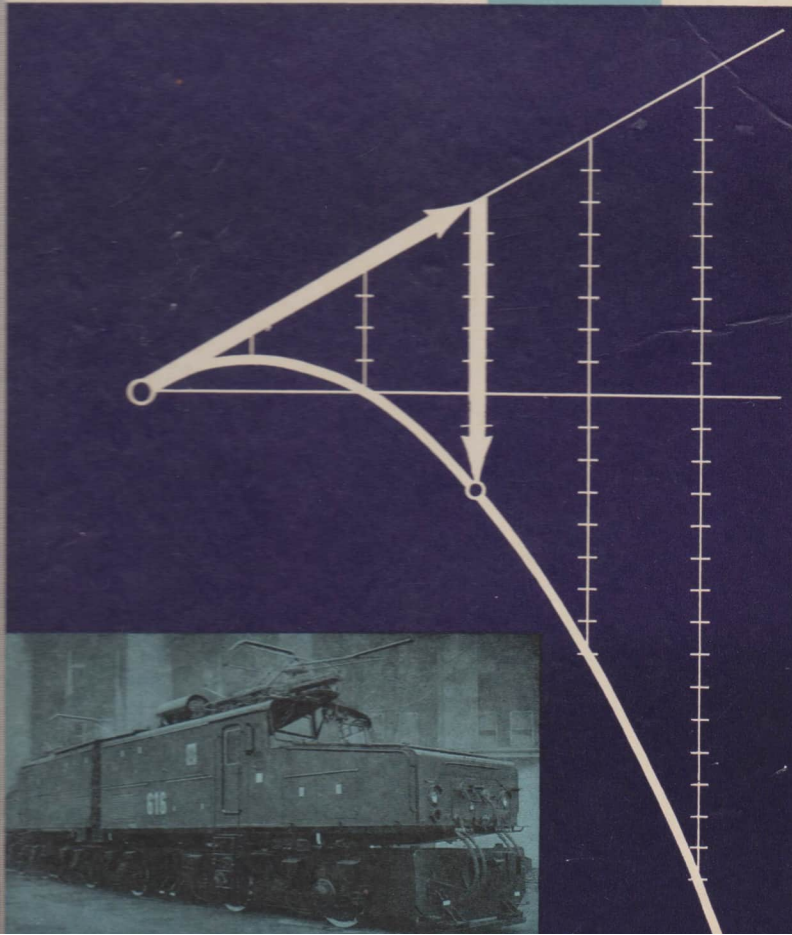
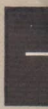
PHYSIK 9

