfe einer Schaltung nach Bild 111/1 auf, dann stellt man fest, daß unter besonderen Bedingungen $I \sim U$ ist. Das Ohmsche Gesetz hat auch für elektrisch leitende Flüssigkeiten Gültigkeit.

Leitungsvorgänge in Gasen

Bei der Leitung in Metallen sind Elektronen die Ladungsträger, bei der Leitung in Flüssigkeiten sind es Ionen. Es gilt festzustellen, welche Ladungsträger in Gasen eine Leitung ermöglichen.
Es wird dazu der Versuch 53 erweitert.

56 ▼

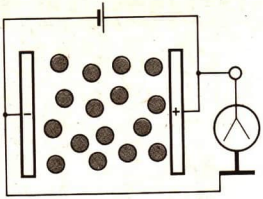
Zwei Kondensatorplatten werden mit einem Elektroskop verbunden und elektrisch aufgeladen (Bild 115/1 a). Die Ladung bleibt längere Zeit erhalten (Bild 115/1 b). Die trockene Luft wirkt offensichtlich als Isolator. Setzt man die Luft zwischen den Platten einer Wärmestrahlung, Röntgenstrahlung oder radioaktiven Strahlung aus (Bild 115/1 c), geht der Ausschlag des Elektroskops schnell zurück (Bild 115/1 e). Offensichtlich ist die Luft durch die Erwärmung bzw. Bestrahlung elektrisch leitend geworden.

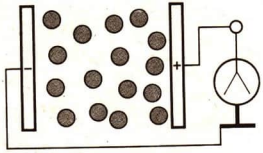
Genaue Untersuchungen haben ergeben, daß Ionen, die aus den Luftmolekülen entstanden sind, die Leitung verursachen.
Von den vorher neutralen Atomen oder Molekülen der Luft oder eines beliebigen Gases werden durch Energiezufuhr von außen Elektronen abgetrennt, die sich an andere neutrale Atome oder Moleküle anlagern. Es entstehen Ionen (Bild 115/1 c). Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes führen sie den Ladungstransport aus (Bild 115/1 d, Punkte 1 und 2 des allgemeinen Modells). Die negativen Ionen wandern zur positiven Platte, die positiven Ionen zur negativen Platte des Kondensators. Damit bilden diese Ionen den elektrischen Strom (Punkt 3 des allgemeinen Modells).

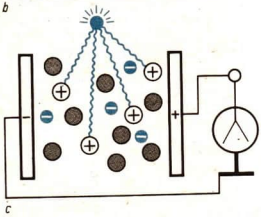
> In Gasen kommt eine Leitung zustande, wenn durch äußere Einflüsse im Entladungsraum positive und negative Ladungsträger erzeugt werden. ◄

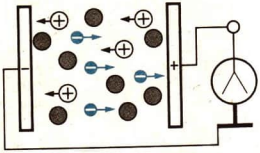
Mit empfindlichen Meßgeräten kann man feststellen, daß eine geringe Leitfähigkeit der Luft immer vorhanden ist. Das ist zurückzuführen auf den Einfluß der kosmischen Strahlung, der natürlichen Radioaktivität der Erde und anderer Prozesse, die ständig einen Teil der Gasmoleküle ionisieren. Deshalb entlädt sich der im Versuch gezeigte Kondensator.

Durch die zuletzt genannten Einflüsse sind immer frei bewegliche Ladungsträger vorhanden, die eine Leitung ermöglichen. Unter bestimmten Umständen kann jedoch









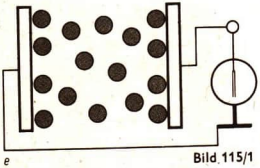


Bild 115/1

die Leitfähigkeit stark zunehmen. Im folgenden Versuch soll dies gezeigt werden.

57 ▼ Eine Entladungsröhre mit zwei plattenförmigen Elektroden ist mit einem Gas, dessen Druck nur einige Torr beträgt, gefüllt (Bild 116/1). Die Stromstärke wird in Abhängigkeit von der Spannung untersucht.

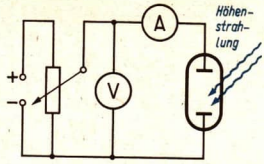


Bild 116/1

Die Stromstärke bleibt nach anfänglichem Anstieg (Bild 116/2) zunächst konstant, obwohl die Spannung ständig zunimmt.
Steigert man die Spannung weiter, dann steigt die Stromstärke an.
Wie ist dieser Vorgang zu erklären? Durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden wird auf die Ladungsträger eine Kraft ausgeübt, die eine Beschleunigung der geladenen Teilchen hervorruft (Bild 116/2, Teil O bis A). Die von außen her erzeugten Ladungsträger werden proportional zur Spannung beschleunigt, so daß immer mehr auf die Elektroden auftreffen. Von einer bestimmten Spannung an werden *alle* von außen her erzeugten Ladungsträger zu den Elektroden geführt, so daß eine Erhöhung der Spannung keine weitere Zunahme der Stromstärke bewirkt (Bild 116/2, Teil A bis B). Schließlich wird die angelegte Spannung so hoch, daß die Ladungsträger eine so große kinetische Energie erhalten, die sie befähigt, beim Zusammenstoß mit neutralen Atomen oder Molekülen aus diesen weitere Elektronen herauszuschlagen. Man nennt diesen Vorgang **Stoßionisation.** Die herausgeschlagenen Elektronen lösen dann dieselben Vorgänge aus (Bild 116/3). Der Vorgang wiederholt sich längs des Weges zur Elektrode viele Male.

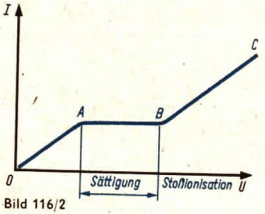


Bild 116/2

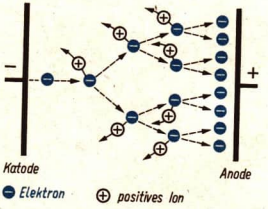


Bild 116/3 Schematische Darstellung der Stoßionisation. Voraussetzung für die Stoßionisation ist, daß die Elektronen von Stoß zu Stoß einen Weg zurücklegen, der groß genug ist, um die kinetische Energie aufzunehmen, die zur Ionisation eines Atoms oder Moleküls ausreicht. Das ist gewährleistet, wenn man den Druck des Gases in der Entladungsröhre verringert, das heißt, wenn man die Anzahl der Atome bzw. Moleküle in der Röhre verringert.

> Durch Stoßionisation nimmt die Anzahl der Ladungsträger in einem Gas zu.

Leitung im Vakuum

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, unter welchen Bedingungen Gase den elektrischen Strom leiten können. Jetzt soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen im Vakuum eine elektrische Leitung möglich ist. Das Vakuum ist ein Isolator. Ein Vakuum erreicht man durch Auspumpen z. B. einer Entladungsröhre. Es bleiben dabei jedoch immer Gasmoleküle oder -atome zurück.

Die dadurch mögliche elektrische Leitung ist jedoch so klein, daß sie bei unseren weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden kann.
Will man eine Leitfähigkeit im Vakuum erreichen, müssen also zusätzlich Ladungsträger in das Vakuum gebracht werden (Punkt 1 des allgemeinen Modells).

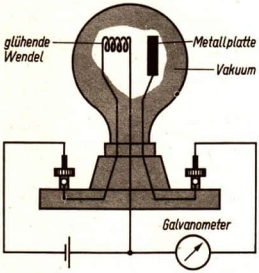


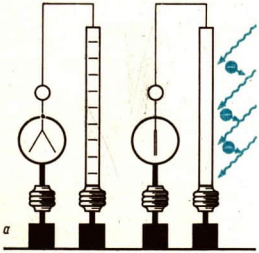
Bild 117/1 Glühlampe nach Edison mit heißer und kalter Elektrode.

Glühemission. Der folgende Versuch zeigt eine Möglichkeit, Ladungsträger in ein Vakuum zu bringen.

58

In eine Vakuumröhre werden zwei Elektroden eingeschmolzen, von denen eine durch Zufuhr von Energie zum Glühen gebracht wird (Bild 117/1).
Bei angelegter Spannung zeigt ein Galvanometer, das zwischen den positiven Pol der Spannungsquelle und der Metallplatte geschaltet ist, das Fließen eines Stromes an.

Aus dem glühenden Draht werden Elektronen emittiert[1]. Diese sind die Ladungsträger im Vakuum.
Erhöht man die Temperatur eines metallischen Leiters, dann vergrößern sich die Schwingungsweiten der um ihre Ruhelage schwingenden Gitterbausteine. Die freien Elektronen nehmen an dieser Wärmebewegung teil, d. h., sie bekommen Stöße aus verschiedenen Richtungen. Dabei erhalten einige Elektronen, die sich an der Oberfläche befinden, eine so große kinetische Energie, daß sie aus dem Metall heraustreten.



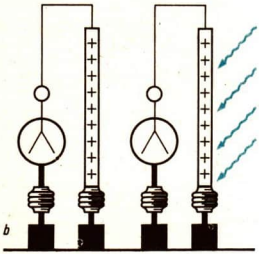


Bild 117/2 Experiment zur Fotoemission.

> Das Heraustreten von Elektronen aus der Oberfläche glühender Metallkörper auf Grund der zugeführten Wärmeenergie heißt Glühemission.

Fotoemission

Ladungsträger können auch in ein Vakuum gebracht werden, wenn ein Metall mit Licht bestrahlt wird.

59

Eine Zink- oder Aluminiumplatte wird isoliert aufgestellt und mit einem Elektroskop verbunden. Lädt man die Platte negativ auf und bestrahlt sie mit ultraviolettem Licht oder Röntgenstrahlen, so verliert sie ihre Ladung (Bild 117/2a). Ist die Platte positiv geladen, so bleibt die Ladung trotz der Bestrahlung erhalten (Bild 117/2b).

[1] emittieren (lat.): aussenden

Durch das Licht werden demnach nur Elektronen aus der Platte ausgelöst. Stellt man der negativ geladenen Platte eine positiv geladene gegenüber, dann kann zwischen beiden Platten ein Strom fließen, bis Ladungsausgleich eingetreten ist.

▶ Das Heraustreten von Elektronen aus der Oberfläche von Metallen durch die Energie des auffallenden Lichtes nennt man Fotoemission.

Die Anzahl der ausgelösten Elektronen ist abhängig von der Menge des Lichtes, die auf die Metalloberfläche fällt.
Die Fotoemission erfolgt in Gasen sowie auch im Vakuum.

Leitung in Halbleitern

Halbleiter sind Stoffe, deren elektrische Leitungseigenschaften zwischen denen der Metalle und der Isolatoren liegen. Im Halbleiter sind alle Elektronen an die Atome gebunden. Nur unter bestimmten Umständen ist es möglich, Elektronen vom Atom zu lösen, so daß sie als Leitungselektronen zur Verfügung stehen.

60
▼ Durch Versuche läßt sich nachweisen, daß sich Germanium bei tiefen Temperaturen wie ein Isolator verhält. Bereits bei Zimmertemperatur ist eine Leitfähigkeit vorhanden, die bei weiterer Erwärmung noch zunimmt. Weiterhin steigt die Leitfähigkeit, wenn man das Germanium belichtet oder einem elektrischen Feld großer Feldstärke aussetzt.

Diese Vorgänge sollen am Beispiel des vierwertigen Germaniums erklärt werden. Es wird dabei ein Germaniumeinkristall höchster Reinheit angenommen.

Die Eigenleitung. Die vierwertigen Germaniumatome besitzen im Kristall eine *Atombindung* (Bild 109/2).

● *Wodurch wird bewirkt, daß jedes Atom eine Achterschale besitzt?*

Alle Elektronen sind am Kristallaufbau beteiligt. Eine Leitung kann nur erfolgen, wenn frei bewegliche Ladungsträger vorhanden sind (Punkt 1 des allgemeinen Modells). Dazu ist eine bestimmte Energie notwendig, die von außen zugeführt werden muß. Diese Energiezufuhr kann erfolgen durch *Erwärmung, Belichtung oder Anlegen eines elektrischen Feldes.*

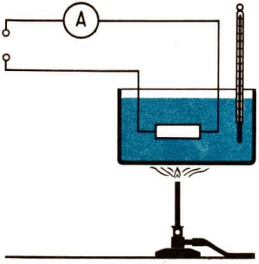


Bild 119/1 Ein in einen Stromkreis geschalteter Halbleiterwiderstand wird im Wasserbad von Zimmertemperatur auf 100 °C erwärmt. Der durch den Halbleiter fließende Strom wird in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Der Widerstand verkleinert sich bei einer Zunahme der Temperatur. Eine Temperaturerhöhung vergrößert die Anzahl der Ladungsträger, so daß die Leitfähigkeit des Halbleiters zunimmt.

Bei Zimmertemperatur nehmen die Elektronen an den Wärmebewegungen im Kristallverband teil. Dadurch kommt es, daß manche Elektronen eine so große Energie besitzen, daß sie aus ihrer Bindung gelöst sind und für die elektrische Leitung als Ladungsträger zur Verfügung stehen. Wird der Kristall weiter erwärmt (Bild 119/1), lösen sich weitere Elektronen aus ihren Bindungen. Legt man dann noch eine elektrische Spannung an (Punkt 2 des allgemeinen Modells), so fließt ein elektrischer Strom. Das wurde bereits mit dem Versuch 51 gezeigt.

Warum werden durch das Anlegen einer elektrischen Spannung die Bedingungen des Punktes 2 des allgemeinen Modells erfüllt?

Die durch die genannten Einflüsse zustande gekommene Leitung nennt man **Eigenleitung**.

Jedes frei gewordene Elektron hinterläßt an der Stelle, an der es ursprünglich saß, eine Fehlstelle. Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes rückt ein in der Nähe befindliches Elektron in diese Lücke ein, wobei dieses Elektron eine neue

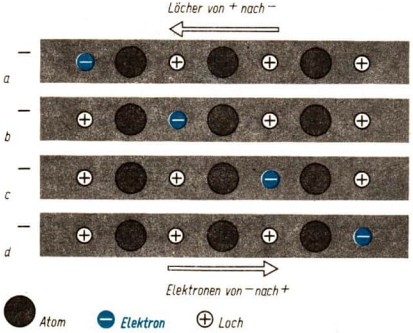


Bild 119/2 Eigenleitung bei Halbleitern (zeitlicher Ablauf). Die Elektronen bewegen sich, indem sie von Loch zu Loch rücken, zur positiven Elektrode. Dadurch entsteht gleichzeitig eine Löcherbewegung zur negativen Elektrode hin.

Fehlstelle hinterläßt, die ihrerseits von einem weiteren Elektron ausgefüllt werden kann usw. (Bild 119/2). Wenn sich also Elektronen von links nach rechts bewegen, wandert eine genau gleich große Anzahl von Fehlstellen von rechts nach links. Diese Fehlstellen bezeichnet man auch als *Defektelektronen* oder kurz als *Löcher*; sie verhalten sich so, als ob es positive Ladungsträger wären. Das ist natürlich nicht wörtlich zu nehmen, da sich die Fehlstellen selbst gar nicht fortbewegen können.

Bei der Eigenleitung übernehmen Elektronen und Defektelektronen (Löcher) die elektrische Leitung.

Die Störstellenleitung. Einen anderen Leitungsvorgang weisen verunreinigte Halbleiter auf. Sie werden heute in der Weise hergestellt, daß man reinste Halbleiter mit genau berechneten kleinen Mengen eines bestimmten anderen Elements verunreinigt, man sagt *dotiert*. Dadurch kann man die elektrischen Eigenschaften des Halbleiters in gewünschter Weise verändern. Wir greifen zur Erklärung des Leitungsvorganges ein Beispiel heraus, die Dotierung von Germanium durch Arsen. Das fünfwertige Arsen bildet im Germanium *Störstellen*. Da jedes Arsenatom ein Elektron aufweist, das vom vierwertigen Germanium nicht gebunden wird, stehen zusätzliche Leitungselektronen für die Störstellenleitung zur Verfügung (Bild 120/1). Da es negative Ladungsträger sind, spricht man von *n-Leitung*.

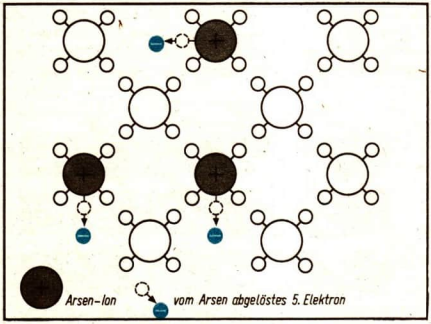


Bild 120/1 Störstellenleitung durch Dotieren von Germanium mit Arsen.

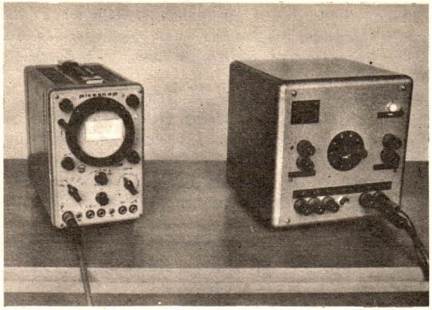
Wird das Germanium andererseits mit geringen Mengen eines dreiwertigen Elements, z. B. Indium, dotiert, so fehlt an den Störstellen jeweils ein Elektron. Die Folge ist ein Überschuß an Defektelektronen, d. h. an positiven „Löchern". Der Kristall ist *p-leitend*.

Durch den Einbau von Fremdatomen werden in Halbleitern zusätzliche frei bewegliche Ladungsträger erzeugt.

Fragen, Aufträge, Versuche, Seite 154, Nr. 180 bis 210

Anwendung elektrischer Leitungsvorgänge

Der Elektronenstrahloszillograf ist ein Meßgerät, das für Untersuchungen in Wissenschaft und Technik wichtig ist. Sein Hauptbestandteil ist eine Elektronenstrahlröhre. Daneben enthält er wichtige Bauelemente wie Vakuumröhren, Halbleiterdioden und Transistoren.



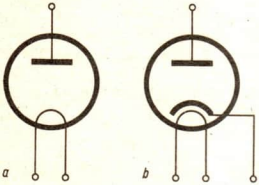


Bild 121/2 Schaltzeichen einer Diode
a) direkt geheizt,
b) indirekt geheizt.

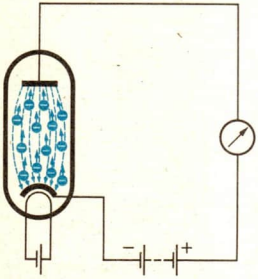


Bild 121/3 Vorgänge in einer Diode bei einer angelegten Spannung zwischen den Elektroden

Die Röhrendiode[1]

Eine der wichtigsten Anwendungen der Glühemission im Vakuum finden wir in den Elektronenröhren. Es sollen hier die Röhrendiode und die Röhrentriode behandelt werden.

Aufbau der Röhrendiode. Die Röhrendiode besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in den zwei Elektroden, die Anode und die Katode, eingeschmolzen sind. Die Katode kann geheizt werden (Bild 121/2). Sie ist mit einer Bariumoxidschicht versehen, aus der die Elektronen in das Vakuum emittieren.

Arbeitsweise der Röhrendiode. Verbindet man die Anode mit dem positiven und die Katode mit dem negativen Pol einer Spannungsquelle, dann kann man mit einem Strommesser feststellen, daß ein Strom fließt.
Durch die an Katode und Anode gelegte Spannung wird ein elektrisches Feld erzeugt. Das elektrische Feld beschleunigt die von der Katode emittierten Elektronen, so daß sich diese zur Anode hin bewegen (Bild 121/3).

Beachten Sie! Die Elektronen bewegen sich vom Minuspol (Katode) zum Pluspol (Anode) der Röhre. Die elektrische Stromrichtung ist dagegen vom Pluspol zum Minuspol festgelegt (↗ S. 76).

[1] Diode: Zweielektrodenröhre

Polt man die Anschlüsse der Spannungsquelle um, so daß an die Katode der positive und an die Anode der negative Pol zu liegen kommt, dann fließt kein Strom durch die Röhre (Bild 122/1).
Wie ist diese Erscheinung zu erklären?
Die aus der Katode austretenden Elektronen werden bei dieser Polung nicht zur Anode, sondern zur Katode beschleunigt. Die um die Katode herum gebildete Raumladungswolke aus Elektronen (Bild 122/2) verhindert ein weiteres Austreten von Elektronen. Es fließt kein Strom.

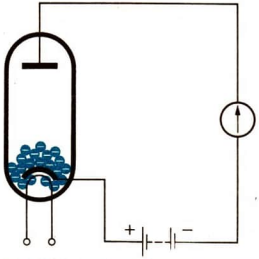


Bild 122/1 Diode in Sperrichtung gepolt.

> In Elektronenröhren bewegen sich Elektronen nur von der Katode zur Anode.

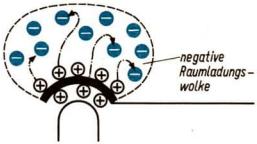
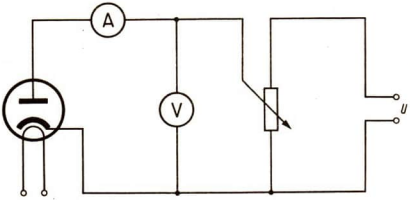


Bild 122/2 Negative Raumladungswolke.

Kennlinie der Röhrendiode. Um die elektrischen Eigenschaften einer Röhrendiode zu beschreiben, bedient man sich einer grafischen Darstellung, in der die aus einem Versuch ermittelten Stromstärken und Spannungen eingetragen werden. Die Kurve, die die einzelnen Punkte verbindet, nennt man die **Diodenkennlinie** oder I_A-U_A-Kennlinie.

61 Die Anodenstromstärke I_A wird in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A gemessen. Die Heizspannung wird dabei auf dem für die Röhre vorgesehenen Wert gehalten.
Die Anodenspannung wird mit Hilfe einer Spannungsteilerschaltung verändert (Bild 122/3). Man beginnt die Messung, indem man zunächst an die Anode den negativen Pol der Spannungsquelle legt. Man verringert dann die negative Anodenspannung, bis $U_A = 0$ ist, und legt danach an die Anode den positiven Pol der Spannungsquelle.



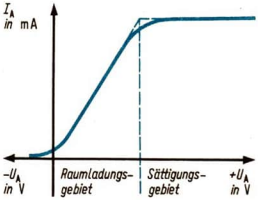


Bild 122/3 Versuchsanordnung zur Aufnahme der Kennlinie einer Diode.
Bild 122/4 Kennlinie einer Diode.