Erweiterte Oberschule
B-Zweig





Oben, von links nach rechts

Galvanische Spannungsquelle

Galvanische Spannungsquelle, 20 V

Galvanische Spannungsquelle, mehrere Elemente

Wechselstrom

Gleichstrom

Leitungskreuzung

Leitungsabzweigung

Schalter

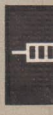
Gleichstromgenerator

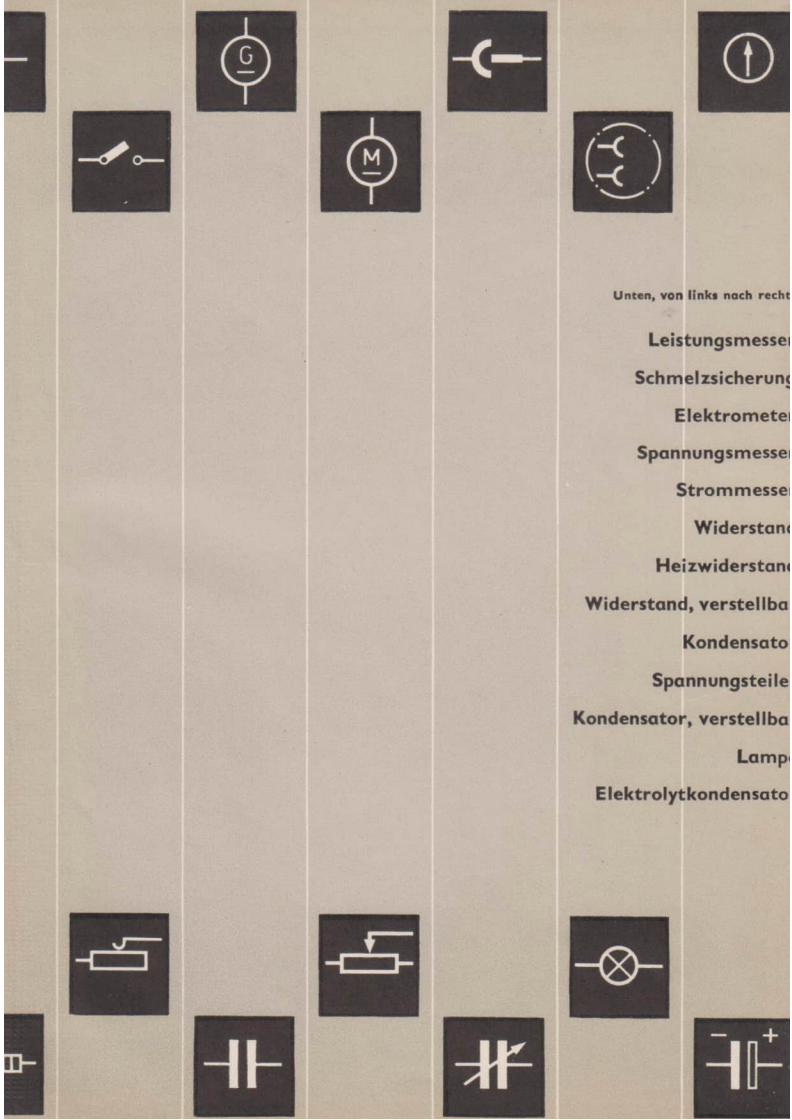
Gleichstrommotor

Buchse und Stecker

Steckdose

Meßinstrument




G
M
Unten, von links nach recht
Leistungsmesse
Schmelzsicherun
Elektromete
Spannungsmesse
Strommesse
Widerstan
Heizwiderstan
Widerstand, verstellba
Kondensato
Spannungsteile
Kondensator, verstellba
Lamp
Elektrolytkondensato
−
+

Physik

Lehrbuch für die erweiterte Oberschule

Klasse 9 (B)

VOLK UND WISSEN

VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1965

Die Manuskripte wurden verfaßt von
Wolfgang Brunstein (Elektrizitätslehre, Bemerkungen zu den physikalisch-technischen Einheiten)
Rolf Grabow (Mechanik, Entwicklung der Elektrizitätslehre, Bemerkungen zu den physikalisch-technischen Einheiten)
in Zusammenarbeit mit der Redaktion Physik des Verlages

Redaktion: Werner Golm · Ing. Günter Meyer

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik
als Lehrbuch für die erweiterte Oberschule bestätigt

Ausgabe 1963

Einband und Vorsatz: Werner Fahr
Typografische Gestaltung: Günter Runschke · Günter Wolff

ES 11 H · Bestell-Nr. 02 09 54-3 · 5,80 MDN · Lizenz-Nr. 203 · 1000/64 (DN)
Satz: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig III/18/203
Druck: VEB Messe- und Musikaliendruck, Leipzig (III/18/157)

Elektrizitätslehre

1. Die Grundgesetze des Gleichstromkreises 9

1.1. Spannung, Strom und Widerstand 9
1.2. Das Ohmsche Gesetz 15
1.3. Der unverzweigte Stromkreis 15
Versuche, Fragen, Aufgaben 23
1.4. Der verzweigte Stromkreis 23
Versuche, Fragen, Aufgaben 32
1.5. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur 33
Versuche, Fragen, Aufgaben 36

2. Grundlagen der Elektrostatik 37

2.1. Die elektrische Ladung 37
Versuche, Fragen, Aufgaben 42
2.2. Das elektrische Feld 43
2.3. Die elektrische Feldstärke 45
Versuche, Fragen, Aufgaben 51
2.4. Elektrische Felder in Technik und Natur 52
Versuche, Fragen, Aufgaben 55
2.5. Der Kondensator 56
Versuche, Fragen, Aufgaben 63

3. Die elektrische Energie 65

3.1. Die Arbeit und Leistung im Gleichstromkreis 65
Versuche, Fragen, Aufgaben 67
3.2. Das elektrische Wärmeäquivalent 67
Versuche, Fragen, Aufgaben 72

4. Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes 73

4.1. Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten 73
Versuche, Fragen, Aufgaben 80
4.2. Technische Anwendung der Elektrolyse 80
Versuche, Fragen, Aufgaben 84

5. Die chemischen Spannungsquellen 85

5.1. Galvanische Elemente 85
Versuche, Fragen, Aufgaben 90
5.2. Der Akkumulator 90
Versuche, Fragen, Aufgaben 97

6. Spannungsquellen im Stromkreis 100

6.1. Der innere Stromkreis 100
6.2. Zusammenschaltung von Spannungsquellen 103
Versuche, Fragen, Aufgaben 107

7. Das magnetische Feld 108

7.1. Das Magnetfeld stromdurchflossener Leiter 108
7.2. Die Wirkung des Magnetfeldes in Stoffen 111
7.3. Die technische Bedeutung des Magnetfeldes 115
Versuche, Fragen, Aufgaben 121

8. Die Entwicklung der Elektrizitätslehre 124

Mechanik

1. Die Kraft 132

1.1. Kraftwirkungen 132
1.2. Skalare und Vektoren 133
1.3. Die statische Kraftmessung – Krafteinheiten 135
Versuche, Fragen, Aufgaben 135

2. Die Formung fester Körper 136

2.1. Elastische Formung 136
2.2. Die elastische Verlängerung einer Schraubenfeder und eines Drahtes 137
2.3. Der Elastizitätsmodul 139
2.4. Das Spannung-Dehnung-Diagramm 140
2.5 Formgebung durch Schmieden, Pressen und Ziehen 142
Versuche, Fragen, Aufgaben 143

3. Zusammensetzung von Kräften mit gleicher Wirkungslinie 145

3.1. Zusammensetzen gleichgerichteter Kräfte 145
3.2. Zusammensetzen entgegengesetzt gerichteter Kräfte 146
Versuche, Fragen, Aufgaben 147

4. Zusammensetzen und Zerlegen nichtparalleler Kräfte 148

4.1. Kräfteparallelogramm 148
4.2. Kräftedreieck 150
4.3. Kräftepolygon 150
4.4. Zerlegen einer Kraft 151
Versuche, Fragen, Aufgaben 153

5. Zusammensetzen und Zerlegen paralleler Kräfte 156

5.1. Zusammensetzen paralleler Kräfte 156
5.2. Zerlegen einer Kraft in parallele Komponenten 157
Versuche, Fragen, Aufgaben 159

6. Das Drehmoment 161

6.1. Grundbegriffe 161
6.2. Der Drehmomentensatz 162
Versuche, Fragen, Aufgaben 163

7. Schwerpunkt und Gleichgewichtslagen 164

7.1. Der Schwerpunkt 164
7.2. Gleichgewichtslagen 165
7.3. Die Standfestigkeit 166
Versuche, Fragen, Aufgaben 167

8. Kraftumformende Einrichtungen 168

Versuche, Fragen, Aufgaben 170

9. Die Entwicklung der Statik 174

10. Gleichförmige und ungleichförmige Bewegung 177

10.1. Die Relativität der Bewegung 177
10.2. Die gleichförmige Bewegung 177
Versuche, Fragen, Aufgaben 180
10.3. Ungleichförmige Bewegungen 181
Versuche, Fragen, Aufgaben 189

11. Zusammengesetzte Bewegungen 192

11.1. Überlagerung von Bewegungen 192
11.2. Zusammensetzen von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen 193
Versuche, Fragen, Aufgaben 195

12. Der Wurf 196

12.1. Der lotrechte Wurf 196
12.2. Der waagerechte Wurf 199
12.3. Der schräge Wurf 200
12.4. Die Ballistik 201
Versuche, Fragen, Aufgaben 202