Der funktionelle Zusammenhang $I_A = f(U_A)$ wird durch die Kennlinie der Diode dargestellt (Bild 122/4). Aus dem Verlauf der Kennlinie ersieht man, daß im negativen Bereich bis zur Anodenspannung $U_A = 0$ nur ein Strom

geringer Stärke fließt. Im Gebiet der positiven Anodenspannung unterscheidet man zwei Gebiete, das *Raumladungsgebiet* und das *Sättigungsgebiet*.
Bei kleinen Anodenspannungen gelangen nicht alle von der Katode emittierten Elektronen zur Anode, weil sie von der negativen Raumladungswolke gebremst bzw. zurückgestoßen werden. Wenn durch Erhöhen der Anodenspannung ein stärkeres elektrisches Feld zwischen Anode und Katode erzeugt wird, wird die Raumladungswolke kleiner und kleiner, bis sie ganz verschwindet. Erst dann können alle Elektronen, die die Katode zu emittieren vermag, zur Anode gelangen. Man erreicht einen Grenzwert für die Anodenstromstärke, die Sättigungsstromstärke.

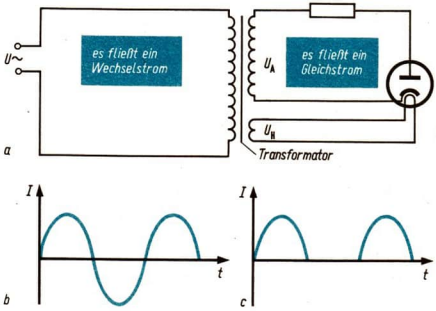


Bild 123/1 Gleichrichterwirkung einer Röhrendiode
a) Schaltplan,
b) vor dem Gleichrichten,
c) nach dem Gleichrichten.

Anwendung der Röhrendiode als Gleichrichter. Die Eigenschaft der Diode, den Strom nur in einer Richtung durchzulassen, benutzt man zur Gleichrichtung von Wechselströmen. Legt man eine Wechselspannung an eine Diode (Bild 123/1 a, b), dann wird jeweils nur der in einer Richtung fließende Anteil durchgelassen, während für den in der anderen Richtung fließenden Anteil die Diode als Sperre wirkt. Es entsteht ein Gleichstrom, dessen Stromstärke zwischen Null und einem Höchstwert schwankt (Bild 123/1 c).

Dioden als Gleichrichter werden in Rundfunk- und Fernsehempfängern, elektrischen Rechenmaschinen und vielen anderen technischen Anlagen verwendet.

Die Röhrentriode

Aufbau der Röhrentriode. Die Triode ist ähnlich aufgebaut wie eine Diode. Sie besitzt jedoch eine dritte Elektrode, die es ermöglicht, den von der Katode zur Anode fließenden Strom zu steuern. Diese Elektrode, die sich zwischen Anode und Katode befindet, nennt man *Gitter* (Bilder 124/1 und 124/2).

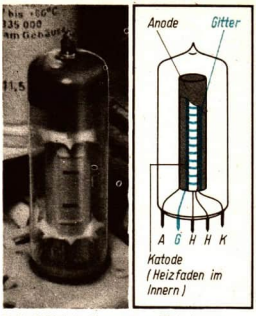


Bild 124/1 Aufbau einer Triode

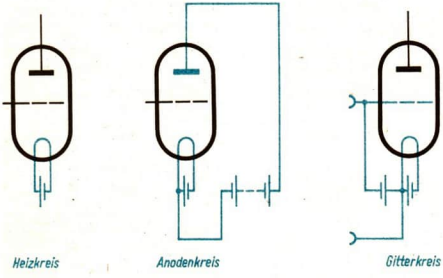


Bild 124/2 Stromkreis einer Triode

Arbeitsweise der Röhrentriode. Die Steuerwirkung des Gitters kann man mit den Gesetzen des elektrischen Feldes erklären. An das Gitter legt man eine gegenüber der Katode negative Spannung. Dadurch bildet sich zwischen Katode und Gitter ein elektrisches Feld, welches dem Feld zwischen Anode und Katode entgegengesetzt gerichtet ist und dieses schwächt.
Dadurch ist es möglich, mit Hilfe einer veränderlichen negativen Gitterspannung die Anodenstromstärke zwischen Null und einem Höchstwert zu steuern.

> Mit Hilfe einer veränderlichen negativen Spannung am Gitter ist es möglich, die Anodenstromstärke zwischen Null und einem Höchstwert zu steuern.

Da bei einer negativen Gitterspannung keine Elektronen auf das Gitter gelangen, fließt kein Gitterstrom. Die Steuerung erfolgt damit *leistungslos*.

Kennlinie der Röhrentriode. Um den Zusammenhang zwischen der Gitterspannung und der Anodenstromstärke festzustellen, nimmt man eine *Kennlinie* auf. Die Abhängigkeit der Anodenstromstärke I_A von der Gitterspannung U_G soll in einem Diagramm dargestellt werden.

Die Gitterspannung und die Anodenspannung werden mit einer Spannungsteilerschaltung eingestellt (Bild 125/1). Die Heizspannung wird auf dem für die Röhre vorgeschriebenen Wert gehalten. Bei einer Meßreihe wird die Anodenspannung konstant gehalten.
Die Anodenstromstärke I_A (Ordinate) erhält man durch stufenweises Ändern der Gitterspannung U_G (Abszisse).

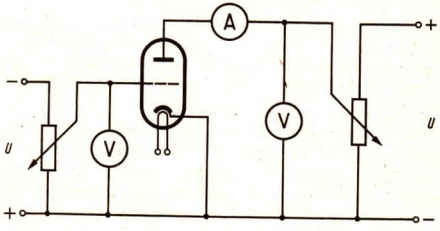


Bild 125/1 Schaltung zur Aufnahme der I_A-U_G-Kennlinie

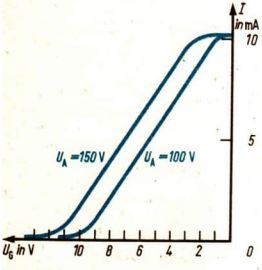


Bild 125/2 I_A-U_G-Kennlinie einer Triode für zwei konstante Anodenspannungen

Verbindet man die erhaltenen Punkte, dann bekommt man eine Kurve, die man I_A-U_G-Kennlinie nennt (Bild 125/2). Wählt man eine größere Anodenspannung, dann ist die Kennlinie in dem rechtwinkligen Koordinatensystem nach links verschoben.

Es gibt noch andere Triodenkennlinien, z. B. U_A-U_G-Kennlinie und I_A-U_A-Kennlinie.

Es ist zu beachten, daß bei der Aufnahme der Kennlinie die nicht betrachteten Größen (zum Beispiel die Anodenspannung U_A) konstant zu halten sind. Dieses wichtige Prinzip bei physikalischen Untersuchungen haben Sie bereits bei vielen Untersuchungen kennengelernt.

Nennen Sie Beispiele dafür!

Anwendung der Röhrentriode. Da man mit einer Triode mit Hilfe von Änderungen der Gitterspannung Änderungen der Anodenstromstärke erreichen kann, wird die Triode vielfach als Steuerröhre eingesetzt, z. B. in der Rundfunk- und Fernsehtechnik, in Verstärkeranlagen und Rechenmaschinen.
Weiterhin benutzt man die Triode auch als kontaktlosen Schalter. Im Gegensatz zu einem elektromagnetischen Schalter (Relais) können mit einem elektronischen Schalter in kürzester Zeit sehr viele Schaltungen ausgeführt werden. Das hat besonders für die Konstruktion von Rechenmaschinen große Bedeutung.

Schülerexperiment E 2, Seite 163

Elektronenstrahlröhren

Elektronenstrahlröhren arbeiten z. B. als Bildröhren in Fernsehempfängern, Fernsehkameras und Oszillografen: Zur Erklärung der Vorgänge muß man das Verhalten von bewegten Elektronen in elektrischen und magnetischen Feldern heranziehen.

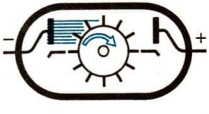
63 ▼ Eine Röhre nach Bild 126/1a wird evakuiert. Bei einem Druck von etwa 1 Pascal bis 0,01 Pascal[1] und bei einer Spannung von einigen Kilovolt ist auf der Glaswand, die der Katode gegenüberliegt, ein grünes Fluoreszenzleuchten zu beobachten.

Diese Erscheinung ist die Folge von Strahlen, die aus Elektronen bestehen und **Elektronenstrahlen** genannt werden. Diese Elektronen treten aus der Katode aus und werden durch das elektrische Feld so stark beschleunigt, daß sie eine große kinetische Energie erhalten.
Die in Bild 126/1 aufgeführten Versuche zeigen einige Eigenschaften der Elektronenstrahlen, insbesondere ihre Ablenkbarkeit durch elektrische und magnetische Felder sowie Beispiele für Energieumwandlungen.

[1] Einheit des Druckes: das Pascal (Pa); 1 Pa = 1 N · m^{-2}

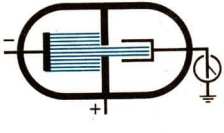
Bild 126/1 Elektronenstrahlen – auch Katodenstrahlen genannt.

1. Elektronenstrahlen treten senkrecht aus der Katodenoberfläche aus und breiten sich geradlinig aus.

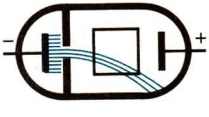


2. Elektronenstrahlen üben eine mechanische Wirkung aus. Durch den Aufprall wird das Flügelrad bewegt.

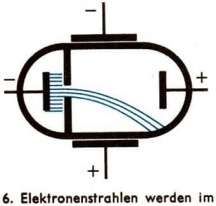
3. Elektronenstrahlen üben beim Aufprall eine Wärmewirkung aus. Die kinetische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt.



4. Elektronenstrahlen laden ein Elektroskop elektrisch negativ auf. Sie bestehen aus negativen Ladungsträgern.



5. Elektronenstrahlen werden im Magnetfeld abgelenkt.



6. Elektronenstrahlen werden im elektrischen Feld zur positiv geladenen Platte hin abgelenkt.

In einem langen Prozeß der Erkenntnisse haben viele Naturforscher dazu beigetragen, die Vorstellungen über Atome und Elektronen herauszubilden und ihre Eigenschaften aufzudecken. Die vielfältigen Ergebnisse der Physik, die immer wieder die bekannt gewordenen Eigenschaften der Elektronen bestätigten, ließen die Annahme über deren Existenz zur Gewißheit werden. Die Entdeckung der Elektronen und ihrer Eigenschaften ist ein Beispiel dafür, wie unseren Sinnen nicht unmittelbar zugängliche Naturobjekte erforscht werden können. Sie ist weiter ein Beispiel dafür, daß das Erkenntnisvermögen der Menschen wächst und daß die Welt erkennbar ist.

Aufbau und Arbeitsweise einer Elektronenstrahlröhre

Die heutigen Elektronenstrahlröhren gehen auf eine Konstruktion des Physikers Ferdinand Braun zurück, mit deren Hilfe es möglich wurde, den Verlauf schneller Stromstärke- und Spannungsschwankungen sichtbar zu machen. Elektronenstrahlröhren arbeiten alle nach dem gleichen Prinzip (Bild 127/1). Die von der Katode (2) emittierten

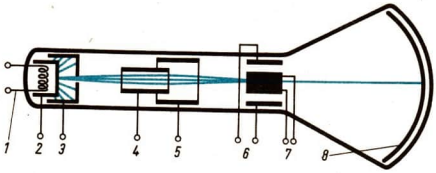


Bild 127/1 Elektronenstrahlröhre: 1 Heizung, 2 Katode, 3 Wehneltzylinder, 4 und 5 Zylinderanoden, 6 und 7 Ablenkplatten, 8 Leuchtschirm mit Leuchtschicht.

Elektronen werden durch ein elektrisches Feld, welches zwischen den zylinderförmigen Anoden (4, 5) und der geheizten Katode besteht, beschleunigt. Infolge der hohen Anodenspannungen erhalten die Elektronen vom elektrischen Feld eine große kinetische Energie. Sie treten durch die Anoden hindurch und gelangen auf einem fast geradlinigen Weg zum Leuchtschirm, auf dem eine Leuchtschicht (8) angeregt wird, Licht auszusenden.
Da der Elektronenstrahl aus gleichartig geladenen Teilchen besteht, läuft er auseinander.

Nennen Sie die Ursache dieser Erscheinung!

Auf dem Leuchtschirm entsteht ein Leuchtfleck. Um diesen sehr klein zu halten, wird der Elektronenstrahl mit Hilfe von zylinderförmigen Anoden, an die man unterschiedliche Spannungen legt, gebündelt. Das elektrische Feld

zwischen den Anoden lenkt die Elektronen so ab, daß sie alle in einem Punkt auf dem Leuchtschirm auftreffen.
Die Helligkeit des Leuchtpunktes wird mit Hilfe einer Lochblende (3) (Wehneltzylinder[1]), die zwischen Katode und Anode liegt, geregelt. An die Lochblende legt man eine Spannung, die gegenüber der Katode veränderlich und negativ ist. Mit dieser Anordnung kann man die Helligkeit steuern, ähnlich wie man mit dem Gitter der Triode die Anodenstromstärke steuern kann.
Um mit Hilfe des Elektronenstrahls auf dem Leuchtschirm Kurven oder Bilder zu zeichnen, wird er auf dem Weg zwischen den Anoden und dem Leuchtschirm durch elektrische (6, 7) oder magnetische Felder abgelenkt.

- *Geben Sie an, wodurch die Ablenkung im Bild 127/1 erfolgt!*

Elektronenstrahloszillograf. Ein Meßgerät, in dem die Elektronenstrahlröhre angewendet wird, ist der Elektronenstrahloszillograf (Bild 121/1). Legt man eine Wechselspannung an das vertikale Plattenpaar (Bild 128/1), so wird der vorher in der Mitte des Bildschirmes sichtbare Leuchtpunkt abwechselnd nach oben und unten abgelenkt und zu einem senkrechten Strich auseinandergezogen (Bild 128/2a). Aus diesem Strich kann man jedoch noch keine Einzelheiten über den zeitlichen Verlauf der angelegten Wechselspannung ablesen. Das ist erst dann möglich, wenn man den Strahl gleichzeitig zeitlich periodisch in horizontaler Richtung ablenkt. Diese zusätzliche Ablenkung wird durch eine Kippspannung hervorgerufen, deren Betrag langsam linear von Null bis zu einem Höchstwert ansteigt und dann schlagartig wieder auf Null absinkt. Beim Anstieg bewegt sich der Leuchtpunkt gleichförmig von einer Seite des Bildschirms zur anderen. Dann bricht die Spannung zusammen, der Leuchtpunkt springt in seine Anfangslage zurück und der Vorgang beginnt von neuem.
Ist die Frequenz des Kippvorganges auf die Frequenz des zu untersuchenden Vorganges abgestimmt, dann erhält man auf dem Bildschirm ein stehendes Bild (Bild 128/2b).

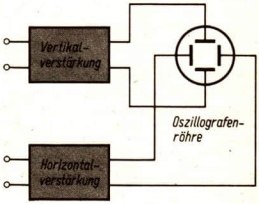


Bild 128/1 Blockschaltbild eines Elektronenstrahloszillografen

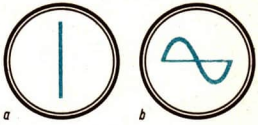


Bild 128/2 Beispiele für Aufzeichnungen mit Hilfe des Elektronenstrahloszillografen:
a) Wechselspannung ohne angelegte Kippspannung,
b) Wechselspannung mit angelegter Kippspannung.

[1] Arthur Wehnelt (1871 bis 1944), deutscher Physiker.

Bild 129/1 Fotozelle
a) Aufbau,
b) Schaltzeichen.

Die Fotozelle

Die Fotoemission (↗ S. 117) wird in den Fotozellen ausgenutzt (Bild 129/1). Fotozellen sind Zweielektrodenröhren, die eine Fotokatode (z. B. Alkalimetall) und eine Anode besitzen. Die aus der Katode austretenden Elektronen werden bei angelegter Spannung zur Anode beschleunigt und bilden den Fotostrom.
Fotozellen haben in der Praxis vielfältige Anwendung gefunden.

Die Fotozelle wendet man z. B. beim Betrieb von lichtelektrischen Relais (Einbruchsicherungen, Zählvorrichtungen usw.) und beim Lichttonverfahren (Tonfilmtechnik) an. In der Regel genügt der von der Fotozelle gelieferte Strom nicht, um ein Relais zu betätigen oder andere Vorgänge auszulösen. Der Fotostrom muß deshalb verstärkt werden (Bild 129/2).
Die Bilder 129/3 und 129/4 zeigen Schaltungen von Anwendungsbeispielen.

Erklären Sie die Wiedergabeeinrichtung beim Tonfilm mit Hilfe des Bildes 129/4!

Bild 129/2 Fotozelle mit einstufigem Röhrenverstärker. Der Fotostrom erzeugt am Gitterwiderstand der Verstärkerröhre eine Teilspannung, die den Elektronenstrom in der Röhre steuert. Im Anodenstromkreis fließt dann über ein Relais der verstärkte Strom. Schaltet man statt des Relais ein elektromagnetisches Zählwerk in den Anodenkreis, dann kann man die Anlage zur Zählung von Werkstücken benutzen.

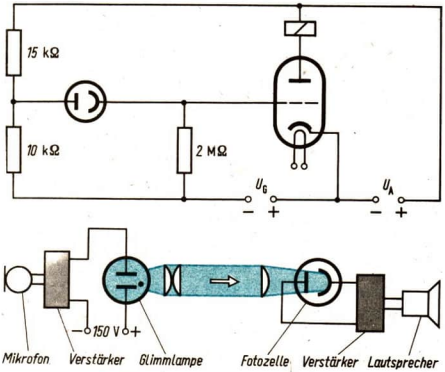


Bild 129/3 Die Lichtschwankungen werden in einer Empfangsanlage mit Hilfe einer Fotozelle wieder in Wechselströme umgewandelt und verstärkt. Über einen Lautsprecher lassen sich die letzteren wieder in Schallwellen umwandeln. Die Sendeanlage besteht aus einer Glimmlampe, die mit Gleichspannung und einer überlagerten Tonwechselspannung betrieben wird.

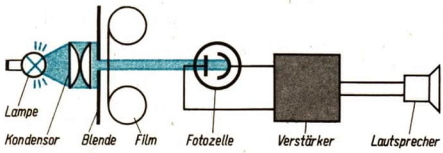


Bild 129/4

Halbleiterbauelemente

Zwei wichtige Bauelemente, die aus Halbleitereinkristallen[1] aufgebaut sind, sind die Halbleiterdiode und der Flächentransistor. Diese Bauelemente werden in der Rundfunk- und Fernsehtechnik, vor allem aber in Datenverarbeitungsgeräten und Meß-, Steuer- und Regelungsanlagen verwendet.

Halbleiterdiode. Halbleiterdioden bestehen aus einem Einkristall, der eine p- und eine n-leitende Schicht besitzt (Bild 130/1). An der Berührungsstelle der beiden Schichten diffundieren einige Löcher in das n-Gebiet und einige Elektronen in das p-Gebiet. Dadurch entsteht eine Grenzschicht, in der Löcher und Elektronen vorhanden sind (Bild 130/2). Es entsteht ein elektrisches Feld (Diffusionsfeld), welches einem von außen angelegten Feld, je nach äußerem Feldrichtungssinn, entweder entgegengesetzt oder gleichgerichtet ist. Der folgende Versuch zeigt, welche Wirkungen entstehen, wenn an eine Halbleiterdiode eine Spannung gelegt wird.

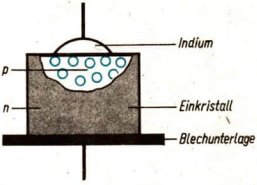


Bild 130/1 Halbleiterdiode

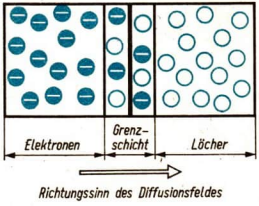


Bild 130/2 Aufbau einer Halbleiterdiode (schematisch)

64 ▼ An die Halbleiterdiode wird über einen Strommesser eine Spannungsquelle angeschlossen (Bild 130/3). Dadurch entsteht ein äußeres elektrisches Feld. Es wird beobachtet, ob das Meßgerät einen Strom anzeigt. Die Anschlüsse werden nun vertauscht, das Meßgerät wird wieder beobachtet. Es ist festzustellen, daß das Meßgerät nur bei einem der beiden Fälle einen Strom anzeigt. Offensichtlich läßt die Halbleiterdiode den Strom nur in einer Richtung hindurch. Man kann deshalb mit Halbleiterdioden wie mit Röhrendioden Wechselströme gleichrichten.

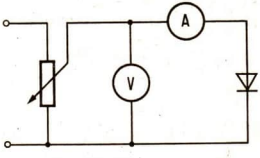


Bild 130/3 Schaltplan

Um die Gleichrichterwirkung zu verstehen, muß man die Vorgänge in der Grenzschicht betrachten.

Bei gleichem Richtungssinn des äußeren Feldes und des Diffusionsfeldes verbreitert sich die Grenzschicht (Bild 130/4). Es werden die Ladungsträger infolge der durch das jetzt vorhandene Feld auf sie wirkenden Kraft zu den entgegengesetzten Polen hingezogen. Die Grenzschicht verarmt an Ladungsträgern.

Die Diode ist bei dieser Polung in **Sperrichtung** geschaltet.

Ist das durch die angelegte Spannung erzeugte elektrische Feld dem Diffusionsfeld entgegengesetzt gerichtet, dann werden die Ladungsträger zur Grenzschicht hin bewegt

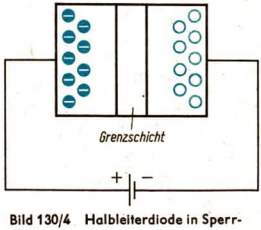


Bild 130/4 Halbleiterdiode in Sperrrichtung

[1] einheitlicher Kristall mit regelmäßigem Gitteraufbau.