13. Die Newtonschen Grundgesetze der Mechanik 204

13.1. Maßeinheiten der Masse 204
13.2. Masse und Trägheit 205
13.3. Der Trägheitssatz 206
13.4. Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft 207
13.5. Die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse 208
13.6. Das Grundgesetz der Mechanik 209
13.7. Die dynamische Kraftmessung 211
13.8. Das Gegenwirkungsprinzip 212
13.9. NEWTON – Begründer der klassischen Mechanik 214
Versuche, Fragen, Aufgaben 215

14. Die Reibung

14.1. Die Reibungskraft 218
14.2. Gleitreibung, Haftreibung 219
14.3. Die Rollreibung 221
14.4. Veränderung der Reibung 222
Versuche, Fragen, Aufgaben 223

15. Die mechanische Arbeit 224

15.1. Begriff der Arbeit 224
15.2. Die Arbeit – Arbeitseinheiten 226
Versuche, Fragen, Aufgaben 227

16. Die Leistung und der Wirkungsgrad 228

16.1. Die Leistung 228
16.2. Der Wirkungsgrad 229
Versuche, Fragen, Aufgaben 231

17. Die mechanische Energie 232

17.1. Die potentielle Energie 232
17.2. Die kinetische Energie 233
17.3. Der Satz von der Erhaltung der Energie 234
17.4. Die Entwicklung des Energiebegriffs 237
Versuche, Fragen, Aufgaben 238

Anhang

1. Bemerkungen zu den physikalisch-technischen Einheiten 240

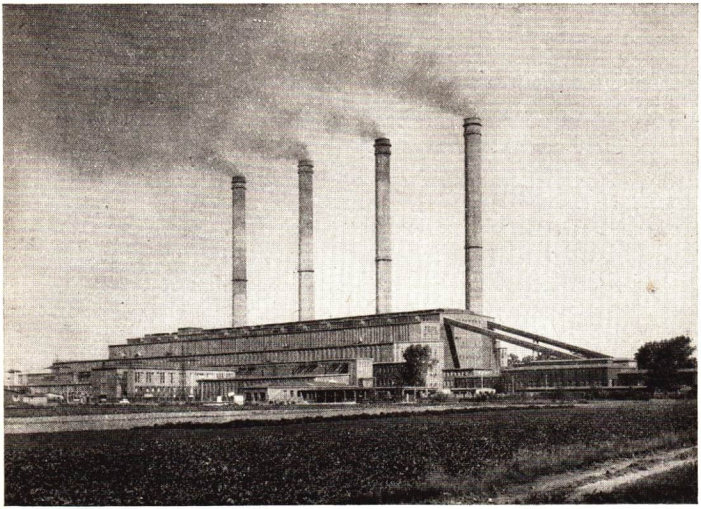
1.1. Die Grundeinheiten 240
1.2. Abgeleitete Einheiten 241

2. Formelzeichen 244

3. Formeln 245

4. Lösungen 249

Sachwortverzeichnis 253



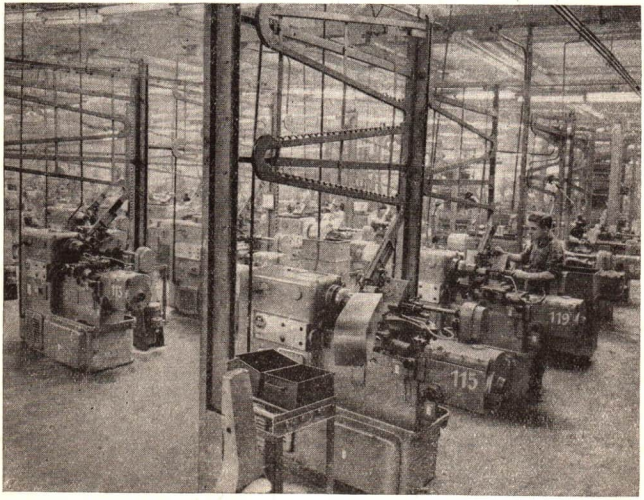
Elektrizitätslehre

Am Anfang der Geschichte der menschlichen Gesellschaft standen den Menschen nur ihre Körperkräfte zur Verfügung und dementsprechend hatten die Menschen noch keine großen Erfolge bei ihrem Ringen mit der Natur. Ihre Arbeitsergebnisse reichten kaum zur Befriedigung des einfachsten Lebensbedürfnisses, der Ernährung, aus. Heute stehen uns die Naturkräfte in vielfältiger Form zur Verfügung.

Die Elektroenergie ist eine der wichtigsten Energieformen bei der Umgestaltung der Natur und bei der Produktion materieller Güter. Unser Bild auf der Seite 8 zeigt eine Fließstraße, in der Kugellagerteile gefertigt werden. Dabei werden der Transport der Teile, das Spannen, das Bearbeiten, das Messen und viele andere Arbeitsgänge mit Hilfe von Elektroenergie ausgeführt.

Elektrische Energie läßt sich in Wärme oder Licht umwandeln. In der landwirtschaftlichen Produktion spielt die Elektroenergie eine ebenso große Rolle bei der Innenmechanisierung wie bei der Bewässerung, bei der Feldbestellung und bei der Ernte.

Unsere Chemieindustrie benötigt für die Verarbeitung von Braunkohle, Salzen, Tonerde usw. zu den verschiedensten Erzeugnissen große Mengen Elektroenergie für Elektrolysen und andere Prozesse.
Die elektrische Energie und die vielseitigen elektrischen Einrichtungen bieten die Voraussetzungen, den Menschen die Arbeit zu erleichtern und das Leben schöner zu gestalten. Man kann geradezu feststellen, daß die Elektroenergieversorgung vorrangig entwickelt werden muß, damit eine planmäßige proportionale Entwicklung der Volkswirtschaft möglich ist. Darum wird in allen Wirtschaftsplänen der sozialistischen Länder die Elektroenergiewirtschaft und die Elektroindustrie besonders berücksichtigt und planmäßig weiterentwickelt.
Forscher, Wissenschaftler und Techniker haben gelernt, die Gesetze der Elektrizität zu beherrschen und sie sinnvoll anzuwenden. Heute darf sich jeder junge Mensch mit diesen Erkenntnissen beschäftigen und lernen, damit er seine Kräfte als Facharbeiter und als Ingenieur im Produktionsprozeß oder als Wissenschaftler im Laboratorium zum Nutzen der menschlichen Gesellschaft einsetzen kann.
Im Physikunterricht der Klasse 8 wurden bereits einige wichtige Grundgesetze aus der Elektrizitätslehre behandelt. Im folgenden Kapitel 1 werden diese Gesetze zunächst wiederholt und vertieft. Danach werden bisher noch nicht betrachtete Gesetzmäßigkeiten aus der Elektrizitätslehre untersucht.

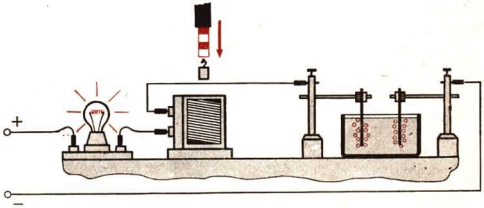


1. Die Grundgesetze des Gleichstromkreises

In allen Schulen der Deutschen Demokratischen Republik haben die Mädel und Jungen die Möglichkeit, im Physikunterricht selbständig Versuche auszuführen. Nur durch die tätige Auseinandersetzung mit den Naturvorgängen kann man ihre Gesetze so gründlich kennenlernen, daß man die moderne Technik meistern kann. Ein wichtiges Grundgesetz gibt den Zusammenhang zwischen Spannung, Strom und Widerstand an.

1.1. Spannung, Strom und Widerstand

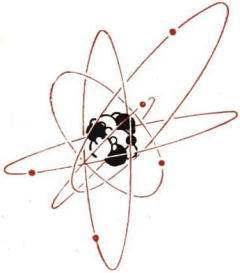
Der Mensch kann den elektrischen Strom nur an seinen Wirkungen erkennen. Die Vorgänge im Inneren der Teile eines Stromkreises können wir mit unseren Sinnesorganen nicht direkt wahrnehmen. Durch wohlüberlegte Versuche und ihre Auswertung ist es den Wissenschaftlern aber doch gelungen, die Zusammenhänge der Erscheinungen zu erkennen, so daß wir uns ein Bild von den elektrischen Vorgängen machen können.