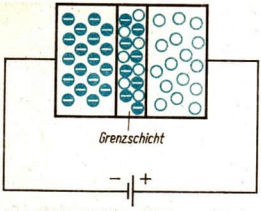


Bild 131/1 Halbleiterdiode in Durchlaßrichtung

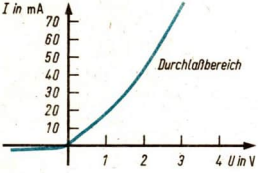


Bild 131/2 Kennlinie einer Halbleiterdiode

Bild 131/3 Germaniumdiode

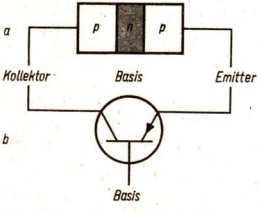
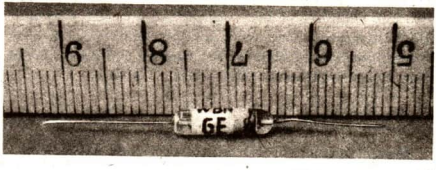


Bild 131/4 a) Aufbau eines Flächentransistors (schematisch),
b) Schaltzeichen

und überfluten diese (Bild 131/1). Es fließt ein elektrischer Strom. Die Diode ist in **Durchlaßrichtung** geschaltet.
Das Bild 131/2 zeigt die eben beschriebenen Vorgänge in einem Diagramm. Man bezeichnet es als **Kennlinie einer Halbleiterdiode** (*I-U*-Kennlinie).
In der Technik werden Halbleitergleichrichter für die Gleichrichtung von Strömen von einigen Mikroampere bis einigen 100 A gebaut. Das Bild 131/3 zeigt einen Germaniumgleichrichter, wie er zur Gleichrichtung kleiner hochfrequenter Wechselströme verwendet wird.



Transistoren[1]. Der Transistor besteht aus einem Halbleitereinkristall, der drei Schichten besitzt. Es werden Transistoren mit pnp- und npn-Schichten hergestellt.
Die beiden äußeren Anschlüsse nennt man Emitter[2] E und Kollektor[3] K, den mittleren Anschluß Basis B (Bild 131/4). Zwischen Emitter und Basis sowie zwischen Kollektor und Basis bilden sich jeweils Grenzschichten aus, die sich einzeln wie die Grenzschicht einer Diode verhalten. Man kann deshalb den Transistor wie zwei hintereinandergeschaltete, entgegengesetzt gepolte Dioden betrachten.

[1] Transistor (transfer: übertragen, resistor: Widerstand).
[2] emittere (lat.): herausschicken
[3] colligere (lat.): einsammeln

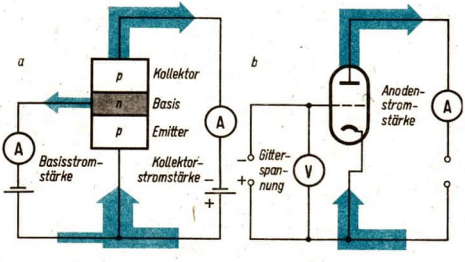


Bild 131/5 a) Transistor in Verstärkerschaltung,
b) Triode in Verstärkerschaltung

Die *Arbeitsweise* von Transistoren läßt sich mit der von Röhrentrioden vergleichen (Bild 131/5). Während die Anodenstromstärke der Röhre durch Änderung einer *Spannung* (Gitterspannung) gesteuert wird, erfolgt beim Transistor die Steuerung der Kollektorstromstärke durch Änderung einer *Stromstärke* (Basisstromstärke). Die Basisstromstärke ist dabei in der folgenden Schaltung wesentlich kleiner als die Kollektorstromstärke. Die Steuerwirkung der Basisstromstärke auf die Kollektorstromstärke zeigt der folgende Versuch (Bild 132/1).

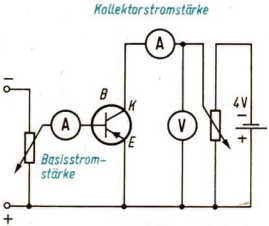


Bild 132/1

65 Die Basisstromstärke I_B und die Kollektorspannung U_K werden mit Hilfe von Spannungsteilerschaltungen eingestellt. Die Kollektorspannung wird konstant gehalten. Die Basisstromstärke I_B wird stufenweise geändert und die Kollektorstromstärke I_K gemessen (Bild 132/2).

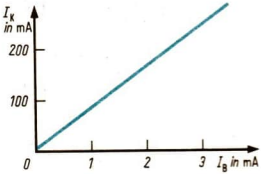


Bild 132/2 Die grafische Darstellung zeigt, daß eine kleine Änderung der Basisstromstärke eine große Änderung der Kollektorstromstärke zur Folge hat.

> Beim Transistor kann mit einer kleinen Änderung der Basisstromstärke eine große Änderung der Kollektorstromstärke erzielt werden.

In den letzten Jahren wurden beim Bau von elektronischen Geräten Halbleiterbauelemente in immer stärkerem Maße eingesetzt. Deshalb wurden in unserer Republik in sehr kurzer Zeit moderne Forschungsstätten und Großbetriebe geschaffen, die sich mit der Entwicklung und dem Bau von Halbleiterbauelementen beschäftigen, z. B. der VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder).
Halbleiterbauelemente führen zu einer außerordentlichen Verkleinerung der damit hergestellten Geräte. Der komplexe Einsatz ist ein wichtiger Bestandteil der wissenschaftlich-technischen Revolution. So werden immer mehr Maschinen elektronisch gesteuert und geregelt. Heute ist man bereits so weit, daß z. B. in der Sowjetunion mehrere Fabriken gleichzeitig über eine zentrale Datenverarbeitungs- und Rechenanlage gesteuert werden. Eine wichtige Rolle spielen dabei in der DDR entwickelte Anlagen für die Datenfernübertragung, die im Frühjahr 1969 auf der Leipziger Messe vorgeführt wurden. Der Wirtschaftszweig der DDR, der sich mit der Herstellung von elektronischen Bauelementen und Geräten befaßt, nimmt einen festen Platz innerhalb der sozialistischen Staatengemeinschaft ein. Dabei ist in der Weiterentwicklung, in der Forschung sowie in der Fertigung eine ständig wachsende Kooperation innerhalb der sozialistischen Staaten zu beobachten.

Schülerexperiment E 3, Seite 164,
Fragen, Aufträge, Versuche,
Seite 155, Nr. 211 bis 233

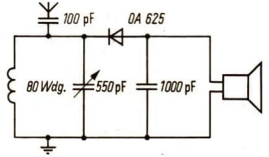


Bild 132/3 Schaltung eines einfachen Rundfunkempfängers mit Diodengleichrichter

Zusammenfassende Betrachtung über den elektrischen Widerstand verschiedener Stoffe

Der elektrische Widerstand der Stoffe hängt ab:
1. Von der Anzahl der frei beweglichen Ladungsträger im Leiter.
2. Von den Größen, die die Bewegung der Ladungsträger im Leiter hemmen.
Wir können uns davon folgende Vorstellung machen.

Metalle. Die zwischen den Gitterbausteinen (Ionen) der Metalle frei beweglichen Elektronen (Leitungselektronen) stoßen auf ihrem Weg mit den Gitterbausteinen zusammen und geben dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie ab. Das Metall erwärmt sich. Dadurch kommt es zu häufigeren Zusammenstößen der Leitungselektronen mit den jetzt mit größeren Schwingungsweiten um ihre Ruhelage schwingenden Gitterbausteinen (↗ Leitungsvorgänge in Metallen).

> Mit zunehmender Temperatur vergrößert sich der Widerstand von metallischen Leitern.

Halbleiter. Die Anzahl der Ladungsträger im Halbleiter hängt von dessen Temperatur ab. Erhöht man die Temperatur, dann werden mehr Elektronen aus ihren Bindungen gerissen. Diese erhöhen die Leitfähigkeit (↗ Leitungsvorgänge in Halbleitern).

> Mit zunehmender Temperatur verringert sich der Widerstand der Halbleiter.

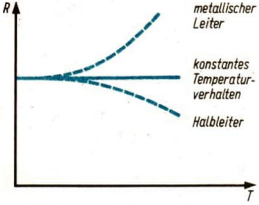


Bild 133/1 Verhalten zweier Widerstände (Halbleiter, Metall) in Abhängigkeit von der Temperatur.

Ermittelt man den Widerstand eines Leiters aus einem unbekannten Stoff in Abhängigkeit von der Temperatur, dann kann man aus den gewonnenen Diagrammen Rückschlüsse auf die Art des Leiters ziehen.
Erhält man eine ansteigende Kennlinie, dann kann man auf einen metallischen Leiter schließen, erhält man eine fallende Kennlinie, dann kann man auf einen Halbleiter schließen (Bild 133/1).

Signalübertragungen

Zur Wiederholung

Signale sind uns besonders aus dem Eisenbahnwesen bekannt. Wir finden hier eine große Anzahl von festen und veränderlichen Verkehrszeichen, die einen sicheren Fahrbetrieb gewährleisten sollen. Der Begriff des Signals wird aber auch noch in anderen Zusammenhängen verwendet. So können zum Beispiel der Zeigerausschlag eines Strommessers, das Ertönen einer Klingel oder das Aufleuchten einer Glühlampe die Funktion von Signalen haben. Man kann physikalische Größen, durch die eine Information übermittelt wird, als Signal bezeichnen. In der mechanisierten und automatisierten Produktion, im Verkehrswesen, bei der Volkspolizei und bei der Armee spielt die Fernübertragung von Signalen eine wichtige Rolle. In der drahtgebundenen Fernmeldetechnik wird vor allem mit elektromagnetischen Hilfsmitteln gearbeitet. Wir wollen uns mit einigen einfachen Beispielen solcher Art beschäftigen.

1. Rufanlage mit elektrischer Klingel (Bild 134/1)

- *Erklären Sie die Wirkungsweise der elektrischen Klingel! Welche physikalischen Vorgänge spielen sich bei der Übermittlung des Signals ab? Was würde geschehen, wenn die Spannungsquelle umgepolt wird? Entwerfen Sie eine Schaltung, bei der eine Klingel von zwei Rufstellen aus betätigt werden kann! Verwenden Sie hierbei zwei Tastschalter (Bild 134/2)!*

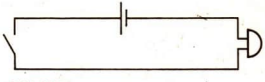


Bild 134/1

Bild 134/2

2. Gegenrufanlage (Bild 134/3)

- *Erläutern Sie die Arbeitsweise dieser Anlage!*

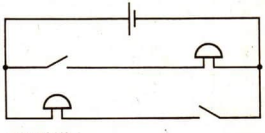


Bild 134/3

3. Rufanlage mit Relaisschaltung (Bild 134/4)

- *Erklären Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines elektromagnetischen Relais! Welche gemeinsamen Eigenschaften haben Relais und Klingel? Welchen Vorteil erzielt man durch den Einbau des Relais in die Rufanlage? Erläutern Sie die aufeinanderfolgenden Vorgänge beim Übertragen des Signals! (Gehen Sie dabei besonders auf die Rolle der Magnetfelder ein!) Entwerfen Sie einen Schaltplan für eine Gegenrufanlage mit Relaisschaltung!*

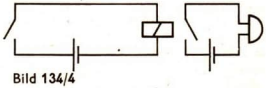


Bild 134/4

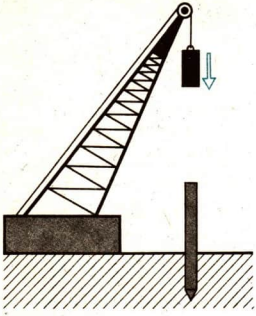


Bild 135/1

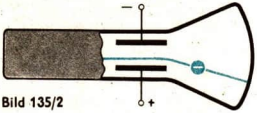


Bild 135/2

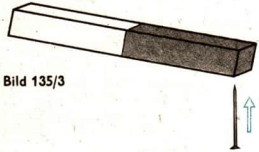


Bild 135/3

Gegenüberstellung der Felder

In den Bildern 135/1 bis 3 sind verschiedenartige physikalische Vorgänge dargestellt, die nochmals das Wesen der in diesem Lehrbuch behandelten Arten von Feldern erkennen lassen.

Welche Felder sind in den gezeichneten Beispielen wirksam?

Felder sind durch **Kraftwirkungen auf Probekörper** nachweisbar.

Welche Eigenschaften müssen die Probekörper beim Nachweis der einzelnen Felder aufweisen?
Welche Unterschiede gibt es zwischen den Kraftwirkungen im Gravitationsfeld und im elektrischen Feld?

Die **Felder** sind nicht nur an jenem Ort vorhanden, an dem sich die Probekörper befinden, sondern sie **erfüllen den gesamten Raum.**
Die Felder sind ebenso real in der Natur vorhanden wie feste, flüssige und gasförmige Körper, wie elektrische Ladungsträger und elektrische Ströme. Wir können die Gesetzmäßigkeiten der mit Feldern verknüpften Vorgänge erkennen und für technische Anwendungen nutzen.

Geben Sie hierfür einige Beispiele an!

Alle drei betrachteten **Felder sind Träger von Energie.**

Wie wird dies in den Bildern 135/1 bis 135/3 deutlich?

Um die Struktur der Felder zu beschreiben, kann man sich des **Feldlinienmodells bedienen.**

Wie kann man den Verlauf der Feldlinien experimentell veranschaulichen?
Nennen Sie die Vereinbarungen über den Verlauf der Feldlinien des elektrischen und magnetischen Feldes!

Zwischen veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern bestehen Zusammenhänge.

Erläutern Sie diese Zusammenhänge!

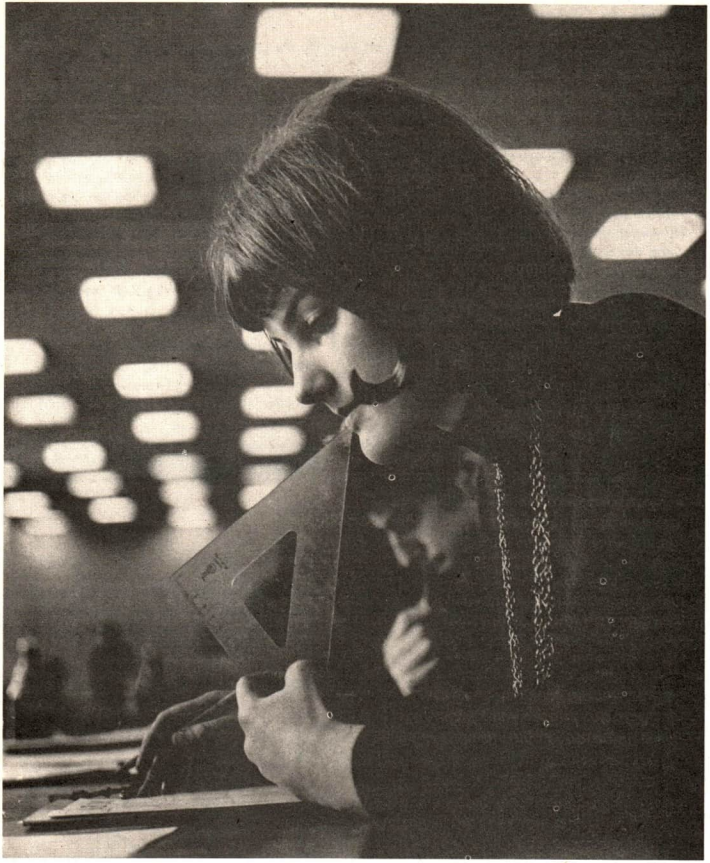
Das allgemeine Modell des elektrischen Leitungsvorganges

1. Voraussetzungen für einen elektrischen Leitungsvorgang sind
a) frei bewegliche Ladungsträger (Elektronen, Ionen),
b) ein elektrisches Feld
im zu untersuchenden Raum.
2. Bei einem elektrischen Leitungsvorgang wird Feldenergie auf die Ladungsträger übertragen. Die Ladungsträger werden beschleunigt.
3. Bei einem elektrischen Leitungsvorgang entsteht ein elektrischer Strom als gerichtete Bewegung positiver und negativer Ladungsträger. $I = I_+ + I_-$.

Übersicht über die Leitungsvorgänge

	Metalle	Halbleiter	Flüssigkeiten
ohne angelegte Spannung	Die frei beweglichen Elektronen vollführen eine ungeordnete Wärmebewegung.	Bei tiefen Temperaturen verhalten sich Halbleiter wie Isolatoren. Durch Erwärmen, Belichten usw. werden Elektronen aus ihren Bindungen an die einzelnen Atome befreit.	Beim Lösen von Salzen, Säuren und Basen in Wasser werden positive und negative Ionen voneinander getrennt. Die Ionen sind in der Lösung beweglich.
mit angelegter Spannung	Das elektrische Feld übt eine Kraft auf die Elektronen aus. Es ist eine gerichtete Bewegung von Elektronen vorhanden.	Elektronen und Defektelektronen (Löcher) bewegen sich in die durch das elektrische Feld gegebene Richtung.	Das elektrische Feld übt eine Kraft auf die Ionen aus. Die positiven Ionen wandern zur Katode, die negativen Ionen wandern zur Anode.
Träger des elektrischen Stromes	Elektronen	Elektronen, Defektelektronen (Löcher)	positive Ionen, negative Ionen

	Gase	Vakuum
ohne angelegte Spannung	Bei Energiezufuhr werden von vorher neutralen Atomen oder Molekülen Elektronen abgetrennt. Diese lagern sich an andere neutrale Atome oder Moleküle an. Es entstehen Ionen.	Will man eine Leitfähigkeit erreichen, müssen Ladungsträger im Vakuum vorhanden sein. Durch Glühemission und Fotoemission können aus Metallen Elektronen austreten.
mit angelegter Spannung	Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes führen die Ionen und Elektronen den Ladungstransport durch.	Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes führen die Elektronen den Ladungstransport durch. Sie bewegen sich zur Anode.
Träger des elektrischen Stromes	positive Ionen, negative Ionen, Elektronen	Elektronen



Aufgaben

Fragen, Aufträge, Versuche

Zu den Aufgaben mit einer farbigen Zahl sind auf Seite 166 die Lösungen angegeben.

Mechanik

Grundlagen der Kinematik (Seite 6 bis 25)

*1. Auf dem Gepäckträger eines Eisenbahnabteils liegt ein Koffer. Beschreiben Sie den Bewegungszustand des Koffers unter Beachtung der Relativität der Bewegung
a) im fahrenden Zug,
b) im haltenden Zug!

2. Der Pilot eines Segelflugzeuges berichtete: „Der Geschwindigkeitsmesser meines Flugzeuges zeigte 85 $\frac{km}{h}$ an, aber ich näherte mich nur sehr langsam dem Flugplatz. Ich hatte den Eindruck, als ob die Maschine in der Luft stillstehen würde."
Versuchen Sie den hier geschilderten Sachverhalt physikalisch zu deuten!

3. Nennen Sie einige Bewegungsvorgänge und geben Sie jeweils die *Bewegungsart* an!
Beispiel: Bewegung einer Bohrspindel bei eingeschaltetem Vorschub – gleichförmige Bewegung.

4. Ein Schnellzug durchfährt mit gleichbleibender Geschwindigkeit einen Streckenabschnitt von 1 500 m Länge in 1 Minute. Wie groß ist die Geschwindigkeit $\left(\text{Ergebnis in } \frac{km}{h}\right)$?

5. Der Werkzeugschlitten einer Drehmaschine verschiebt sich längs eines Weges von 20 cm in 34 s gleichförmig. Bestimmen Sie die Geschwindigkeit der Verschiebung!

6. Bild 138/1 zeigt ein Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm. Welche Bewegungsart liegt vor? Wie groß ist die Geschwindigkeit?

7. Zeichnen Sie das Weg-Zeit-Diagramm für eine gleichförmige Bewegung $\left(v = 15 \frac{cm}{s}\right)$!

8. Bestimmen Sie mit Hilfe von Bild 138/2, welcher Weg in 3 s zurückgelegt wird!

9. Bei der Bewegung eines Fahrzeuges auf gerader Strecke wurden folgende Werte gemessen:

Weg s in m	Zeit t in s
5,3	1,2
11,9	2,7
22,0	5,0
27,7	6,3

Zeichnen Sie mit diesen Werten das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm dieser Bewegung und erläutern Sie die Bewegungsart!

Bild 138/1 zu 6.

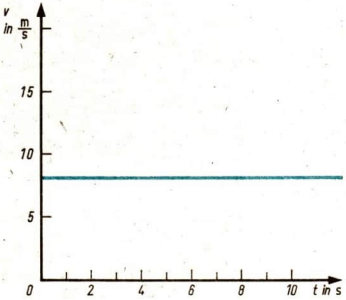
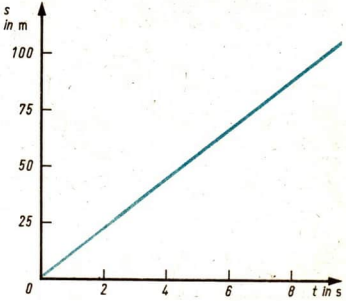


Bild 138/2 zu 8.



10. Berechnen Sie die Durchschnittsgeschwindigkeiten für folgende sportliche Höchstleistungen:
100-m-Lauf in 9,9 s,
100-m-Kraulschwimmen in 52,6 s,
500-m-Eisschnellauf in 40,2 s,
1000-m-Bahnradfahren in 1:07 min,
3095-m-Skiabfahrtslauf in 2:06 min.

11. Berechnen Sie mit den Werten der Tabelle 2 (S. 11) die Durchschnittsgeschwindigkeit für eine Fahrzeit von 2 s, 4 s, 5 s! Warum sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten unterschiedlich? Benutzen Sie bei der Erklärung Ihre Kenntnisse über Durchschnitts- und Augenblicksgeschwindigkeit!

12. Die experimentelle Untersuchung einer geradlinigen Bewegung ergab folgende Werte:

Zeit t in s	Weg s in m	Geschwindigkeit v in $\frac{m}{s}$
0	0	0
1	0,1	0,2
2	0,4	0,4
3	0,9	0,6
4	1,6	0,8

Untersuchen Sie, welche der folgenden Proportionalitäten vorliegt: $s \sim t$, $s \sim t^2$, $v \sim t$, $v \sim t^2$!

13. Zeichnen Sie mit den Werten der Tabelle in Aufgabe 12
a) ein s-t-Diagramm,
b) ein v-t-Diagramm!
Welche Bewegungsart liegt vor?

14. Erklären Sie die beiden Diagramme (Bild 139/1)! Welche Abhängigkeiten sind dargestellt? Welche Bewegungsarten liegen vor? Woran erkennen Sie die Bewegungsart im Diagramm?

15. Bei der Bewegung einer Kugel auf einer geneigten Ebene ergaben sich folgende Werte:

Zeit t in s	Weg s in cm
0	0
1	3,1
2	12,1
3	27,4
4	49,6
5	77,1

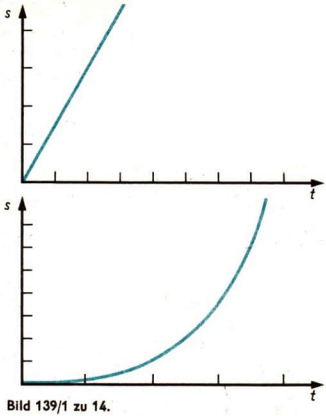
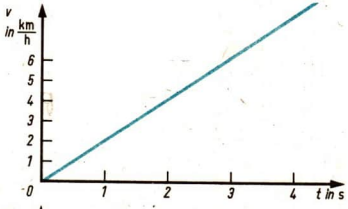


Bild 139/1 zu 14.