9/1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Wirkungen des elektrischen Stromes
Erklären Sie!

1.1.1. Der elektrische Strom

Der dänische Physiker Niels Bohr hat auf der Grundlage der Forschungsergebnisse vieler anderer Wissenschaftler 1912 eine Modellvorstellung vom Aufbau der Atome entwickelt, mit der auch die Vorgänge des elektrischen Stromes veranschaulicht



10/1 Modell eines Atoms
Um den positiven Atomkern kreisen die negativen Elektronen auf verschiedenen Bahnen. Das Modellbild entspricht nicht mehr den heutigen Erkenntnissen über die Vorgänge im Atom. Es genügt aber zur Veranschaulichung der Vorgänge und Erscheinungen, die hier betrachtet werden sollen

werden können. Danach enthält jedes Atom einen elektrisch positiv geladenen Atomkern. Um diesen bewegen sich auf bestimmten Bahnen die Elektronen.

Die Elektronen sind die kleinsten elektrisch negativ geladenen Teilchen der Atome.

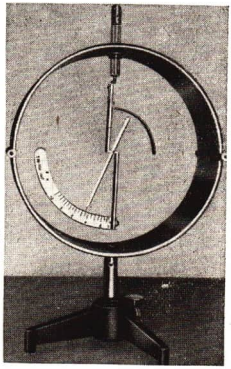
In den Kristallgefügen der Metalle besteht eine Wechselwirkung zwischen den Atomen. Dadurch lockert sich die Bindung der äußeren Elektronen an den Atomkern. Sie können sehr leicht durch äußere Einflüsse, beim Berühren mit anderen Stoffen, durch Wärme oder durch Magnetfelder von dem Atomkern gelöst bzw. bewegt werden. Diese Elektronen werden als *freie Elektronen* oder *Leitungselektronen* bezeichnet. In den Metallen ist etwa ein Elektron je Atom frei. Das ist die Ursache für die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle. In Flüssigkeiten und Gasen können sich elektrisch geladene Atome bilden, die einen Überschuß oder einen Mangel an Elektronen haben. Man bezeichnet sie als *Ionen*. Sie übernehmen in Gasen und Flüssigkeiten den Ladungstransport im Stromkreis.

1.1.2. Die elektrische Spannung

Es muß immer eine elektrische Spannung bestehen, um die Elektronen in Bewegung zu setzen. Technisch bedeutungsvoll sind chemische und elektromagnetische Spannungsquellen. In den Spannungsquellen werden die Ladungen getrennt, das heißt, die Elektronen werden verlagert. Dabei entsteht ein Elektronenüberschuß am Minuspol und ein Elektronenmangel am Pluspol.

Die Spannung ist die Ursache für den Elektronenstrom.

Es gibt eine Reihe von *elektrostatischen Meßgeräten*, mit denen man Spannungen nachweisen und messen kann. In ihnen werden die Kräfte zwischen geladenen Körpern ausgenutzt, und es fließt kein Strom. Ein einfaches Gerät dieser Art ist das Braunsche Elektrometer (Bild 10/2).



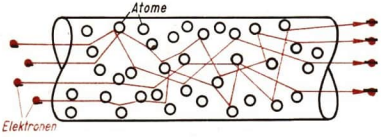
10/2 Braunsches Elektrometer

In der Technik arbeitet man meist mit *elektrodynamischen Meßgeräten*, durch die ein Strom fließt. Spannungsmesser haben einen möglichst großen Widerstand. Sie messen die Spannung zwischen zwei Punkten des Stromkreises und werden parallel zur Spannungsquelle oder zu einem Gerät im Stromkreis angeschlossen.

Die Maßeinheit der Spannung *U* ist gesetzlich festgelegt. Sie heißt das Volt (Kurzzeichen: V).

1.1.3. Die elektrische Stromstärke

Infolge der Spannung bewegen sich die Elektronen durch den Leiter. Der Anstoß dieser Bewegung breitet sich mit einer Geschwindigkeit von nahezu 300000 km/s aus. Die Elektronen fließen jedoch mit einer Geschwindigkeit von nur wenigen Millimetern je Sekunde durch den Leiter.