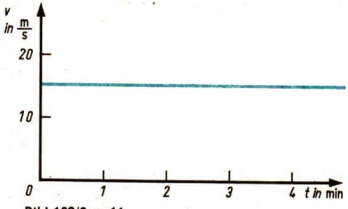


Bild 139/2 zu 16.

Auf welche Weise können Sie feststellen, ob zwischen s und t ein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht? Suchen Sie diesen Zusammenhang und geben Sie die Bewegungsart an!

16. In Bild 139/2 sind zwei v-t-Diagramme gegenübergestellt. Welche Bewegungsart liegt jeweils vor? Was können Sie über die Beträge der Geschwindigkeiten sagen?

17. Der Korb eines Fahrstuhls wird im Verlauf der ersten drei Sekunden gleichmäßig beschleunigt und erreicht eine Geschwindigkeit von $3\,\frac{m}{s}$. Mit dieser Geschwindigkeit bewegt er sich 5 s gleichförmig weiter. Zeichnen Sie das entsprechende Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm!

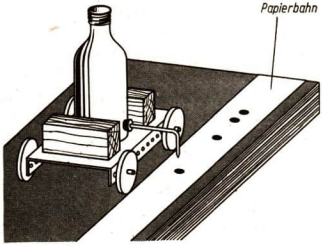
18. Bauen Sie mit einem Metallbaukasten ein Fahrzeug, auf das eine Plastflasche aufgestellt werden kann! Versehen Sie diese mit einem Tropfer (Bild 140/1) und füllen Sie verdünnte Tinte ein! Lassen Sie den Wagen eine geneigte Ebene hinabrollen, so daß die in gleichmäßigen Zeitabständen fallenden Tropfen auf einer Papierbahn die jeweils zurückgelegten Wege markieren! Weisen Sie die Gültigkeit des Weg-Zeit-Gesetzes der gleichmäßig beschleunigten Bewegung nach!
Fertigen Sie ein Weg-Zeit-Diagramm mit den Werten aus dem Versuch an!

19. Welche Geschwindigkeit erreicht eine Kugel, (N) die eine geneigte Ebene hinabrollt, in 2 s, wenn die Beschleunigung $1{,}23\,\frac{m}{s^2}$ beträgt? Welcher Weg wird in 2 s zurückgelegt?

20. Wie lange dauert es, bis ein Kraftwagen aus (N) dem Stillstand eine Geschwindigkeit von $50\,\frac{km}{h}$ erreicht, wenn die konstante Beschleunigung $1{,}2\,\frac{m}{s^2}$ beträgt?

21. Eine auf einer geneigten Ebene hinabrollende (N) Kugel benötigt für einen Weg von 1,5 m eine Zeit von 2,5 s.
Wie groß ist die Beschleunigung?

Bild 140/1 zu 18.



22. Ein PKW fährt mit einer Geschwindigkeit (N) von $75\,\frac{km}{h}$ hinter einem LKW. Beim Überholen des Lastkraftwagens wird der PKW 5 s beschleunigt, bis die Endgeschwindigkeit $90\,\frac{km}{h}$ beträgt. Wie groß ist die dem PKW erteilte Beschleunigung?

*23. Ein Motorradfahrer fährt mit unzulässig hoher Geschwindigkeit von $v = 80\,\frac{km}{h}$ durch eine Ortschaft. Durch ein anderes Fahrzeug wird plötzlich die Straße in 50 m Entfernung blockiert. Kann der Fahrer die Maschine noch zum Stillstand bringen, wenn die Bremsbeschleunigung $6\,\frac{m}{s^2}$ beträgt?
Anleitung: Eliminieren Sie die Zeit aus den Gleichungen $v = a \cdot t$ und $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$! Bestimmen Sie den Bremsweg s!
Zwischen Wahrnehmen des Hindernisses und Beginn der Bremswirkung vergeht noch eine bestimmte Zeit, in der das Motorrad einen Weg von 20 m zurücklegt. Berücksichtigen Sie diesen Sachverhalt bei Ihrer Antwort! Welche Folgerungen ziehen Sie für Ihr Verhalten im Straßenverkehr (auch als Fußgänger)?

24. Die Tabelle (Seite 141) enthält einige (N) Durchschnittsbeschleunigungen. Stellen Sie mit diesen Werten Textaufgaben zur Berechnung von Geschwindigkeiten, Zeiten und Wegen bei geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegungen zusammen!

25. Eine Fallrinne wird nach und nach immer stärker geneigt.
Wie ändern sich die Endgeschwindigkeit und die Beschleunigung einer hinab*rollenden* Kugel?

26. Führen Sie den auf Seite 21 beschriebenen Galileiischen Versuch an der geneigten Ebene selbst aus! Stellen Sie mit folgenden Geräten eine entsprechende Versuchsanordnung zusammen: Schiene einer Schleudergardine, Metallkugel, Holzklötze, Konservenbüchse mit in den Boden eingekitteten dünnen Röhrchen, Meßzylinder oder Becherglas und Waage, Gliedermaßstab!
Bestätigen Sie damit das Weg-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung!

27. Geben Sie die Gesetze des freien Falls in Wortform an!

Beispiel	Beschleunigung beim	
	Anfahren, Starten usw.	Bremsen
Güterzug (Anfahren bzw. Bremsen)	$0{,}08\,\frac{m}{s^2}$	$-0{,}15\,\frac{m}{s^2}$
Berliner S-Bahn (Anfahren)	$0{,}55\,\frac{m}{s^2}$	
Geschoß im Lauf eines Gewehres	$500\,000\,\frac{m}{s^2}$	
schwaches Bremsen eines Motorrades bei nasser Straße		$-2\,\frac{m}{s^2}$
Start eines Raumschiffes	$30\,\frac{m}{s^2}$	
Öffnen eines Fallschirmes (sehr kurzzeitig)		$-60\,\frac{m}{s^2}$

28. Beim freien Fall erreichte ein Fallschirm-
(N) sportler der GST eine Geschwindigkeit von $200\,\frac{km}{h}$. Wie lange fiel er, wenn der Absprung mit der Geschwindigkeit Null erfolgte und der Luftwiderstand vernachlässigt wird (z. B. beim Absprung aus großer Höhe)?

29. Bei einem Fallversuch fiel ein Stein 1,4 s.
(N) Welcher Weg wurde dabei zurückgelegt?

*30. Bestimmen Sie die Endgeschwindigkeit eines Schwimmsportlers beim Sprung vom 10-m-Turm und vom 3-m-Brett! Setzen Sie für g den Wert $10\,\frac{m}{s^2}$!

31. Lassen Sie ein Blatt Stanniol einmal ausgebreitet, dann zusammengeknüllt aus der gleichen Höhe fallen! Äußern Sie sich zu den unterschiedlichen Fallzeiten!

32. Warum ist es nicht notwendig, bei kurzen Fallstrecken oder bei einer Bewegung auf einer geneigten Ebene den Luftwiderstand zu berücksichtigen?

33. Darf man bei folgenden Beispielen mit der Gleichung $v = g \cdot t$ rechnen? Begründen Sie jeweils Ihre Meinung!
Fallschirmspringer am geöffneten Schirm, Schwimmer beim Sprung vom 3-m-Brett, Regentropfen aus 2000 m Höhe, Vogelfeder in einer Fallröhre (ausgepumpt), Vogelfeder in einer Fallröhre (luftgefüllt).

*34. Welche Geschwindigkeit erreicht man beim Herabspringen von einer 1,5 m hohen Mauer? Benutzen Sie zur Lösung die in der Fußnote auf Seite 18 angegebene Gleichung!

35. Auf ein Sportflugzeug, das eine Eigengeschwindigkeit von $220\,\frac{km}{h}$ hat, wirkt während des Fluges rechtwinklig zur Flugstrecke von A nach B Seitenwind mit einer Geschwindigkeit von $45\,\frac{km}{h}$ (Bild 141/1). Wie groß ist der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit? Lösen Sie die Aufgabe grafisch!

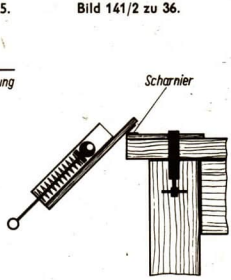
36. Bauen Sie ein Federwurfgerät nach Bild 141/2 und bestätigen Sie damit die auf Seite 25 genannten Gesetzmäßigkeiten beim schrägen Wurf! Der Auftreffpunkt kann auf einer Papierunterlage mit Hilfe von Kohlepapier markiert werden. Den Abwurfwinkel bestimmen Sie mit einem Winkelmesser!

37. Aus welchen Einzelbewegungen kann man sich den
a) senkrechten Wurf,
b) waagerechten Wurf,
c) schrägen Wurf
zusammengesetzt denken?

38. Stellen Sie in einer Tabelle die folgenden Bewegungsarten zusammen, und machen Sie dazu jeweils Angaben über die Geschwindigkeit und die Beschleunigung: gleichförmige Bewegung, gleichmäßig beschleunigte Bewegung, gleichmäßig verzögerte Bewegung, beschleunigte Bewegung (allgemein)!

Bild 141/1 zu 35.

Bild 141/2 zu 36.



Grundlagen der Dynamik (Seite 26 bis 41)

39. Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise der im Bild 142/1 wiedergegebenen Kraftmesser!
40. Nennen Sie die Wirkungen einer mechanischen Kraft!
41. Bestimmen Sie die Beträge der Kräfte in Bild 142/2 unter Beachtung des jeweiligen Kräftemaßstabes!
42. Auf zwei flachen Rollwagen stehen zwei Personen A und B, die ein Seil in den Händen halten. Zieht A am Seil (d. h. wirkt eine Kraft), so bewegen sich *beide* Wagen aufeinander zu, ebenso, wenn B allein zieht oder wenn beide Personen gleichzeitig ziehen. Geben Sie eine Begründung!
43. Erklären Sie physikalisch die Wirkungsweise eines Rasensprengers (Bild 142/3)! Welchen Umlaufsinn hat der Rasensprenger?
44. Warum müssen die Startblöcke auf der Aschenbahn starr befestigt werden?

*45. Mit welcher Kraft kann eine Person mit Hilfe einer festen Rolle höchstens nach unten ziehen, wenn die Gewichtskraft dieser Person 80 kp beträgt? Begründen Sie Ihre Meinung!

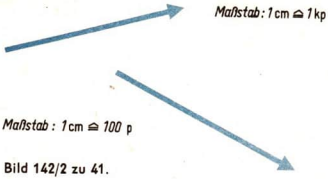


Bild 142/2 zu 41.

46. Bei dem berühmten Versuch Otto von Guerikkes mit den „Magdeburger Halbkugeln" wurden auf jede Seite 8 Pferde gespannt. „Die Kraft von 16 Pferden reichte nicht aus, um die Halbkugeln voneinander zu trennen."
Überprüfen Sie die Aussage dieses Satzes mit dem Wechselwirkungsgesetz!

*47. An zwei Federkraftmessern, die nach Bild 142/4 miteinander verbunden sind, hängt ein Körper mit der Masse 1 kg.
a) Was zeigt jeder der Federkraftmesser an? (Die Gewichtskraft des unteren Kraftmessers soll unberücksichtigt bleiben!)
b) Welche Verhältnisse liegen nach Bild 142/5 vor? (Federwaagen als black box dargestellt!) Masse der Körper je 1 kg.

Bild 142/1 zu 39.

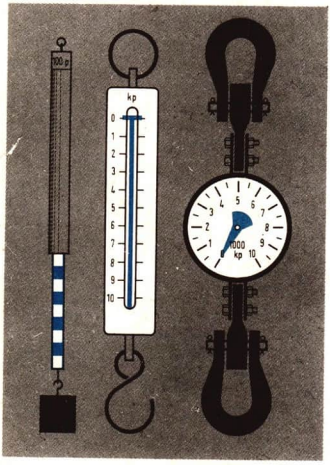


Bild 142/3 zu 43.

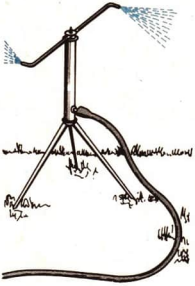
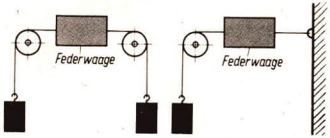


Bild 142/4 zu 47. a)

Bild 142/5 zu 47. b)



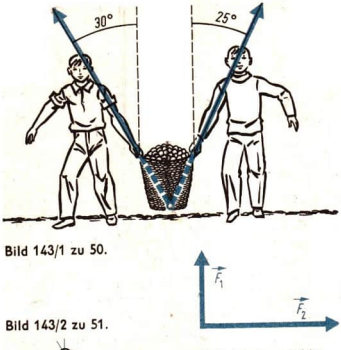


Bild 143/1 zu 50.

Bild 143/2 zu 51.

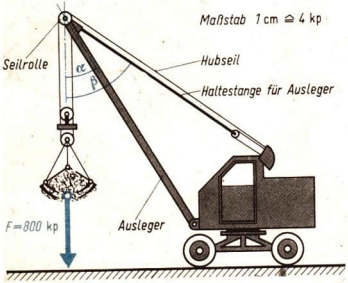


Bild 143/3 zu 52.

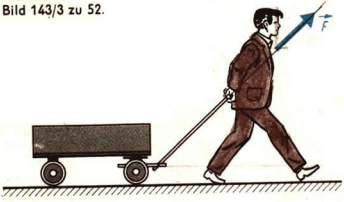


Bild 143/4 zu 54.

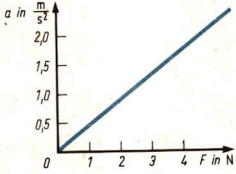


Bild 143/5 zu 56.

48. Münchhausen zog sich am Zopf selbst aus dem Sumpf. Warum ist diese Erzählung des „Lügenbarons" auch physikalisch unmöglich?

49. Eine Scherzfrage: Über eine feste Rolle ist ein Seil gelegt. An einem Seilende hängt ein Affe, am anderen ein gleich schweres Gegengewichtsstück.
Was geschieht, wenn der Affe nach oben klettert?

50. Bestimmen Sie durch Zeichnung die resultierende Kraft (Bild 143/1)! ($F_1 = F_2 = 20$ kp)

51. Wie groß ist der Betrag der resultierenden Kraft aus F_1 und F_2 (Bild 143/2)? Lösung durch Zeichnung!

*52. Ermitteln Sie grafisch die Belastung des Hubseils und des Auslegers nach Bild 143/3!

*53. Ein Körper hängt in der Mitte eines Stoffbandes, dessen Enden in den Händen gehalten werden. Wird das Band stärker gespannt, wenn man die Hände einander nähert oder wenn man sie voneinander entfernt?
Begründen Sie Ihre Meinung an Hand einer Zeichnung!

54. Bestimmen Sie die Kraftkomponente in Wegrichtung! Die Wirkungslinien der Komponenten verlaufen parallel bzw. senkrecht zum Erdboden (Bild 143/4)! Welche Wirkung tritt durch die vertikale Komponente auf?
($F = 5$ kp)

55. (N) Die Tabelle enthält die Ergebnisse eines Experimentes, bei dem eine Kugel eine geneigte Ebene hinabrollte. Die beschleunigende Kraft ist die in Bewegungsrichtung wirkende Komponente der Gewichtskraft der Kugel. Bei unterschiedlicher Neigung der Ebene ergaben sich folgende Werte:

a in $\frac{cm}{s^2}$	F in N
88	0,44
102	0,53
120	0,61
137	0,70

Stellen Sie a als Funktion von F grafisch dar, und erklären Sie den Kurvenverlauf! Welche Gesetzmäßigkeit liegt vor?

56. Welche Beziehung besteht zwischen den physikalischen Größen, deren Abhängigkeit in Bild 143/5 dargestellt ist?

57. (N) Ein Motorrad mit einer Masse von 100 kg (hinzu kommt die Masse des Fahrers von

75 kg) erfährt eine Beschleunigung von 1,3 $\frac{m}{s^2}$.

Wie groß ist die Kraft?

*58. Welche Kraft übt der Motor des Kleinkraftrades „Simson-Sperber" aus, wenn das Fahrzeug bei einer Gesamtmasse (einschließlich Fahrer) von 155 kg aus dem Stand in 25 s eine Geschwindigkeit von 75 $\frac{km}{h}$ erreicht? (Die Bewegung erfolge gleichmäßig beschleunigt, Reibung und Luftwiderstand bleiben unberücksichtigt.)

59. Berechnen Sie die Masse eines Körpers, auf den eine Kraft von 20 N wirkt, wenn die Beschleunigung 1,8 $\frac{m}{s^2}$ beträgt!

60. Auf einen Körper, der eine geneigte Ebene reibungsfrei hinabgleitet, wirkt in Bewegungsrichtung eine konstante Kraft von 0,8 N. Wie groß ist die Masse des Körpers, wenn die Beschleunigung 1,2 $\frac{m}{s^2}$ beträgt?

61. Wie groß ist die Beschleunigung, die ein Schienenwagen der Masse 6 kg erfährt, wenn die konstante Kraft 4,9 kp beträgt?

62. Berichten Sie über das Leben und Wirken von Isaac Newton! Arbeiten Sie dazu den Lehrbuchabschnitt S. 33 bis 35 durch! Als weiterführende Literatur ist zu empfehlen:
Wawilow, S. I.: Isaac Newton, Berlin 1951.

63. Erklären Sie den Unterschied zwischen der Masse eines Körpers und der Gewichtskraft eines Körpers!

64. Beschreiben Sie die Wägung eines Körpers mit einer Hebelwaage! Warum kann man mit ihrer Hilfe nur Massen vergleichen? Hinweis: Hebelwaage auf der Erde, auf dem Mond.

65. Wie groß ist die Gewichtskraft eines Körpers, dessen Masse 7,65 kg beträgt, am Orte normaler Fallbeschleunigung? (Angabe in Newton und in Kilopond!)

66. Ein Körper besitzt eine Gewichtskraft von
a) 19,62 N,
b) 5 kp,
c) 2 kp.
Geben Sie jeweils die Masse an!

67. Stellen Sie Versuche zusammen, mit denen man die Trägheit nachweisen kann! Beispiel (Bild 144/1): Wird das Spielkartenblatt schnell weggezogen, fällt die Münze in den Zylinder.

*68. Erklären Sie den im Bild 37/2 dargestellten Versuch unter Beachtung des Begriffes Trägheit!

69. Welche Trägheitswirkungen sind die Ursache von Verletzungen bei Verkehrsunfällen?

*70. Nach welcher Seite bewegt sich der Oberkörper eines in einem Omnibus stehenden Fahrgastes, wenn das Fahrzeug plötzlich bremst. Beim Halten nach allmählichem Bremsen ist die Bewegung entgegengesetzt gerichtet. Warum?

71. Stellen Sie eine Versuchsanordnung nach Bild 144/3 zusammen! Schlägt man mit einem Stativstab kräftig auf den trockenen Holzstab (Durchmesser etwa 5 mm), so zersplittert er, ohne daß die Papierschlingen reißen. Geben Sie eine Erklärung!

72. Erklären Sie den Start einer Rakete mit Hilfe der Gesetze der Dynamik!

73. Welche Bewegungsart hat das in Bild 144/2 dargestellte Rennboot? Begründen Sie Ihre Meinung!

74. Stellen Sie in einer Tabelle die Ihnen bekannten Bewegungsarten zusammen!
Geben Sie jeweils an, was über die auf den Körper wirkende Kraft gesagt werden kann!

Bild 144/1 zu 67.

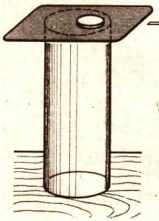
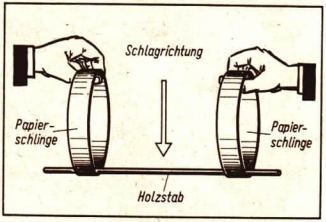


Bild 144/2 zu 73.

Bild 144/3 zu 71.



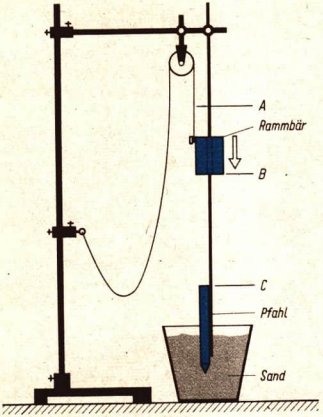


Bild 145/1 zu 80.

75. Welche der nachstehenden physikalischen Größen sind Grundgrößen, welche abgeleitete Größen: Kraft, Masse, Weg, Beschleunigung, Dichte, Zeit, Geschwindigkeit, Druck, Volumen?

76. Ordnen Sie die nachstehenden Einheiten nach Grundeinheiten und abgeleiteten Einheiten: kg, N, s, m^3, m, $\frac{m}{s}$, $\frac{kg}{cm^3}$, m^2, $\frac{m}{s^2}$!

Energie (Seite 42 bis 47)

77. Welche Arbeit verrichtet man allein zum Heben des Körpers bei 30 Kniebeugen? Es soll der Weg s jeweils 40 cm betragen, und die Gewichtskraft G soll 60 kp sein.

78. Bestimmen Sie die reine Hubarbeit eines Bergsteigers, der einen Höhenunterschied von 1 000 m überwindet! (Körpergewicht mit Ausrüstung 80 kp.)

79. Ein leeres Treibstoffaß soll auf einen Hänger befördert werden. Die Gewichtskraft des Fasses beträgt 30 kp.
a) Das Faß wird 1,2 m gehoben. Berechnen Sie die Arbeit!
b) Das Faß wird mittels einer Schrotleiter reibungsfrei hinaufgerollt, die 3,90 m lang ist. Wie groß ist jetzt die Arbeit?

80. Beschreiben Sie die Begriffe Arbeit und Energie am Modell einer Ramme (Bild 145/1)!

81. Unterscheiden Sie die Begriffe Arbeit und Energie!

82. Beschreiben Sie am Beispiel eines schwingenden Pendels den Energieerhaltungssatz der Mechanik!

83. (N) Rechnen Sie folgende Energieeinheiten in Nm bzw. in kpm um!
a) 981 Nm, c) 1 kpm, e) 0,85 Nm,
b) 20 kpm, d) 20 Ws, f) 102 kpm.

84. (N) Wie groß ist die potentielle Energie eines Körpers mit der Masse 5 kg, wenn er lotrecht um 2 m gehoben wurde? Angabe in Kilopondmeter und in Newtonmeter!

85. (N) Welche potentielle Energie besitzt eine gespannte Feder, wenn diese um 18 cm gedehnt wurde und die Endkraft 13 kp beträgt? Angabe in Kilopondmeter und in Newtonmeter!

86. Eine MZ ES 175/2 „Trophy" hat einschließlich Fahrer eine Masse von 230 kg.
(N) a) Wie groß ist die kinetische Energie bei einer Geschwindigkeit von 50 $\frac{km}{h}$?
b) Bei einem Zusammenstoß würde diese Energie als „Verformungsarbeit" wirksam. Zur Veranschaulichung gibt man oft die Höhe an, aus der beim freien Fall die gleiche „Wirkung" erreicht wird. Berechnen Sie diese Höhe mit folgenden Beziehungen:
$W_{kin} = W_{pot}$; $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$.

87. (N) Ein Mauerziegel mit einer Gewichtskraft von 3,5 kp fällt aus einer Höhe von 10 m herab. Wie groß ist die kinetische Energie des Ziegels beim Auftreffen auf den Erdboden?

88. Das Geschoß einer KK-Patrone, Kaliber 22 (5,6 mm), hat eine Masse von 2,55 g. Die Anfangsgeschwindigkeit beträgt 330 $\frac{m}{s}$.
Die Granate der sowjetischen Haubitze 38 (152 mm) hat eine Masse von 40 kg und eine Anfangsgeschwindigkeit von 508 $\frac{m}{s}$.
a) Welche kinetische Energie besitzen die Geschosse?
b) Eine aus einer Höhe von 10 m herabfallende Bleikugel ($m = 1{,}4$ kg) hat beim Aufschlag auf den Boden eine kinetische Energie von 14 kpm. Vergleichen Sie diesen Wert mit den Ergebnissen aus 88 a!

89. Der 1966 gestartete sowjetische Forschungssatellit „Proton 3" – ein automatisches For-

schungslabor für die Untersuchung der kosmischen Strahlung – besaß im erdnächsten Punkt der Umlaufbahn um die Erde eine Geschwindigkeit von etwa $8\,\frac{km}{s}$. Die Masse betrug 12200 kg.

a) Wie groß war die kinetische Energie im erdnächsten Punkt?
b) Welche Last hätte man mit dieser Energie um 1000 m heben können? (Zum Vergleich: Die Masse eines Frachtschiffes beträgt etwa 10000000 kg [Bild 146/1]).
c) Der Satellit hatte eine „Lebensdauer" von 72 Tagen. Wohin „verschwand" die Energie?

90. Ein Ball mit einer Gewichtskraft von 50 p sprang nach einem Fall aus 3 m Höhe wieder bis auf 2 m Höhe empor. Wieviel mechanische Energie ist „verlorengegangen"? Wie vereinbart sich das mit dem Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie?

91. Ein Ball wird lotrecht emporgeworfen. Beim Abwurf wird Beschleunigungsarbeit verrichtet, durch die der Körper kinetische Energie erlangt. Beschreiben Sie die weiteren Energieumwandlungen *während der Aufwärtsbewegung* (die Geschwindigkeit verringert sich!), *während des Herabfallens* und beim *Auftreffen auf den Erdboden*!

92. Beschreiben Sie die Energieumwandlungen in einem Dampfkraftwerk (Kessel, Turbine, Generator)!

* 93. Ein Fahrraddynamo läßt sich leicht drehen, wenn die Lampe nicht eingeschaltet ist. Es muß dann nur die Reibung überwunden werden. Warum läßt sich das Rad schwerer drehen, wenn die Lampe eingeschaltet wird? Hinweis: Beachten Sie den Energieerhaltungssatz!

Bild 146/1 zu 89.

Die Kreisbewegung (Seite 48 bis 53)

94. Wodurch unterscheiden sich eine geradlinige, gleichförmige Bewegung und eine gleichförmige Kreisbewegung? Was ist ihnen gemeinsam?

95. Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit eines Fesselflugmodells, wenn die Leinenlänge 18 m beträgt und ein Umlauf 2,2 s dauert?
(Es wird angenommen, daß die Leinenlänge mit dem Radius der Bahn übereinstimmt.)

96. Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit eines Punktes des Plattentellerrandes eines Plattenspielers bei verschiedenen Drehzahlen!

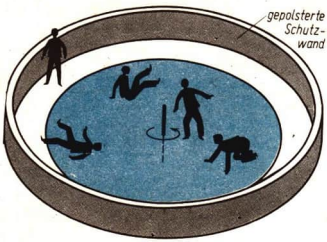
97. Ein Körper mit der Masse 5 kg ist an einer 1,2 m langen Schnur befestigt und führt in einer waagerecht liegenden Ebene eine gleichförmige Kreisbewegung aus. Wie groß ist die Radialkraft, wenn in einer Minute 60 Umläufe erfolgen?

98. Ein PKW „Trabant" mit einer Gesamtmasse von 1000 kg durchfährt eine nicht überhöhte Kurve mit einer Geschwindigkeit von $60\,\frac{km}{h}$.
a) Wie groß ist die Radialbeschleunigung, wenn der Krümmungsradius 300 m beträgt?
b) Wie groß ist die Radialkraft (in Kilopond)?

99. Veranschaulichen Sie sich die Wirkungsweise einer Wäschetrockenschleuder! Benutzen Sie dazu beispielsweise einen Schwamm und ein Ballnetz!

100. Das sogenannte „Teufelsrad", das man manchmal auf Vergnügungsplätzen findet, ist eine große Scheibe, die sich mehr oder

Bild 146/2 zu 100.



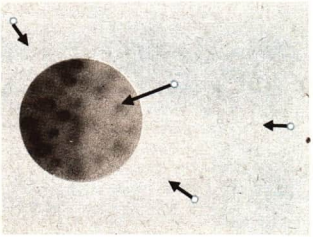
weniger schnell dreht (Bild 146/2). Erklären Sie das Verhalten von Personen, die sich auf dieser Scheibe befinden! Beachten Sie: Einfluß des Abstandes von der Drehachse, Radialkraft, Reibungskraft, Bahngeschwindigkeit, Trägheitsgesetz!

101. Welche Unterschiede bestehen zwischen einer Kreisbewegung und einer Drehbewegung?
102. Stellen Sie technische Beispiele zusammen, bei denen Körper Drehbewegungen ausführen!
103. Wird die Radialkraft, die einen Körper auf die Kreisbahn zwingt, Null, so bewegt sich der Körper tangential weiter.
Beim Arbeitsschutz muß diese physikalische Gesetzmäßigkeit beachtet werden. Welche Arbeitsschutzmaßnahmen in dieser Hinsicht sind Ihnen aus Ihrer produktiven Arbeit bekannt?
104. Wann wird eine Bewegung als beschleunigt bezeichnet?
105. Warum ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung?
106. Welche Richtung hat bei einer Kreisbewegung
a) die Radialkraft,
b) die Radialbeschleunigung?
107. Begründen Sie, ob bei gleichbleibendem Bahnradius die auf einen Körper wirkende Radialkraft
a) zunimmt oder
b) abnimmt,
wenn die Bahngeschwindigkeit größer wird!
108. Ein Eisenbahnzug durchfährt eine Kurve von 500 m Radius mit einer Geschwindigkeit von 60 $\frac{km}{h}$. Wie groß muß die Radialkraft sein, die auf einen Waggon mit einer Masse von 25 t wirkt? Angabe in Kilopond!
109. Auf Kreisbahnen mit unterschiedlichem Radius bewegen sich zwei Körper. Der eine benötigt bei einem Bahnradius von 13 cm für einen Umlauf 2,1 s, der andere bei einem Bahnradius von 39 cm eine Zeit von 12,6 s für zwei Umläufe. Welcher der beiden Körper besitzt die größere Bahngeschwindigkeit?
110. Eine Modelleisenbahn durchfährt einen Schienenkreis mit einem Radius von 0,38 m in 2 Minuten zwölfmal. Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit?

Die Gravitation (Seite 54 bis 63)

111. Bereiten Sie an Hand des Buches „Weltall – Erde – Mensch" einen Vortrag über die Bewegung der Planeten vor!
112. Warum ist die Geschwindigkeit eines Planeten bei seinem Umlauf um die Sonne unterschiedlich groß?
113. Wie groß ist die Kraft, mit der sich zwei Bleikugeln von je 100 kg anziehen, wenn ihre Mittelpunkte 1 m voneinander entfernt sind?
114. Warum bewegt sich die Erde auf einer Ellipsenbahn um die Sonne?
115. Wie groß ist die Gravitationskraft der
(N) Erde auf ein Raumschiff mit einer Masse von 8000 kg, das auf einer Kreisbahn mit einem Radius von 6700 km die Erde umkreist? (Eine Erdumkreisung dauert 91 min. Die Erdmasse beträgt $5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg.) Angabe in Newton und in Kilopond!
116. Berechnen Sie die Kraft, mit der die Erde einen an der Erdoberfläche befindlichen Körper der Masse 1 kg anzieht! Masse der Erde: $6 \cdot 10^{24}$ kg, Erdradius: 6370 km.
117. Warum ist der Einfluß des Gravitationsfeldes des Mondes auf die Erde gering?
118. Wie groß ist die Kraft, mit welcher der
(N) Mond einen Körper mit der Masse 100 kg an seiner Oberfläche anzieht? (Mondmasse: $7{,}35 \cdot 10^{22}$ kg, Mondradius: 1738 km.) Angabe in Kilopond!
119. In Bild 147/1 ist die Gravitationskraft angegeben, die auf den gleichen Körper an verschiedenen Stellen des Gravitationsfeldes des Mondes wirkt. Erläutern Sie die unterschiedliche Richtung und den unterschiedlichen Betrag der Kraft!

Bild 147/1 zu 119.



*120. Berechnen Sie die Masse der Erde mit Hilfe folgender Gleichungen: $G = m \cdot g$; $G = \gamma \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}$! Hierbei ist m die Masse eines beliebigen Körpers (die nicht bekannt zu sein braucht), M die gesuchte Erdmasse, R der Erdradius ($6{,}37 \cdot 10^6$ m). Anleitung: Eliminieren Sie G und m und lösen Sie die Gleichung nach M auf!

121. Stellen Sie eine Übersicht über sowjetische Erstleistungen in der Raumfahrt zusammen! Benutzen Sie dazu folgende Literatur: *Meyers Taschenlexikon:* Raketentechnik – Raumfahrt, VEB Bibliographisches Institut Leipzig 1967; *Pfaffe, H. und Stache, P.:* Typenbuch der Raumflugkörper, Deutscher Militärverlag Berlin 1964; *Weltall – Erde – Mensch*, Berlin 1969; *Mielke, H.:* Zu neuen Horizonten, transpress Verlag, Berlin 1967.

122. Welche Auswirkungen hat die Raumfahrt auf andere Zweige der Wissenschaft und der Technik? Werten Sie zur Beantwortung Zeitschriften und Zeitungen aus!

123. Wie ändert sich die Fallbeschleunigung (eine vektorielle Größe!) mit wachsendem Abstand von der Erdoberfläche?

124. Warum ist die Gewichtskraft des gleichen Körpers auf der Erde, auf dem Mond und auf dem Mars unterschiedlich groß?

125. Worauf sind die großen Erfolge der Sowjetunion in der Weltraumfahrt zurückzuführen? Welche Rückschlüsse ergeben sich daraus auf den Stand von Wissenschaft und Technik in der Sowjetunion?

126. Veranschaulichen Sie durch eine modellmäßige Anordnung (Stativmaterial!) ein Experiment zur Bestimmung der Gravitationskonstanten und erläutern Sie es!

Zur Wiederholung (Seite 64 bis 66)

127. Welche Änderungen der Geschwindigkeit treten bei der Fahrt eines PKW (Bild 148/1) auf? Welche Kräfte sind wirksam? Was wird durch sie verursacht?

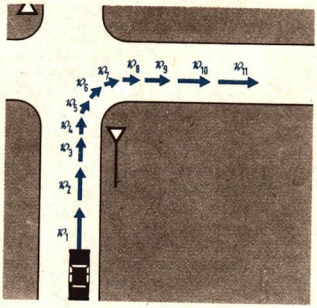
128. Welche Bewegungsarten liegen bei folgenden Bewegungen in bezug auf Kräfte und Geschwindigkeiten vor:
a) Start einer Rakete (senkrecht),
b) Umlauf eines Erdsatelliten auf einer Ellipsenbahn,
c) Fahrt eines Rodelschlittens auf einer geneigten Ebene,
d) Bremsen eines Eisenbahnzuges auf gerader Strecke,
e) Verschieben des Supports einer Drehmaschine.
f) freier Fall eines Fallschirmspringers?

*129. Ein Radfahrer, dessen Masse 60 kg beträgt, (N) wird durch eine konstante Kraft beschleunigt (z. B. Bergabfahrt). Nach 10 s hat er einen Weg von 50 m zurückgelegt. Wie groß ist die wirkende Kraft, wenn die Masse des Fahrrades 25 kg beträgt? (Reibung und Luftwiderstand bleiben unberücksichtigt!) Angabe in Newton und in Kilopond!

130. Ein fallender Körper mit einer Masse von 8 kg hat 2 m über dem Erdboden eine Geschwindigkeit von $3\,\frac{m}{s}$.
(N) a) Wie groß ist seine kinetische Energie?
b) Wie groß ist seine potentielle Energie?
c) Wie groß ist seine Gesamtenergie?
d) Mit welcher Geschwindigkeit trifft er auf den Erdboden auf?
e) Welche Bewegungsart liegt vor?

131. Der Rammbär einer Ramme (Masse $m = 500$ kg) fällt aus einer Höhe von 3,2 m frei herab. (Die Reibungskraft sei Null!)
a) Wie groß ist die Geschwindigkeit beim Auftreffen?
(N) b) Wie groß ist die kinetische Energie?
c) Wie groß ist die Gesamtenergie an einer beliebigen Stelle der Fallstrecke?

Bild 148/1 zu 127.



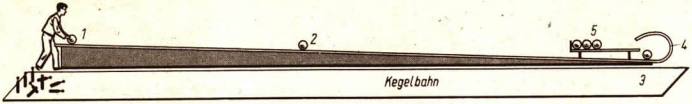


Bild 149/1 zu 132.

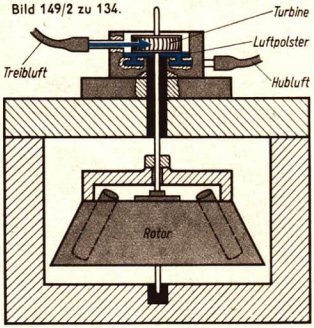
132. Bild 149/1 zeigt eine Anlage zur Rückbeförderung von Kegelkugeln. Beschreiben Sie in einer Niederschrift die einzelnen Phasen des Rücklaufes der Kugel unter Verwendung der Begriffe Hubarbeit, Beschleunigungsarbeit, Bewegungsart, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Gewichtskraft, Kraft, Radialkraft, Radialbeschleunigung, kinetische Energie, potentielle Energie, Reibungsarbeit, Wärmeenergie, Satz von der Erhaltung der Energie!

133. Folgende physikalische Aussagen sind *falsch, unvollständig* oder *nur unter bestimmten Bedingungen gültig*. Formulieren Sie richtig! Wenn Sie unsicher sind, so arbeiten Sie vorher nochmals die angegebenen Lehrbuchabschnitte durch!
- Eine Bewegung ist beschleunigt, wenn sich der Betrag der Geschwindigkeit ändert (↗ Kreisbewegung).
- Wirkt auf einen Körper eine Kraft von konstantem Betrag, so bewegt er sich *stets* geradlinig (↗ Kreisbewegung).
- Die Arbeit ist maximal, wenn die Kraft *senkrecht* zur Wegrichtung wirkt (↗ Arbeit).
- Damit sich ein Körper geradlinig gleichförmig bewegt, muß auf ihn eine konstante Kraft wirken (↗ Trägheitssatz).
- Die Summe aus potentieller und kinetischer Energie ist stets konstant (↗ Energie).
- Durch Reibungsvorgänge geht Energie verloren (↗ Energiesatz).
- Die Bahnkurve des Mittelpunktes eines Speers ist eine Wurfparabel (↗ Wurf).
- Ein Stein fällt schneller als ein Blatt Papier (↗ freier Fall).

134. Bild 149/2 zeigt eine Ultrazentrifuge, die für wissenschaftliche Untersuchungen benutzt wird. Der Rotor führt etwa 60000 Umdrehungen in einer Minute aus.
Zum Schutz des Bedienungspersonals sind besondere Maßnahmen erforderlich. Würde beispielsweise der Rotor durch einen Materialfehler zerstört, so würden die wegfliegenden Bruchstücke Schäden anrichten.
Geben Sie an
a) die Bahngeschwindigkeit eines Teils des Rotors mit einer Masse von 100 g in einer Entfernung von 65 mm von der Drehachse,
b) die auf das Teil wirkende Radialkraft in Kilopond,
c) die Geschwindigkeit, mit der das abgerissene Teil tangential wegfliegt,
d) die kinetische Energie des abgerissenen Teils in Kilopondmeter!

135. Auf einer in einem hügeligen Gelände verlaufenden Straße hat ein Radfahrer nach einer Abfahrt eine Geschwindigkeit von $48\ \frac{km}{h}$. Ohne zu treten rollt er nunmehr eine Steigung hinauf. (Die Masse des Fahrers und des Rades beträgt 85 kg.)
a) Welchen Höhenunterschied würde er bis zum Stillstand erreichen, wenn man die Reibung unberücksichtigt läßt?
(N) b) Wie groß ist die durchschnittliche (negative) Beschleunigung, wenn bis zum Stillstand des Rades eine Zeit von 15 Sekunden vergeht?
c) Welche Endgeschwindigkeit erreicht der Fahrer, wenn er wendet und die Steigung wieder hinabrollt? Die Reibung bleibe wiederum unberücksichtigt.

Bild 149/2 zu 134.



Elektrisches Feld (Seite 68 bis 81)

136. Mit welchen Mitteln kann man nachweisen, daß ein Körper geladen ist und welche Ladung er trägt?
137. Wie groß ist die während einer Stunde durch eine Glühlampe mit einer Leistung von 40 W fließende Ladung (Betriebsspannung 220 V)?
138. Erläutern Sie die Wirkungsweise eines Elektrometers!
139. Bei welchen Vorgängen des täglichen Lebens sind Ladungstrennungen und Kräfte zwischen elektrischen Ladungen zu beobachten?
140. Drei elektrische Ladungen gleichen Betrages befinden sich an den Eckpunkten eines gleichschenklig/rechtwinkligen Dreiecks ABC (Bild 150/1). Bestimmen Sie die Richtung der Kraft, die auf die Ladung im Punkte C ausgeübt wird,
a) wenn sämtliche Ladungen positiv sind,
b) wenn die Ladungen in A und C positiv sind und die Ladung in B negativ ist!
141. Die Kugeln eines Doppelpendels tragen gleich große elektrische Ladungen. Die Gewichtskraft der Kugeln beträgt je 0,02 N. Wie groß ist die Abstoßungskraft, wenn der Winkel zwischen den Fäden 40° beträgt (Bild 150/2)? Ermitteln Sie das Ergebnis mit Hilfe einer Zeichnung!
142. Bei der Bestimmung der elektrischen Elementarladung werden sehr kleine elektrisch geladene Öltröpfchen in das elektrische Feld eines Plattenkondensators gebracht (Bild 150/3). Man beobachtet mikroskopisch, daß ein Tröpfchen von 0,6 μm Durchmesser im elektrischen Feld schwebt, wenn die Feldstärke 1240 N/A · s beträgt. Die Dichte des Öls ist 0,9 g/cm³. Wie viele Elementarladungen trägt dieses Öltröpfchen?
143. Zwischen einer kleinen positiv geladenen Kugel und einer ebenen negativ geladenen Metallplatte besteht ein elektrisches Feld. Skizzieren Sie einige Feldlinien!
144. Legen Sie auf die Feldlinienbilder 74/2 und 74/3 Pauspapier, und skizzieren Sie für mehrere Punkte den Feldstärkevektor!
145. Welche Ladung muß man einem Kondensator der Kapazität 0,01 μF zuführen, um ihn bis zu einer Spannung von 300 V zu laden?
146. Aus dem Diagramm Bild 150/4 ist zu entnehmen, welcher Zusammenhang zwischen Spannung und Ladung eines Kondensators besteht. Bestimmen Sie C!
*147. Zwei Kondensatoren gleicher Kapazität tragen verschiedene Ladungen. Zwischen den Platten bestehen die Spannungen $U_1 = 200$ V bzw. $U_2 = 300$ V. Welche Spannung stellt sich ein, wenn
a) die gleichnamig geladenen,
b) die ungleichnamig geladenen Platten beider Kondensatoren miteinander leitend verbunden werden?

Bild 150/1 zu 140.

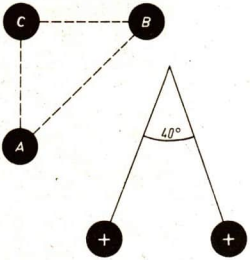


Bild 150/2 zu 141.

Bild 150/3 zu 142.

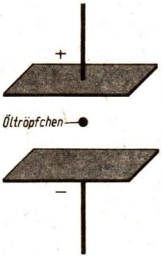
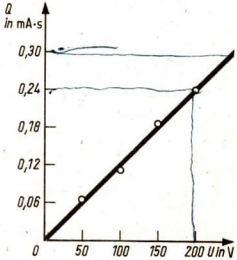


Bild 150/4 zu 146.



148. Erläutern Sie, welche Anzeige der empfindliche Strommesser liefert, während die Isolierstoffplatte durch den Kondensator fällt (Bild 151/1)!

149. Ein Luftkondensator wird aufgeladen und von der Spannungsquelle getrennt. Wie ändern sich Ladung und Spannung, wenn der Kondensator in ein Ölbad gebracht wird?

150. Welche Ladung enthält ein auf 220 V geladener Kondensator der Kapazität 1,5 μF?

151. Im elektrischen Feld eines Plattenkondensators mit horizontalen Platten schwebt eine geladene Seifenblase (Gewichtskraft 0,01 N). Die Feldstärke beträgt 10000 N/A · s. Welche Ladung trägt die Seifenblase?

152. Ein Kondensatormikrofon ist als ein Plattenkondensator zu betrachten, dessen eine Platte als Membran dient. Dieser Kondensator ist an eine Spannungsquelle angeschlossen (Bild 151/2). Erklären Sie, wie durch die ankommenden Schallwellen ein elektrischer Strom ausgelöst wird!