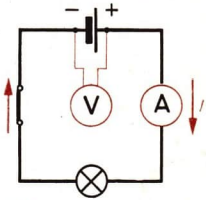


11/1 Schematische Darstellung der Elektronenbewegung in einem Leiter. Die Elektronen führen in dem Kristallgitter freie, ungeordnete Wärmebewegungen aus. Diesen Bewegungen überlagern sich Bewegungen in Längsrichtung des Leiters als Folge der elektrischen Spannung

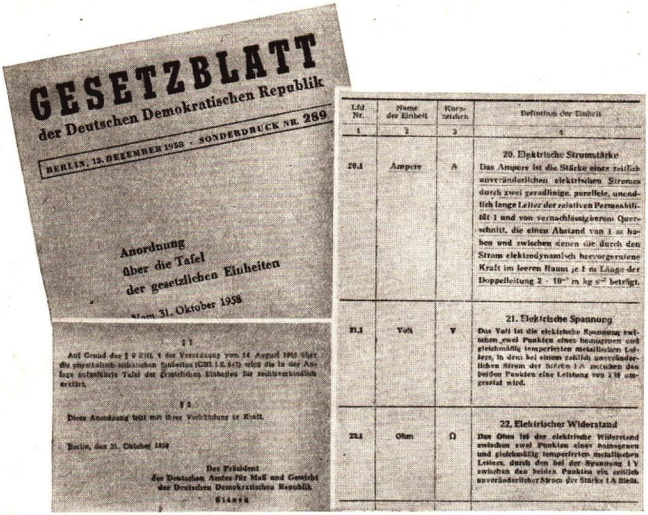
Die Elektronen bewegen sich im äußeren Stromkreis vom Minuspol zum Pluspol. Diese **Richtung des Elektronenstromes** verwenden wir dort, wo wir die Bewegung der Elektronen untersuchen.
In den Anfängen der Elektrizitätslehre wurde festgelegt, daß der elektrische Strom im äußeren Stromkreis vom Pluspol zum Minuspol fließt. Die Elektronen und damit auch ihre Bewegungsrichtung waren damals den Wissenschaftlern noch nicht bekannt. Die Festlegung der **elektrischen Stromrichtung** gilt auch heute noch in der Physik und in der Elektrotechnik.
Wir müssen also beachten, daß die Richtung des Elektronenstroms entgegengesetzt zur elektrischen Stromrichtung ist.

**Die Maßeinheit der elektrischen Stromstärke *I* ist gesetzlich festgelegt.
Sie heißt das Ampere (Kurzzeichen: A).**

Der Betrag der Stromstärke ist der Zahl der Elektronen proportional, die je Sekunde den Leiterquerschnitt an einer Stelle des Stromkreises passieren.
Als Strommeßgerät werden vor allem Dreheisen- und Drehspulgeräte eingesetzt. Sie dürfen nur einen kleinen Widerstand haben, damit sie die Stromstärke nicht wesentlich ändern. Strommeßgeräte werden immer in Reihe mit der Spannungsquelle und den Geräten geschaltet.



11/2
Schaltung von Spannungs- und Strommessern in einem einfachen Stromkreis



GESETZBLATT

der Deutschen Demokratischen Republik

BERLIN, 19. DEZEMBER 1958 · SONDERDRUCK NR. 289

Anordnung über die Tafel der gesetzlichen Einheiten

vom 31. Oktober 1958

§ 1

Auf Grund des § 9 Abs. 4 der Verordnung vom 14. August 1958 über die physikalisch-technischen Einheiten (GBl. I S. 847) wird die in der Anlage enthaltene Tafel der gesetzlichen Einheiten für rechtsverbindlich erklärt.

§ 3

Diese Anordnung tritt mit ihrer Veröffentlichung in Kraft.