153. Welche Geschwindigkeit erreicht ein Elektron, das in einem elektrischen Feld beschleunigt wird und hierbei eine Spannung von 100 V durchläuft? Die Masse eines Elektrons beträgt $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g.
Anleitung: Die vom Feld verrichtete Arbeit wird in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt!

154. Hängen Sie eine offene Blechdose an zwei Seidenfäden auf! Berühren Sie mehrmals mit einem elektrisch geladenen Kamm oder einem anderen Plastgegenstand die Innenwand der Dose! Nähern Sie danach ihren Finger der Außenwand der Dose! Wiederholen Sie den Versuch, berühren Sie aber dabei das Innere der Dose! Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen!

155. Fertigen Sie ein elektrisches Doppelpendel an! Untersuchen Sie damit die elektrische Ladung einiger Körper, die durch Reiben eine Ladungstrennung erfahren haben!

156. Bringen Sie einen elektrisch geladenen Plastkörper in die Nähe eines schwachen Wasserstrahls, der senkrecht aus einem Wasserhahn fließt! Erklären Sie die beobachtete Erscheinung!

157. Überlegen Sie, auf welche Weise mit Hilfe eines Kondensators Längenmessungen durchgeführt werden können!

Magnetisches Feld (Seite 82 bis 95)

158. In welche Richtung stellt sich eine Magnetnadel ein, die in den angegebenen Punkten (Bild 151/3) aufgestellt wird? (Der Einfluß des Erdfeldes kann vernachlässigt werden.)

159. Beschreiben Sie den Aufbau eines Marschkompasses!

160. Wie wird eine Karte eingenordet?

161. Wie überträgt man eine im Gelände ermittelte Richtung auf die Karte?

*162. Von zwei Stahlstäben mit gleichem Aussehen ist der eine ein Dauermagnet. Wie kann man ohne weitere Hilfsmittel feststellen, welcher der beiden Stäbe magnetisch ist?

Bild 151/1 zu 148.

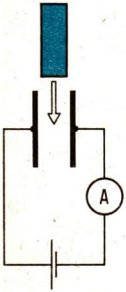


Bild 151/2 zu 152.

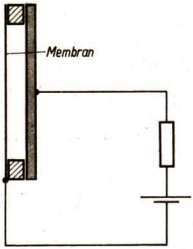
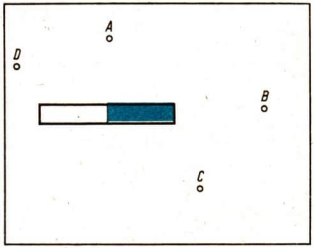


Bild 151/3 zu 158.



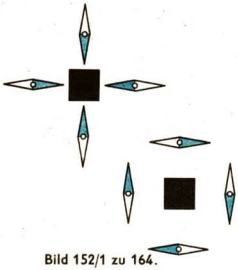


Bild 152/1 zu 164.

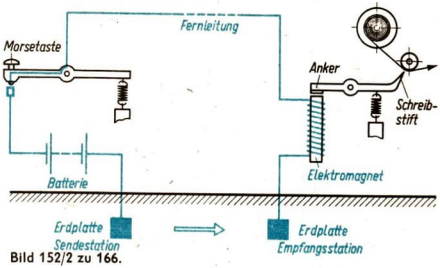


Bild 152/2 zu 166.

163. Wie würde sich eine um alle drei Achsen drehbare Magnetnadel am magnetischen Südpol der Erde einstellen?
164. In der Umgebung der „schwarzen Kästen" (black box) nimmt eine Magnetnadel die gezeichneten Stellungen ein. Was läßt sich über den Inhalt der Kästen aussagen (Bild 152/1)?
165. Skizzieren Sie die magnetischen Feldlinien in der Umgebung einer stromführenden Leiterschleife!
166. Erläutern Sie die Arbeitsweise eines Morsetelegrafen (Bild 152/2)!
167. Bei der Anwendung einer elektromagnetischen Saatgutreinigungsanlage wird das Saatgut mit einer geringen Menge feuchten Eisenpulvers vermengt. Dieses haftet nur an den rauhen Unkrautsamen. Überlegen Sie, wie eine solche Maschine gebaut sein könnte!
168. Entwerfen Sie die Konstruktion und Schaltung eines elektromagnetischen Türöffners!
169. Das eine Ende eines zur Schraubenfeder gewickelten elastischen Leiters ist an einem Stativarm befestigt, das andere Ende taucht in eine mit Quecksilber gefüllte Schale (Bild 152/3). Was wird man nach dem Einschalten des Stromes beobachten können?
170. Ein Schleifenoszillograf arbeitet ähnlich wie ein Drehspulmeßinstrument. Erklären Sie an Hand der schematischen Darstellung im Bild 152/4 die Wirkungsweise dieses Meßgeräts!
171. Bei einem Vielfachmeßgerät kann der

Bild 152/3 zu 169.

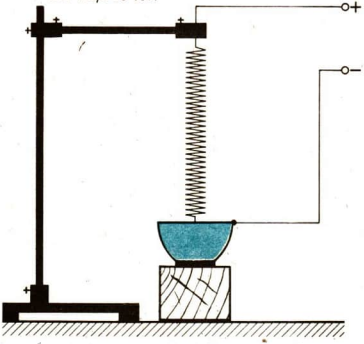


Bild 152/4 zu 170.

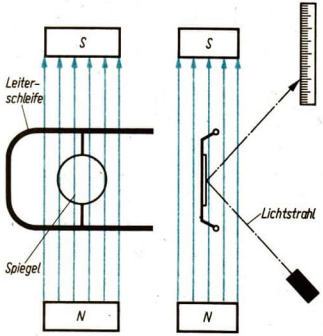


Bild 153/1 zu 171.

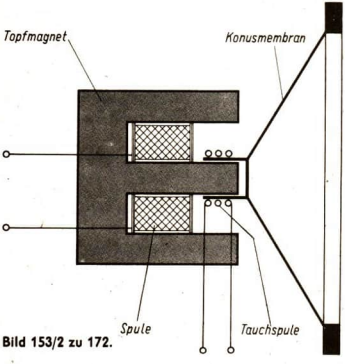


Bild 153/2 zu 172.

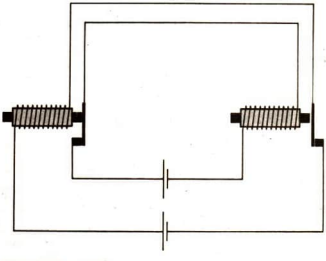


Bild 153/3 zu 173.

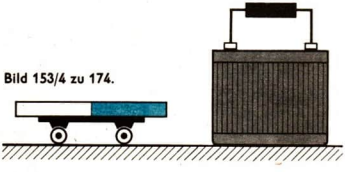


Bild 153/4 zu 174.

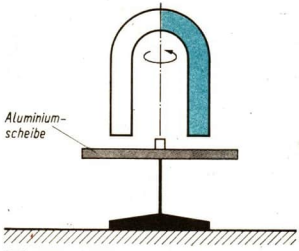


Bild 153/5 zu 176.

Meßbereich durch Zuschalten von Vor- und Nebenwiderständen nach Bedarf verändert werden. Bild 153/1 zeigt die Skale eines solchen Instruments. Bestimmen Sie die Stromstärken und Spannungen für die folgenden Anzeigen des Instruments:

Meßbereich	Anzeige in Skalenteilen
6 A	27
15 V	12
3 mA	18
150 V	21
60 mA	12

172. Der Aufbau eines elektrodynamischen Lautsprechers wird in Bild 153/2 erläutert. Beschreiben Sie die Arbeitsweise!
173. Diskutieren Sie, welche Vorgänge in der Relaisschaltung (Bild 153/3) stattfinden, wenn die Spannungen zunächst einzeln, nacheinander und dann gleichzeitig angelegt werden!

Elektromagnetische Induktion (Seite 96 bis 107)

174. Weshalb führt der Wagen mit den Magneten (Bild 153/4) eine verzögerte Bewegung aus, auch wenn die Einflüsse der Reibung und des magnetischen Feldes der Erde vernachlässigt werden?
175. Welche Rolle spielt die elektromagnetische Induktion beim Magnettongerät?
176. Über einer leicht drehbar gelagerten Aluminiumscheibe wird ein Hufeisenmagnet gedreht (Bild 153/5). Weshalb beginnt die Scheibe sich mitzudrehen?

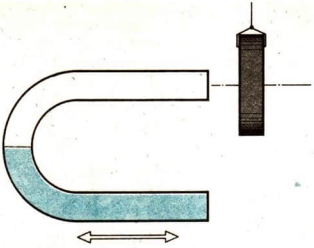


Bild 154/1 zu 177.

177. Wie verhält sich der Aluminiumring (Bild 154/1), wenn der Hufeisenmagnet genähert und wieder entfernt wird?
178. Um den erhöhten Bedarf an Elektroenergie während der Spitzenbelastungszeiten zu decken, werden Pumpspeicherwerke eingesetzt. In den Nachtstunden pumpen diese Wasser in ein hochgelegenes Speicherbecken. Während der Spitzenbelastungszeit dient dieses Wasser zum Antrieb einer Turbine. Pumpen und Turbine sind nacheinander mit derselben elektrischen Maschine, dem Motor-Generator verbunden. Entwerfen Sie eine schematische Darstellung einer solchen Anlage, und erläutern Sie die einzelnen Energieumwandlungen!
179. Der Aufbau eines elektrodynamischen Tonabnehmers ist in Bild 154/2 dargestellt. Beschreiben Sie die Wirkungsweise!

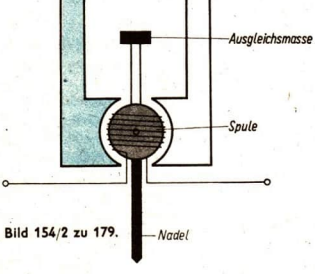


Bild 154/2 zu 179.

Elektrische Leitungsvorgänge (Seite 108 bis 120)

180. Erläutern Sie das Bild 108/2!
181. Was versteht man unter *ionisieren?*
182. Beschreiben Sie die verschiedenen Arten der chemischen Bindungen (Ionenbeziehung, Atombindung, Metallbindung)!
183. Wodurch unterscheidet sich der Zusammenhalt der Teilchen in einem Germaniumkristall und in einem Kochsalzkristall?
184. Wie verhalten sich die Außenelektronen von Metallatomen bei der Metallbindung?
185. Wie kann ein Ladungsausgleich zwischen unterschiedlich geladenen Elektroden erfolgen?
186. Vergleichen Sie die Versuche 51 bis 54 auf den Seiten 110 und 111 zum Nachweis der elektrischen Leitung in Metallen, Halbleitern, Elektrolyten, Gasen und im Vakuum!
187. Erläutern Sie das allgemeine Modell des elektrischen Leitungsvorganges!
188. Erklären Sie mit Hilfe des allgemeinen Modells des elektrischen Leitungsvorganges die Leitung in Metallen!
189. Entwerfen Sie eine Schaltung zur Aufnahme einer *I-U*-Kennlinie von Widerständen!
190. Warum erhöht sich der Widerstand eines metallischen Leiters bei Temperaturerhöhung?
191. Entwerfen Sie eine Schaltung zur Temperaturmessung mit Hilfe eines Widerstandsthermometers!
192. Erklären Sie die elektrische Leitung im Elektrolyten mit Hilfe des allgemeinen Modells des elektrischen Leitungsvorganges!
193. Wie dissoziieren NaCl und $CuSO_4$?
194. Beschreiben Sie den Vorgang der elektrolytischen Abscheidung von Kupfer aus einer Kupfersulfatlösung! Welche technische Anwendung findet dieses Verfahren?
195. Warum wird bei dem in der vorhergehenden Aufgabe beschriebenen Verfahren nicht mit Wechselstrom gearbeitet?
196. Unter welchen Bedingungen kommt eine elektrische Leitung in Gasen zustande?
197. Unter welchen Bedingungen kann man Ladungsträger in Gasen erzeugen?
198. Erläutern Sie die Zunahme der Anzahl von Ladungsträgern durch Stoßionisation!

*199. Erklären Sie, warum der Beginn der Stoßionisation vom Druck des Füllgases abhängt!

200. Welche Voraussetzungen ermöglichen eine Leitung im Vakuum?

201. Erklären Sie den Begriff *Glühemission*!

202. Was versteht man unter der *Fotoemission?*

203. Wie kommt die Fotoemission zustande?

*204. Welche Unterschiede bestehen beim Transport von positiven Ladungsträgern im Elektrolyten und im Halbleiter?

205. Was versteht man unter Eigenleitung von Halbleitern? Wenden Sie zur Erklärung das allgemeine Modell des elektrischen Leitungsvorganges an!

*206. Welche Auswirkung kann die Konzentration von Ladungsträgern auf den Widerstand von Halbleitern haben?

207. Erläutern Sie die Störstellenleitung von Halbleitern!

208. Wie kommt es, daß bei Halbleitern der Widerstand bei Erhöhung der Temperatur kleiner wird?

209. Begründen Sie das unterschiedliche elektrische Verhalten von Metallen und Halbleitern bei Temperaturerhöhung!

210. Beschreiben Sie eine Vorrichtung zur Temperaturmessung mit Hilfe eines Halbleiterwiderstandes!

Anwendung elektrischer Leitungsvorgänge (Seite 121 bis 133)

211. Erklären Sie den Aufbau einer Röhrendiode und deren Arbeitsweise! Wenden Sie das allgemeine Modell des elektrischen Leitungsvorganges an!

212. Wie kommt die Gleichrichterwirkung einer Röhrendiode zustande?

213. Welchen Einfluß hat die Raumladung auf die Elektronenemission?

214. a) Erläutern Sie die im Versuch 61 auf Seite 122 aufgenommene I_A-U_A-Kennlinie!
b) Erläutern Sie die Begriffe Raumladungsgebiet und Sättigungsgebiet!

215. a) Wie ist eine Röhrentriode aufgebaut?
b) Wie kommt die Steuerwirkung des Gitters zustande?
c) Wie würde sich die Anodenstromstärke bei zunehmender positiver Gitterspannung verhalten?

216. Werten Sie die im Versuch 62 auf Seite 125 aufgenommene I_A-U_G-Kennlinie einer Röhrentriode aus!

217. Erläutern Sie die Anwendung der Röhrendiode als Gleichrichter und der Röhrentriode als Steuerröhre!

218. Erklären Sie mit Hilfe des allgemeinen Modells die Leitungsvorgänge in der Elektronenstrahlröhre!

219. Auf welche Weise kann der Elektronenstrahl in der Elektronenstrahlröhre aus seiner Richtung abgelenkt werden?

220. Unter welchen Umständen kann mit Hilfe des Wehneltzylinders die Intensität des Elektronenstrahls gesteuert werden?

*221. Beschreiben Sie Anwendungen von Elektronenstrahlröhren!

222. Skizzieren Sie und erklären Sie die Schaltung einer Vorrichtung zur elektronischen Zählung von Werkstücken!

223. Erklären Sie den Leitungsvorgang in einer Halbleiterdiode!

224. Vergleichen Sie die Wirkungsweisen von Halbleiterdioden und Röhrendioden!

225. Erläutern Sie an Hand des I_K-I_B-Diagramms die Steuerwirkung von Transistoren!

226. Vergleichen Sie die Steuerwirkung eines Transistors mit der einer Röhrentriode!

227. Die *I-U*-Kennlinie einer Glühlampe und eines Halbleiterwiderstandes sollen ausgewertet werden (Bild 133/1).
Welchen Verlauf nehmen die Kennlinien? Was kann man aus dem Verlauf über die Temperaturabhängigkeit entnehmen?

228. Zwei Festkörperwiderstände, die sich äußerlich nicht unterscheiden, sollen auf ihre mögliche stoffliche Beschaffenheit hin untersucht werden. Dazu bringt man beide jeweils in ein Wasserbad und mißt ihren elektrischen Widerstand bei verschiedenen Temperaturen. Am Widerstand A mißt man bei 20 °C und einer angelegten Spannung von $U = 20$ V eine Stromstärke von $I = 0{,}1$ A; bei 90 °C und gleicher Spannung eine Stromstärke von $I = 0{,}09$ A. Am Widerstand B mißt man bei 20 °C und einer angelegten Spannung von $U = 10$ V eine Stromstärke von $I = 20$ mA, bei 90 °C und gleicher Spannung eine Stromstärke von $I = 30$ mA.
Welcher der beiden Widerstände ist aus einem metallischen Werkstoff, welcher aus einem Halbleiterwerkstoff aufgebaut?

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung — M 1

Aufgabe

Bestimmen Sie die Zeit t für verschiedene Wege s bei der Bewegung eines Körpers auf der geneigten Ebene!

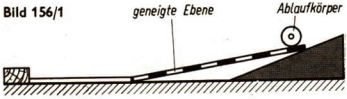
Vorbetrachtungen

1. Welche Bewegungsarten kennen Sie?
2. Wie lautet das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung? (↗ LB 9, S. 14)
3. Welche Bewegungen heißen beschleunigt?

Geräte und Hilfsmittel

Geneigte Ebene (Bild 156/1)
Ablaufkörper (z. B. Kugel, Zylinder)
Meßskale
Stoppuhr

Bild 156/1



Arbeitsanweisung

1. Messen Sie dreimal die Zeit t, die der Ablaufkörper zum Zurücklegen des Weges $s = 0{,}5$ m benötigt! Berechnen Sie den Mittelwert der Zeit t und tragen Sie diesen in die letzte Zeile der Tabelle 1 ein!
2. Wiederholen Sie die Messungen für die Wege $s = 1{,}0$ m, $s = 1{,}5$ m und $s = 2{,}0$ m!
3. Tragen Sie die Größen in ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein (Bild 156/2)! Zeichnen Sie die Funktionskurve $s = f(t)$!
4. Vergleichen Sie die konstruierte Kurve mit der Kurve $s = f(t)$! für die geradlinige, gleichförmige Bewegung (Bild 156/3)!

Protokoll M 1

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Fragen der Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...
3. ...

Skizze:

Meßwerte und Berechnungen:

Tabelle 1

Weg s in m	0,5	1,0	1,5	2,0
Messung	Zeit t in s	Zeit t in s	Zeit t in s	Zeit t in s
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
Summe t	...	...	...	...
Mittelwert t_m	...	...	...	...

Bild 156/2

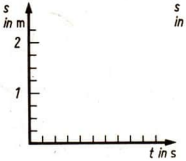
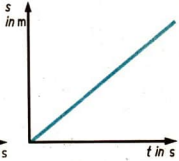


Bild 156/3



Zusammensetzung zweier Kräfte

M2a

Aufgabe

Ermitteln Sie die resultierende Kraft zweier Kräfte, deren Wirkungslinien einen Winkel von 90° einschließen!

Vorbetrachtungen

1. Wie können zwei Kräfte zu einer resultierenden Kraft zusammengesetzt werden? Wiederholen Sie die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten (↗ LB S. 28)!
2. Betrachten Sie Bild 157/1! Beachten Sie bei der experimentellen Ermittlung der resultierenden Kraft folgende Besonderheiten: Gesucht ist die resultierende Kraft F_R, die im Angriffspunkt die gleiche Wirkung ausübt wie die beiden Kräfte F_1 und F_2 zusammen. Wir messen aber nicht die resultierende Kraft F_R, sondern die Kraft $F_{R'}$, die sich zwar auf derselben Wirkungslinie befindet und den gleichen Betrag besitzt, aber entgegengesetzt gerichtet ist.
3. Welche Aufgabe haben die beiden festen Rollen?

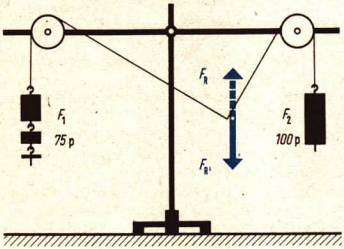
Geräte und Hilfsmittel

Stativfuß
2 Stativstäbe, 50 cm
3 Kreuzmuffen
2 Achszapfen
2 Rollen ∅ 40 mm
Satz Hakenkörper
2 Hakenkörper zu je 50 g
Faden, etwa 120 cm
Zeichendreieck
oder
2 Stativfüße oder Tischklemmen
2 Stativstäbe, 50 cm
2 Ringe mit Haken
2 Rollen mit Haken
Hakenkörper
Faden, etwa 120 cm lang
Zeichendreieck

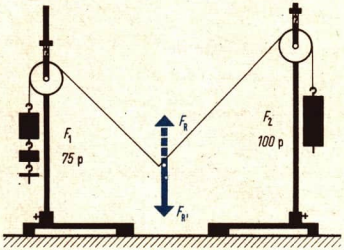
Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Protokoll vor! Legen Sie die Tabelle nach dem Muster der Tabelle 1 an!
2. Bauen Sie eine der beiden Versuchsanordnungen nach Bild 157/1 und 157/2 auf!
3. Hängen Sie in die Mitte des Fadens so lange Hakenkörper an, bis sich bei einem Seilwinkel von 90° Gleichgewicht einstellt! Verwenden Sie zur Kontrolle des Seilwinkels ein Zeichendreieck!
4. Tragen Sie die resultierende Kraft in die Tabelle ein!
5. Vergleichen Sie die Summe der Beträge der angreifenden Kräfte mit dem Betrag der resultierenden Kraft!
6. Ermitteln Sie die resultierende Kraft zeichnerisch!
7. Vergleichen Sie das Ergebnis des Experiments mit dem der Zeichnung!
8. Geben Sie eventuelle Fehlerquellen an! Übernehmen Sie das Zutreffende in Ihr Protokoll!
   a) Reibung zwischen Faden und Rolle,
   b) Reibung zwischen den Achsen und Rollen,
   c) Änderung der Zimmertemperatur,

Versuchsaufbau 1
Bild 157/1



Versuchsaufbau 2
Bild 157/2



d) Strichstärke des Bleistifts,
e) Ungenaues Antragen des Winkels,
f) Ungenauigkeiten des Zeichendreiecks.

Protokoll M 2 a

Zusammensetzung zweier Kräfte

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1. ...
3. ...

Meßwerte und Vergleich:

Tabelle 1

α in °	F_1 in p	F_2 in p	F_R in p
90	75	100	...

Vergleich: ...

Zeichnerische Ermittlung der resultierenden Kraft:

Kräftemaßstab: 1 mm ≙ ... p; F = ... p

Vergleich und Fehlerbetrachtung:

Vergleich: ...
Fehlerquellen: ...

Zerlegung einer Kraft — M2b

Aufgabe

Ermitteln Sie die Hangabtriebskraft F_H und die Normalkraft F_N eines Körpers auf einer geneigten Ebene bei einem Neigungswinkel α von 30°!

Vorbetrachtungen

1. Geben Sie die Richtungen der Teilkräfte an, in die die Gewichtskraft eines auf einer geneigten Ebene befindlichen Körpers zerlegt werden kann!

Geräte und Hilfsmittel

Brett für geneigte Ebene
Walze
Drahtbügel für Walze
Federkraftmesser 0 bis 1 kp
Ring mit Haken
Kreuzmuffe mit Achszapfen oder Ring mit Haken
Stativstab 50 cm
Stativfuß
Zeichenwinkel 30°

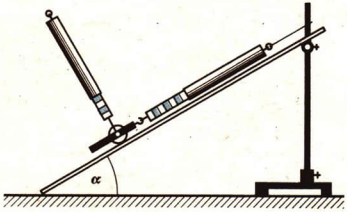


Bild 158/1

Arbeitsanweisung

1. Bauen Sie die Versuchsanordnung (Bild 158/1) auf! Beachten Sie: der Neigungswinkel α soll 30° betragen (Zeichendreieck)!
2. Legen Sie eine Tabelle nach dem Muster der Tabelle 1 an!
3. Bestimmen Sie durch Messung die Gewichtskraft G der Walze!
4. Bestimmen Sie die Hangabtriebskraft F_H! (Hinweis: Die Walze darf beim Messen nicht bewegt werden.)
5. Bestimmen Sie die Normalkraft F_N! (Drahtbügel verwenden! Federkraftmesser senkrecht zur geneigten Ebene halten.)

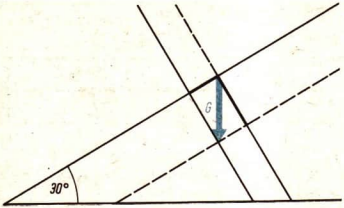


Bild 159/1

6. Vergleichen Sie die Gewichtskraft der Walze mit der Hangabtriebskraft und der Normalkraft! Notieren Sie Ihre Antwort in einem Satz!
7. Ermitteln Sie zeichnerisch die Hangabtriebskraft und die Normalkraft (Kräfteparallelogramm, Bild 159/1)!
8. Legen Sie eine Tabelle nach dem Muster der Tabelle 2 an! Tragen Sie die Ergebnisse des Experiments und der Konstruktion ein!
9. Vergleichen Sie die Ergebnisse! Notieren Sie Ihre Antwort in einem Satz!
10. Geben Sie Fehler für die Unterschiede zwischen den durch Messung und durch Zeichnung ermittelten Werten an! Übernehmen Sie das Zutreffende in Ihr Protokoll (Angabe durch die entsprechenden Buchstaben)!
    a) Ungenauigkeit des Federkraftmessers,
    b) Federkraftmesser klemmt,
    c) ungenaues Ablesen am Federkraftmesser,
    d) Reibung zwischen Walze und Brett,
    e) Strichstärke des Bleistifts,
    f) ungenaues Antragen des Winkels.

Protokoll M 2 b

Zerlegung einer Kraft

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...

Versuchsskizze:

Meßwerte und Vergleich:

Tabelle 1

Neigungswinkel α in °	Gewichtskraft G in p	Hangabtriebskraft F_H in p	Normalkraft F_N in p
...	...	...	...

Vergleich: ...

Zeichnerische Ermittlung der Kräfte:

Kräftemaßstab: 1 mm ≙ ... p; G = ... p

Vergleich und Fehlerbetrachtung:

Tabelle 2

Experiment		Konstruktion	
F_H in p	F_N in p	F_H in p	F_N in p
...	...	...	...

Vergleich: ...
Fehler: ...

Aufbau einer Klingelschaltung — E 1a

Aufgabe

Bauen Sie das Modell einer elektrischen Klingel aus Aufbauteilen auf!

Vorbetrachtungen

1. Wie kann die wirkende Kraft eines Elektromagneten vergrößert werden? (Überlegen Sie, wovon die Stärke des Magnetfeldes abhängt!)
2. Vervollständigen Sie die Aufbauskizze für die Klingelschaltung (Bild 160/1), und entwickeln Sie daraus ein Schaltbild!

Geräte und Hilfsmittel

Schülerstromversorgungsgerät
Schülervielfachmeßinstrument „Polyzet"
Spule mit 1000 (750, 250) Windungen
Taste

Grundbrett für Aufsteckteile
2 T-Füße (aus dem SEG „Optik")
2 Isolierstiele
Auflagebrett
I-Kern
dünner Nagel oder Stecknadel
2 Isolierklammern
Blattfeder (aus dem SEG „Kalorik")
Kontaktspitze
Achszapfen (Länge 80 mm, aus dem SEG „Mechanik")
Trichter (aus dem Glasgerätesatz)
Plastquader (aus dem SEG „Mechanik")
5 Verbindungsleiter

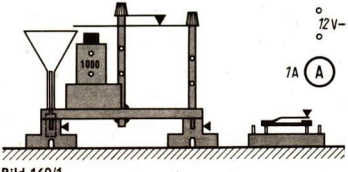


Bild 160/1

Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Bauen Sie nach der Aufbauskizze (Bild 160/1) die Klingelschaltung auf! Befestigen Sie die Spule mit den Isolierklammern am Plastquader!
3. Legen Sie an die Spule mit 1000 Windungen eine Spannung von 12 V an! Beachten Sie, daß die Blattfeder fest an die Kontaktspitze andrückt und die Blattfeder vom Eisenkern einen Abstand von etwa 3 mm hat!
4. Betätigen Sie die Taste! Lesen Sie die Stromstärke ab, wenn der Anker schwingt und dann, wenn Sie den Anker fest gegen die Kontaktspitze drücken! Erklären Sie Ihre Beobachtungen!
5. Vertauschen Sie die Anschlüsse am Stromversorgungsgerät! Was beobachten Sie? Wie ist das zu erklären?
6. Untersuchen Sie die Funktion der elektrischen Klingel in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung für die in Tabelle 1 angegebenen Spannungen bei Verwendung einer Spule mit 1000 Windungen!
   Anleitung: Der Strommesser ist mit einem Meßbereich bis 1 A zu benutzen!
7. Untersuchen Sie die Funktion der elektrischen Klingel in Abhängigkeit von der Windungszahl für die in Tabelle 2 angegebenen Spulen bei einer Spannung von 12 V!
   Anleitung: Der Strommesser ist aus dem Stromkreis zu entfernen!
8. Welche Funktion hat die Blattfeder bei der elektrischen Klingel! Aus welchem Material muß die Blattfeder sein? Warum?
9. Welche Ursachen können vorliegen, wenn die Klingel bei anliegender Spannung nicht funktioniert?

Protokoll E 1 a

Aufbau einer Klingelschaltung

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antwort zu der Vorbetrachtung:

1. ...

Beobachtungen und Ergebnisse:

1. Schwingender Anker $I = \ldots$
   Ruhender Anker $I = \ldots$
   Erklärung: ...
2. Beobachtung: ...
   Erklärung: ...

Tabelle 1

Spannung U in V	Stromstärke I in A	Beobachtung
12	...	Der Anker schwingt.
10	...	...
8	...	...
6	...	...

Tabelle 2

Windungszahl	Beobachtung
1 000	.....
750	.....
250	.....

3. Die Blattfeder: ...
4. Ursachen: ...

Aufbau von Relaisschaltungen

E 1b

Aufgabe

Bauen Sie eine Arbeits- und eine Ruhestromschaltung eines elektromagnetischen Relais auf!

Vorbetrachtungen

1. Wie kann die wirkende Kraft eines Elektromagneten vergrößert werden? (Überlegen Sie, wovon die Stärke des Magnetfeldes abhängt!)
2. Vervollständigen Sie für das Ruhestromkontaktrelais den Schaltplan (Bild 161/1, rechts)! Entwickeln Sie aus dem Schaltplan für das Arbeitsstromkontaktrelais die Aufbauskizze!
3. Nennen Sie weitere Anwendungsmöglichkeiten für einen Elektromagneten (↗ LB 9, S. 95)!

Geräte und Hilfsmittel

Schülerstromversorgungsgerät
Schülervielfachmeßinstrument
Spule mit 1000 (750, 250) Windungen
Taste
3 Grundbretter für Aufsteckteile
2 T-Füße (aus dem SEG „Optik")
2 Isolierstiele
Auflagebrett
Rundtisch (aus dem SEG „Optik")
I-Kern
dünner Nagel
2 Isolierklammern
Blattfeder (aus dem SEG „Kalorik")
Kontaktspitze
Elementenhalter für Monozelle
Monozelle 1,5 V
Glühlampe 1,8 V; 0,2 A
7 Verbindungsleiter

Arbeitsanweisung:

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Bauen Sie nach dem Bild 161/1 die Schaltung des Ruhestromkontaktrelais auf! Befestigen Sie die Spule mit den beiden Isolierklemmen am Rundtisch!
3. Schalten Sie zuerst den Steuerstromkreis! Benutzen Sie die Spule mit 1000 Windungen! Legen Sie eine Spannung von 10 V an!
4. Schalten Sie den zu steuernden Stromkreis! Beachten sie, daß die Blattfeder fest an die Kontaktspitze andrückt!
   Prüfen Sie durch Herabdrücken und Zurücklassen der Blattfeder die Funktion des zu steuernden Stromkreises!
5. Betätigen Sie die Taste! Lesen Sie die Stromstärke ab! Was beobachten Sie im zu steuernden Stromkreis?
6. Vertauschen Sie die Polung im Steuerstromkreis! Was beobachten Sie im zu steuernden Stromkreis?
7. Verringern Sie die Spannung im Steuerstromkreis von 10 V auf 8 V, 6 V und 5 V! Lesen Sie die Stromstärke ab! Was stellen Sie im zu steuernden Stromkreis fest?

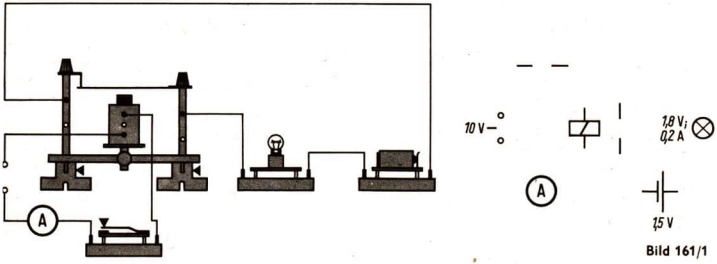
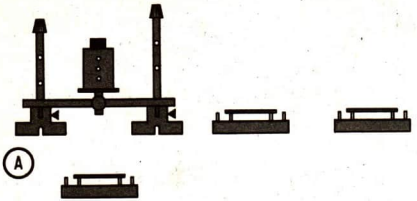


Bild 161/1



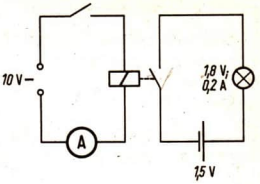


Bild 162/1

8. Arbeiten Sie mit einer Spannung von 10 V, und verringern Sie die Windungszahl der Spule auf 750 Windungen und anschließend auf 250 Windungen! Was stellen Sie im zu steuernden Stromkreis fest?
9. Bauen Sie die Schaltung für das Arbeitsstromkontaktrelais (Bild 162/1) auf! Schalten Sie zuerst den Steuerstromkreis ($U = 10$ V; 1000 Windungen)! Schalten Sie dann den zu steuernden Stromkreis! Prüfen Sie durch Herabdrücken und Zurücklassen der Blattfeder die Funktion des zu steuernden Stromkreises! (Der Abstand zwischen Kontaktspitze und Blattfeder soll etwa 3 mm betragen.)
10. Betätigen Sie die Taste! Lesen Sie die Stromstärke ab! Was beobachten Sie im zu steuernden Stromkreis?
11. Erklären Sie die Bezeichnungen „Ruhestromkontaktrelais" und „Arbeitsstromkontaktrelais"!
12. Wovon hängt die Funktionssicherheit eines Relais ab?

Protokoll E 1 b

Aufbau von Relaisschaltungen

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1. ...
3. ...

Beobachtungen und Ergebnisse:

$I = \ldots$

Spannung U in V	Stromstärke I in A	Beobachtung
10		
8		
6		
5		

Windungszahl	Beobachtung
1 000	
750	
250	

$I = \ldots$

Ruhestromkontaktrelais: ...

Arbeitsstromkontaktrelais: ...

Funktionssicherheit: ...

Aufnahme der I_A-U_G-Kennlinie einer Röhrentriode

E 2

Aufgabe

Nehmen Sie die I_A-U_G-Kennlinie der Röhrentriode EC 92 bei einer Anodenspannung $U_A \approx 40$ V auf!

Vorbetrachtungen

1. Skizzieren Sie den Aufbau einer Röhrentriode!
2. Erläutern Sie die Funktionen der Elektroden in einer Röhrentriode!
3. Stellen Sie als Vermutung den zu erwartenden Verlauf der I_A-U_G-Kennlinie in einem Diagramm dar (↗ LB 9, S. 125)!

Geräte und Hilfsmittel

Stromversorgungsgerät (6,3 V ∼; 0 ··· 10 V —; 42 V —)
Röhrenbrett EC 92 mit Triodenschablone
Röhre EC 92
2 Meßinstrumente (5 V —; 1 mA ··· 25 mA —)
Verbindungsleiter

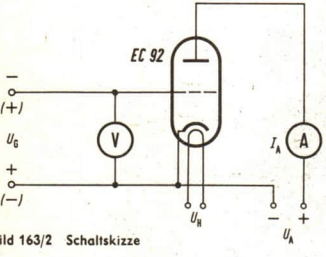


Bild 163/2 Schaltskizze

Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Meßprotokoll vor!
2. Bauen Sie entsprechend dem Schaltplan (Bild 163/2) die Schaltung für den Versuch auf! Vergleichen Sie den Aufbau mit dem vorgegebenen Aufbau im Bild 163/1!
3. Verwenden Sie als Spannungsquelle für Heiz-, Gitter- und Anodenstromkreis das Stromversorgungsgerät! (Heizung: U_H = 6,3 V∼; Gitterspannung: $U_G = 0 \cdots 10$ V—; Anodenspannung: $U_A \approx 40$ V—, Drehknopf am Stromversorgungsgerät auf Stellung „10") Die Anodenspannung wird als konstant angesehen und während des Versuchs nicht nachgestellt!

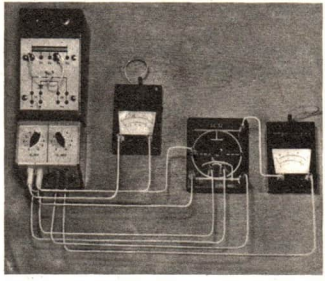


Bild 163/1 Versuchsaufbau

4. Lassen Sie die Schaltung vom Lehrer überprüfen!
5. Stellen Sie mit Hilfe des Drehknopfes am Stromversorgungsgerät Gitterspannungen von $U_G = -3$ V bis $U_G = -1$ V in Stufen $\Delta U = 0{,}5$ V und von $U_G = -1$ V bis $U_G = 0$ in Stufen $\Delta U = 0{,}2$ V ein! Lesen Sie jeweils die dabei auftretenden Anodenstromstärken I_A ab! Stellen Sie am Strommesser jeweils den zweckmäßigen Meßbereich so ein, daß Sie vom Meßbereich 25 mA auf den entsprechend kleineren übergehen!
6. Tragen Sie zusammengehörige Meßwertpaare U_G — I_A ein!
7. Stellen Sie die Kurve $I_A = f(U_G)$ in einem Diagramm dar!
8. Vergleichen Sie den Verlauf der aufgenommenen Kennlinie mit dem angenommenen Verlauf (Vermutung) und dem dargestellten Verlauf im Lehrbuch! (↗ LB 9, S. 125)
9. Begründen Sie die unter 8. erkennbaren Unterschiede!
10. Stellen Sie übersichtlich die möglichen Meßfehler zusammen!

Protokoll E 2

Aufnahme der I_A-U_G-Kennlinie einer Röhrentriode

Name: Klasse:

Antworten zu den Aufgaben der Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...
3. ...

Schaltplan:

Meßwerte: ($U_A \approx$ konstant)

U_G in ...	— 3,0	— 2,5	— 2,0	
I_A in ...				

Diagramm:

9:
10:

Aufnahme der I-U-Kennlinie einer Halbleiterdiode — E 3

Aufgabe

Ermitteln Sie die *I-U*-Kennlinie der Halbleiterdiode OA 625!

Vorbetrachtungen

1. Stellen Sie den Aufbau einer Halbleiterdiode dem Aufbau einer Röhrendiode gegenüber!
2. Vergleichen Sie den Ladungstransport in einer Halbleiterdiode mit dem Ladungstransport in einer Röhrendiode!
3. Stellen Sie als Vermutung den Verlauf der *I-U*-Kennlinie einer Halbleiterdiode in einem Diagramm qualitativ dar!

Geräte und Hilfsmittel

Stromversorgungsgerät (3 V—)
2 Grundbretter, 5- und 6-buchsig
Halbleiterdiode OA 625
Drehwiderstand (50 Ω; 50 W)
2 Meßinstrumente (1 V—; 1 mA ··· 10 mA—)
Brückenstecker, 20 mm
Verbindungsleiter

Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Meßprotokoll vor!
2. Bauen Sie entsprechend dem Schaltplan (Bild 164/1) die Schaltung für den Versuch auf! Vergleichen Sie den Aufbau mit dem vorgegebenen Aufbau im Bild 164/2!

Bild 164/1

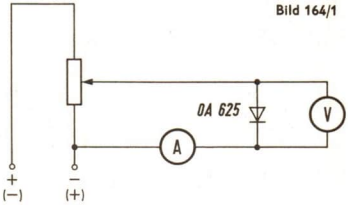
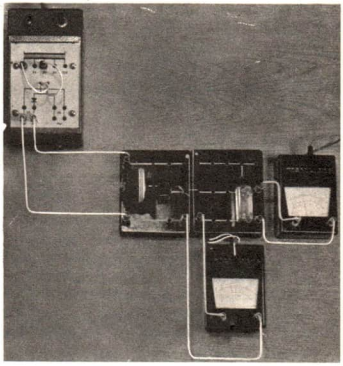


Bild 164/2



3. Verwenden Sie als Spannungsquelle das Stromversorgungsgerät! Beachten Sie, daß im Versuch eine Stromstärke von 10 mA nicht überschritten wird!
4. Lassen Sie die Schaltung vom Lehrer überprüfen!
5. Stellen Sie eine Spannung $U = 0{,}5$ V ein, und ermitteln Sie für jede Polung die Stromstärke I! (Meßbereich 1 mA wählen!)
6. Geben Sie an, woran die Katode der Halbleiterdiode zu erkennen ist! Legen Sie die Durchlaßrichtung der Halbleiterdiode fest!
7. Stellen Sie mit Hilfe des Drehwiderstandes die Durchlaßspannung von $U = 0$ bis $U = 1$ V in Stufen $\Delta U = 0{,}1$ V ein! Lesen Sie jeweils die dabei auftretende Stromstärke I ab!
8. Stellen Sie den Verlauf der Kurve $I = f(U)$ in einem Diagramm dar!
9. Vergleichen Sie den ermittelten Verlauf der Kennlinie mit dem als Vermutung angegebenen Verlauf!
10. Überlegen Sie, welche Fehler die Messungen beeinflussen können!

Protokoll E 3

Aufnahme der I-U-Kennlinie einer Halbleiterdiode

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Aufgaben der Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...
3. ...

Schaltplan:

Meßwerte:

$U = 0{,}5$ V: Polung 1 $I = \ldots$
Polung 2 $I = \ldots$

Die Katode der Halbleiterdiode erkennt man an ...

Die Durchlaßrichtung liegt bei Polung ... vor.

U in ...	0,0	0,1	0,2	
I in ...				

Diagramm:

Grundlagen der Kinematik

Seiten 138 bis 141

5. $v \approx 0{,}006\ \frac{m}{s}$

22. $a \approx 0{,}8\ \frac{m}{s^2}$

30. $v_1 \approx 14\ \frac{m}{s}$

$v_2 \approx 8\ \frac{m}{s}$

Grundlagen der Dynamik

Seiten 142 bis 145

57. $F \approx 228$ N

60. $m \approx 0{,}7$ kg

Energie

Seiten 145 bis 146

78. $W = 8 \cdot 10^4$ kpm

86. a) $W_{kin} \approx 22\,200$ Nm

87. $W_{kin} = 35$ kpm

Die Kreisbewegung

Seiten 146 bis 147

95. $v \approx 51\ \frac{m}{s}$

97. $F \approx 237$ N ≈ 24 kp

Die Gravitation

Seiten 147 bis 148

113. $F = 6{,}67 \cdot 10^{-7}$ N

Elektrisches Feld

Seiten 150 bis 151

137. $Q \approx 650$ As

145. $Q = 3 \cdot 10^{-6}$ As

Nomogramme

Neben dem Rechenstab wurden bereits in Klasse 8 Nomogramme als Rechenhilfsmittel verwendet. Im Vergleich zum Rechenstab besteht der Vorteil der Nomogramme in der sofortigen Ablesbarkeit des Ergebnisses mit richtigem *Zahlenwert* und richtiger *Einheit*. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß die Einheiten der gegebenen physikalischen Größen mit den auf den *Leitern* dieser Größen angegebenen Einheiten übereinstimmen. Der Nachteil der Nomogramme liegt in dem begrenzten, durch die Leitern vorgegebenen Zahlenbereich. Je nach Aufgabenstellung, wird man sich also in der Praxis für die Benutzung eines Nomogramms oder eines Rechenstabes entscheiden.

Mit Hilfe der in diesem Lehrbuch abgedruckten Nomogramme ist es möglich, Aufgaben

zum Weg-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung,

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

zum Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung,

$$v = a \cdot t$$

zum Newtonschen Grundgesetz

$$F = m \cdot a$$

und zur Ermittlung der kinetischen Energie eines Körpers

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

zu lösen.

Für diese vier unterschiedlichen Zusammenhänge sind nur drei Nomogramme abgedruckt.

Mit dem Nomogramm auf Seite 178 lassen sich Aufgaben zum Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung und zum Newtonschen Grundgesetz lösen. Die Gleichungen $v = a \cdot t$ und $F = m \cdot a$ haben die gleiche mathematische Struktur. Diese Struktur kann man allgemein so schreiben:

$$z = x \cdot y$$

Aus Klasse 8 ist bekannt, daß man mit einem Nomogramm Aufgaben nach allen in den Gleichungen vorkommenden, miteinander verknüpften Größen lösen kann. Die gesuchte Größe kann also außer z auch x oder y sein. Ausführlich geschrieben würden die drei möglichen Lösungsgleichungen lauten:

$$z = x \cdot y$$

$$x = \frac{z}{y}$$

$$y = \frac{z}{x}$$

Alle physikalischen Gleichungen, die eine derartige Form haben, können mit demselben Nomogramm gelöst werden. Man muß lediglich darauf achten, welche physikalische Größe welcher Leiter zugeordnet werden muß.

Zu entsprechenden Ergebnissen gelangt man, wenn man die mathematischen Strukturen des Weg-Zeit-Gesetzes der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung und der Gleichung zur Ermittlung der kinetischen Energie eines Körpers miteinander vergleicht. Die mathematische Struktur dieser beiden Gleichungen läßt sich allgemein so darstellen:

$$z = \frac{x}{2} \cdot y^2$$

Es wäre deshalb möglich, auch hier für zwei verschiedene Zusammenhänge nur ein Nomogramm zu benutzen. Da jedoch bei den entsprechenden Aufgaben die erforderlichen Zahlenbereiche sehr weit auseinanderliegen, sind zwei Nomogramme wiedergegeben.

Um erfolgreich mit den Nomogrammen arbeiten zu können, sind folgende **Hinweise** zu beachten:

1 Vergleichen Sie die Einheiten der gegebenen physikalischen Größen mit den Einheiten dieser Größen auf den Leitern der Nomogramme!

1. Fall:
Es liegt Übereinstimmung der Einheiten vor – mit dem Nomogramm kann unmittelbar gearbeitet werden.

2. Fall:
Es liegt keine Übereinstimmung der Einheiten vor – die Einheiten der gegebenen physikalischen Größen sind in die Einheiten dieser Größen auf den Leitern der Nomogramme umzurechnen. Das kann schriftlich erfolgen oder unter Be-

nutzung von Umrechnungsleitern (↗ Lehrbuch Klasse 9, Seite 172)

2 Legen Sie das Lineal exakt an die Zahlenwerte an (Schnittpunkt des waagerechten Teilstriches mit der Leiter)!

1. Fall:
Der Zahlenwert ist auf der Leiter direkt gegeben – das Lineal kann an den Schnittpunkt angelegt werden.

2. Fall:
Der Zahlenwert ist ein Zwischenwert – der Zwischenwert wird geschätzt, mit dem Zirkel auf der Leiter markiert und das Lineal an die Zirkelspitze angelegt.

3 Lesen Sie die gesuchte Größe exakt ab!

1. Fall:
Das Lineal schneidet die Leiter der gesuchten Größe in einem auf der Leiter vorhandenen Teilstrich – der Zahlenwert kann unmittelbar abgelesen werden.

2. Fall:
Das Lineal schneidet die Leiter der gesuchten Größe zwischen zwei vorhandenen Teilstrichen — der Zwischenwert muß geschätzt werden.
Achtung! Beachten Sie den Verlauf der Zahlenwerte entlang der Leiter – von oben nach unten ansteigende oder von oben nach unten fallende Zahlenwerte!

4 Vermeiden Sie das Einzeichnen von Linien in das Nomogramm, es wird dadurch unübersichtlich und bald unbrauchbar!

5 Arbeiten Sie mit der Zirkelspitze oder mit einem gut gespitzten Bleistift!

Lösung einer Aufgabe mit Hilfe von Nomogrammen und Umrechnungsleitern

Aufgabenstellung:

Ein Radrennfahrer mit einer Masse m_1 von 75 kg erreicht mit seinem Rennrad ($m_2 = 25$ kg) in 10 s eine Geschwindigkeit von $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. (Die Reibung ist zu vernachlässigen.)

a) Wie groß ist die erforderliche Kraft?

b) Welchen Weg hat er dabei zurückgelegt? (Ergebnis in Metern)

c) Wie groß ist die kinetische Energie von Rennfahrer und Rennrad bei der Geschwindigkeit von $30\,\frac{km}{h}$? (Ergebnis in Kilopondmetern)

Aufgabenanalyse:

Gegeben: $m = m_1 + m_2$

$m = 75\,kg + 25\,kg = 100\,kg$

$t = 10\,s$

$v = 30\,\frac{km}{h}$

Gesucht: a) F (in kp)

b) s (in m)

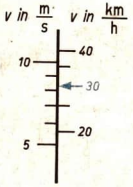
c) W_{kin} (in kpm)

Aufgabenlösung:

1. Schritt:

Umrechnung der Einheit $\frac{km}{h}$ in die Einheit $\frac{m}{s}$. (↗Umrechnungsleiter im Nomogramm zur Ermittlung der kinetischen Energie eines Körpers.)

$30\,\frac{km}{h} = 8{,}3\,\frac{m}{s}$



2. Schritt:

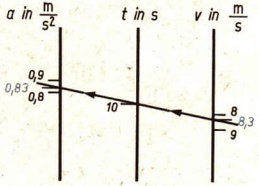
Ermittlung der Beschleunigung a mit dem Nomogramm $v = a \cdot t$

Gegeben: $t = 10\,s$

$v = 8{,}3\,\frac{m}{s}$

Gesucht: $a\left(\text{in } \frac{m}{s^2}\right)$

Ergebnis: $a = 0{,}83\,\frac{m}{s^2}$



3. Schritt:

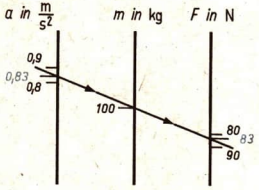
Ermittlung der Kraft F mit dem Nomogramm $F = m \cdot a$

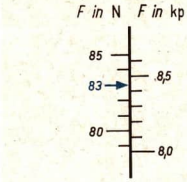
Gegeben: $m = 100\,kg$

$a = 0{,}83\,\frac{m}{s^2}$

Gesucht: F (in N)

Ergebnis: $F = 83\,N$

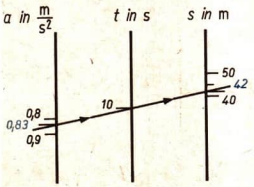




4. Schritt:

Umrechnung der Einheit N in die Einheit kp mit Umrechnungsleiter (↗ Seite 172)

$F = 83\ N = 8{,}45\ kp$



5. Schritt:

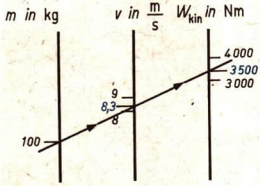
Ermittlung des Weges s mit dem Nomogramm $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$

Gegeben: $a = 0{,}83\ \frac{m}{s^2}$

$t = 10\ s$

Gesucht: s (in m)

Ergebnis: $s = 42\ m$



6. Schritt:

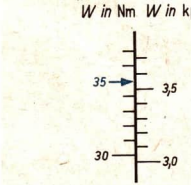
Ermittlung der kinetischen Energie W_{kin} mit dem Nomogramm $W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$

Gegeben: $m = 100\ kg$

$v = 8{,}3\ \frac{m}{s}$

Gesucht: W_{kin} (in Nm)

Ergebnis: $W_{kin} = 3500\ Nm$



7. Schritt:

Umrechnung der Einheit Nm in die Einheit kpm (↗ Umrechnungsleiter Seite 172)

35 Nm = 3,57 kpm

3 500 Nm = 357 kpm

W_{kin} = 357 kpm

Ergebnisse:

a) *Die Kraft beträgt* 8,45 kp.

b) *Um die Geschwindigkeit von* $30\ \frac{km}{h}$ *zu erreichen, ist ein Weg von* 42 m *erforderlich.*

c) *Die kinetische Energie von Fahrer und Rad beträgt* 357 kpm.

Bild 172/1

Bild 172/2

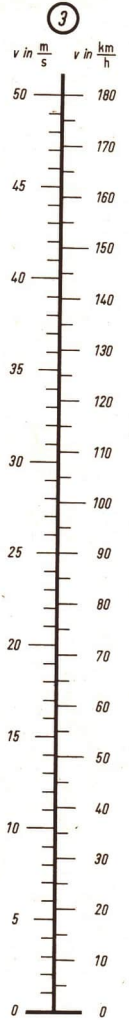
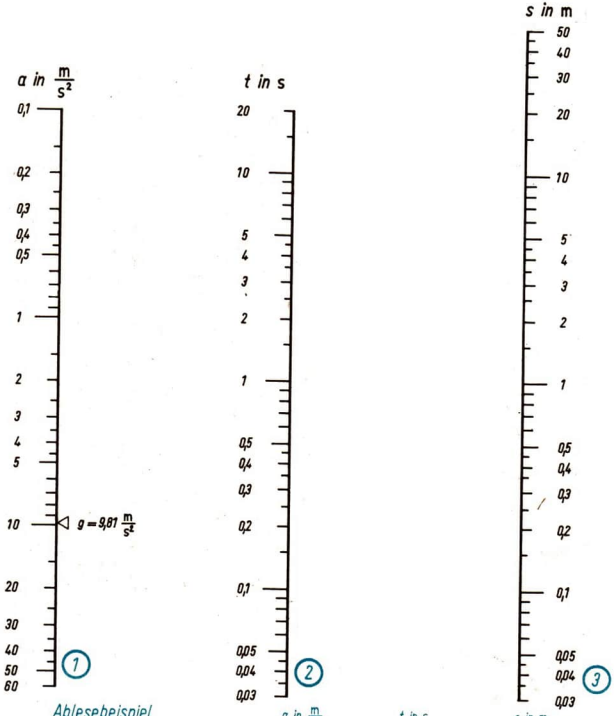


Bild 172/3

Weg-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung	$s = \frac{a}{2} t^2$



Ablesebeispiel

$a = 10 \frac{m}{s^2}$

$t = 1\ s$

$s = 5\ m$

Bild 173/1

Register

Angriffspunkt 30, 43
Anode 113, 121, 127
Arbeit 42, 45
Atomaufbau 108
Atombindung 109, 118
Atomhülle 108
Atomkern 108
Augenblicksgeschwindigkeit 11

Bahngeschwindigkeit 48f., 52, 55, 66
Ballistik 25
Beschleunigung 13, 30
Beschleunigungsarbeit 44f., 65
Bewegung, geradlinige, gleichförmige 8, 39
Bewegung, geradlinige, gleichmäßig beschleunigte 11f., 30, 39, 48
Bewegung, ungleichförmige 9f., 39
Bewegungsarten 8, 39, 65f.
Bezugssystem 7

Coulomb 68
Coulombsches Gesetz 74

Dauermagnet 83f., 85, 97, 107
Defektelektronen 119, 136
Dielektrikum 79
Diffusionsfeld 130
Dissoziation 114
Drehbewegung 50, 52
Drehkondensator 80, 107
Drehspulinstrument 94, 107
Durchlaßrichtung 131
Durchschnittsgeschwindigkeit 10
Dynamik 7, 26

Eigenleitung 118f.
Einheiten, abgeleitete 41
Einkristall 130
elektrische Feldstärke 70f.
— Klingel 83, 92, 107, 134
— Stromrichtung 76, 93
Elektrode 113
Elektrolytkondensator 80.f.
Elektromagnet 83, 91, 107
elektromagnetische Induktion 97
Elektrometer 69, 107
Elektromotor 81, 96, 107
Elektronen 76, 108f., 111, 114, 119, 121, 136
Elektronenmangel 110
Elektronenpaare 109
Elektronenstrahlen 126
Elektronenstrahloszillograf 121, 128
Elektronenstrahlröhre 126f.
Elektronenüberschuß 69, 110
Elementarladung 68
Energieerhaltungssatz 46f.
Energie, kinetische 44f., 46, 65, 112
—, potentielle 42f, 46, 65
Erdsatelliten 60
Erregerspule 97, 103

Fallbeschleunigung 18f., 35, 51, 58
Farad 78
Faraday, Michael 106
Federspannarbeit 43
Feld, elektrisches 69f., 100, 107, 110f., 118, 121, 135
—, magnetisches 82, 85f., 99f., 107, 135
Feldlinien, elektrische 73, 107, 135
—, magnetische 86, 107, 135
Fluchtgeschwindigkeit 61f.
Fotoemission 117, 129
Fotozelle 129
freier Fall 16f., 73

Galilei, Galileo 20, 54
Gegenkraft 28, 38, 51
Generator 96
Geschwindigkeit 8f., 22, 26
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz 14, 18
Geschwindigkeit, Zusammensetzung 22
Gewichtskraft 26, 35, 39, 56
Gitter 124
Gleichrichter 123
Gleichstrom, Glättung 81
Gleichstrommotor 94
Glühemission 117, 121
Gravitation 54
Gravitationsfeld 58f.
Gravitationsgesetz 55f.
Gravitationskonstante 56f., 74
Größen, abgeleitete 40f.
—, vektorielle 9, 27, 50, 72
Grundeinheit 41
Grundgrößen 40f.

Halbleiter 133
Halbleiterbauelemente 130
Halbleiterdiode 130
Henry 104
Hubarbeit 43
Hypothese 17, 19, 21

Induktionsgesetz 99
Induktionsspannung 99f.
Induktionsspule 97, 103
Induktivität 104
Ionen 109, 111, 114, 136
Ionenbeziehung 109

Kapazität 77f.
Katode 113, 121
Kennlinie 122, 124f., 131
Kepler, Johannes 55
Keplersche Gesetze 55
Kilogramm 32
Kilopond 26, 33
Kinematik 7
Kondensator 70f., 77f., 111, 115
Kraft 26f., 31, 39, 56, 66, 93
—, resultierende 29
Kräftezerlegung 28f.
-zusammensetzung 28f.
Kräfte zwischen Ladungen 69
Kraftkomponenten 30, 42
Kraftmessung, dynamische 33
—, statische 26, 33
Kreisbewegung, gleichförmige 48f.

Ladung 68, 72, 110
Ladungsausgleich 74, 110
Ladungsträger 93, 111f., 114
Ladungstrennung 68
Leitung im Vakuum 110f., 116f., 136
— in festen Körpern 110f., 136
— in Flüssigkeiten 110, 113f., 136
— in Gasen 110f., 115, 136
— in Halbleitern 111, 118, 136
— in Metallen 112f.
Lenzsches Gesetz 102

Magnetfeld der Erde 88
Masse 32, 35
Massenpunkt 7
Metallbindung 110
Methode, experimentelle 19, 37f., 89
MHD-Generator 101
Modell 73, 107, 111f.
— des Leitungsvorganges 111

Neutronen 108
Newton 32
Newton, Isaac 32f.
Newtonmeter 43
Newtonsches Grundgesetz 30f., 37, 45

Parallelogramm der Geschwindigkeiten 22
Perpetuum mobile 47
Plattenkondensator 79f., 107
Prinzip, elektromotorisches 92
Probekörper 69f., 85, 135
Probeladung 69f.
Protonen 108
Punktladung 74

Radialbeschleunigung 49f.
Radialkraft 49f., 53
Raumladungsgebiet 123
Reibung 51
Relais 91f., 107, 134
Röhrendiode 121
Röhrentriode 124f.
Rotation 50, 52

Sättigungsgebiet 123
Schalter, kontaktloser 125
Selbstinduktion 103
Signalübertragung 134
Spannung 72, 132
Sperrichtung 130
Spule 87, 89, 97, 107
Stabmagnet 87
Störschutzkondensator 81
Störstellenleitung 120
Stoßionisation 116
Strom, zeitlich veränderlicher 76
Stromstärke 76, 112, 132

Trägheit 32, 37, 77
Trägheitsgesetz 36f.
Transistor 131

Umlaufzeit 49

Verschiebungsarbeit 44, 72

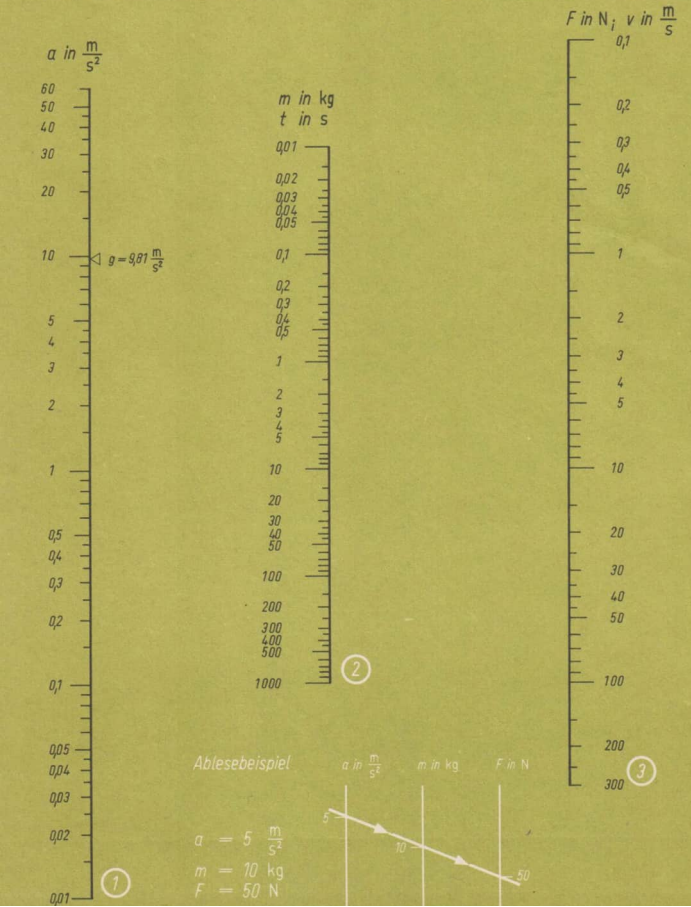
Wattsekunde 43
Wechselwirkungsgesetz 27, 51
Weg-Zeit-Gesetz 8, 15, 18
Weltbild, geozentrisches 54
—, heliozentrisches 54
Wehneltzylinder 128
Werkstoff, magnetischer 90
Wickelkondensator 75, 77, 80, 107
Widerstand 133
Wirbelstrombremse 106
Wirbelströme 105
Wirkungslinie 27, 30
Wurfparabel 24
Wurf, schräger 24
—, senkrechter 24
—, waagerechter 24
Wurfweite 24f.

Zentrifuge 51

Quellennachweis der Abbildungen

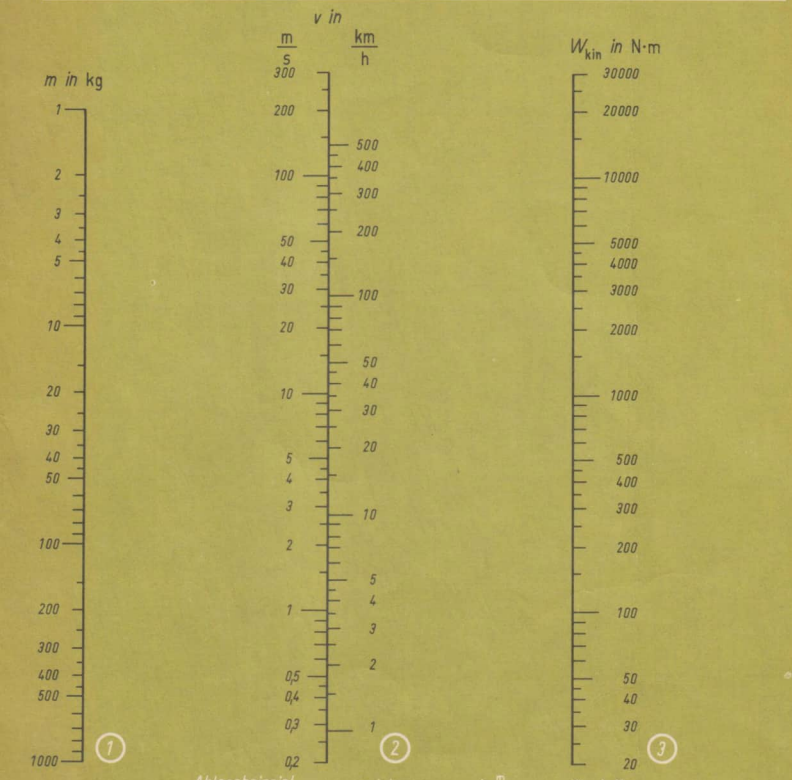
Ernst-Ludwig Bach, Berlin: entnommen aus „Junge Menschen im jungen Staat", Verlag Neues Leben 137/1. H. E. Boche, Berlin: 51/3. W. Brunstein, Güstrow: 90/2. Werner Bunschuh, Berlin: 17/2, 94/1, 131/3. Hubert Buscherowsky, Dresden: 163/1, 164/2. DAMW, Berlin: 32/1. Deutsche Bauinformation, Berlin: 5/1. Deutsche Staatsbibliothek, Berlin: 34/1. VEB Elektro-Apparate-Werke, Berlin: 91/3. Foto-Heinrich, Wismar: 29/2. Reiner Müller, Berlin: 81/3. Siegfried Müller, Leipzig: 53/1. Reproduktion: Dr. Friedrich Klemm „Technik – Eine Geschichte ihrer Probleme" Freiburg/München 1954: 47/2. Seifert, Volk und Wissen, Berlin: 52/1, 53/2, 81/1, 106/2, 121/1, 124/1. Technische Universität Dresden: 42/1, Volk und Wissen, Archiv: 26/1, 33/1, 54/2, 55/1, 64/1a, 65/1, 73/1, 73/2, 74/1, 74/2, 74/3, 75/2, 80/1, 82/1, 86/1, 87/3, 87/4, 89/1, 91/1, 92/1, 95/6, 105/1. Zentralbild: 6/1, 7/1, 20/1, 21/1, 44/1, 48/1, 56/2, 60/2, 60/3, 60/4, 67/1, 91/2, 96/1, 108/1, 146/1. Zentrales Haus der Deutsch-Sowjetischen Freundschaft, Berlin: 38/1, 38/2, 51/2, 54/1, 60/1.

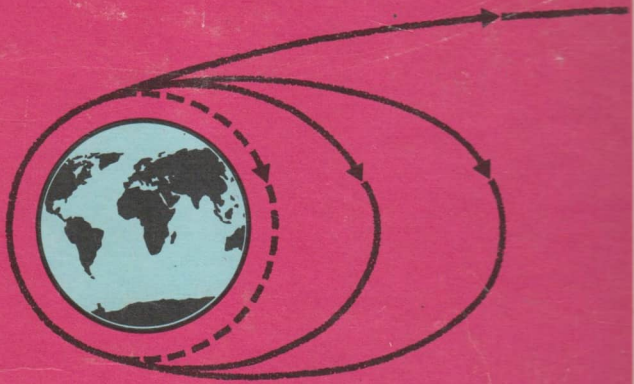
Newtonsches Grundgesetz	$F = m \cdot a$
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der geradlinigen, gleichmäßig beschleunigten Bewegung	$v = a \cdot t$



Kinetische Energie

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





02 09 03-4 · 2.20