Berlin, den 31. Oktober 1958

Der Präsident
des Deutschen Amtes für Maß und Gewicht
der Deutschen Demokratischen Republik
Giaske

Lfd. Nr.	Name der Einheit	Kurzzeichen	Definition der Einheit
1	2	3	4
			20. Elektrische Stromstärke
20.1	Ampere	A	Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die einen Abstand von 1 m haben und zwischen denen sie durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ m kg s^{-2} beträgt.
			21. Elektrische Spannung
21.1	Volt	V	Das Volt ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, in dem bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W umgesetzt wird.
			22. Elektrischer Widerstand
22.1	Ohm	Ω	Das Ohm ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein zeitlich unveränderlicher Strom der Stärke 1 A fließt.

12/1 Die gesetzliche Definition der Maßeinheiten. Im Gesetzblatt der Deutschen Demokratischen Republik sind die elektrischen Maßeinheiten genau definiert. Grundlage bildet die elektrische Stromstärke, die mit den mechanischen Maßeinheiten verknüpft ist.

1.1.4. Der elektrische Widerstand

In verschiedenen Elektrogeräten fließen bei gleicher Betriebsspannung Ströme von unterschiedlicher Stromstärke. Die Geräte besitzen unterschiedliche elektrische Leitungseigenschaften.

- *Vergleichen Sie in dieser Hinsicht einige Elektrogeräte aus dem Haushalt miteinander!*

Jeder elektrische Leiter hat einen elektrischen Widerstand.

Der Widerstand der Leiter ist in der Atomstruktur des Leitungsmaterials begründet. Die Zahl der freien Elektronen ist in verschiedenen Stoffen unterschiedlich. Neben der Art des Materials bestimmen Querschnitt, Länge und Temperatur des Leiters den Betrag seines elektrischen Widerstandes (s. S. 33f.).

Die Maßeinheit des Widerstandes *R* ist das Ohm (Kurzzeichen: Ω).

In der Elektrotechnik wird häufig auch mit dem Kehrwert des Widerstandes, dem *Leitwert*, gerechnet (Formelzeichen G).

$$G = \frac{1}{R}$$

Die Maßeinheit für den Leitwert ist das Siemens (Kurzzeichen: S).

Ein Leiter mit einem Widerstand von 1 Ω hat den Leitwert 1 S. Der Leitwert kennzeichnet die Fähigkeit des Leiters, Elektrizität zu leiten. Er ist um so größer, je besser ein Leiter den elektrischen Strom leitet.

1.1.5. Meßfehler

Systematische Fehler. Die Kennzeichen eines *systematischen Fehlers* liegen darin, daß sie sich aus der Meßanordnung oder aber aus der Ungenauigkeit des Meßgerätes ergeben (s. S. 17 und 18). Die systematischen Fehler sind unabhängig von der messenden Person und verfälschen den Meßwert in der gleichen Meßanordnung immer in der gleichen Weise. Es ist möglich, durch eine Änderung der Meßanordnung, durch eine Reparatur des Gerätes oder den Einsatz eines genaueren Gerätes den systematischen Fehler einzuengen. Auch Hilfsmessungen, wie etwa eine Temperaturmessung, können notwendig werden.

Zufällige Fehler. Bei jeder Messung treten *zufällige Fehler* auf. Sie sind im wesentlichen bedingt durch ungenaues Ablesen der Meßgeräte. Wenn man dem wahren Wert möglichst nahekommen will, so muß man mehrere Messungen ausführen und den *Mittelwert* bilden. Für die zufälligen Fehler ist kennzeichnend, daß sie die Meßergebnisse bald vergrößern, bald verkleinern.

Durchschnittliche Fehler. Bei einer Stromstärkemessung ergeben sich z. B. folgende Meßwerte:

$$I_1 = 3{,}43\ \text{A},\ \ I_2 = 3{,}42\ \text{A},\ \ I_3 = 3{,}46\ \text{A},\ \ I_4 = 3{,}45\ \text{A},\ \ I_5 = 3{,}44\ \text{A}.$$

Es wird der *Mittelwert* $\bar{I}$ (lies: I quer!) gebildet.

$$\begin{aligned} I_1 &= 3{,}43\ \text{A} \\ I_2 &= 3{,}42\ \text{A} \\ I_3 &= 3{,}46\ \text{A} \\ I_4 &= 3{,}45\ \text{A} \\ I_5 &= 3{,}44\ \text{A} \\ \hline \text{Summe:}\ \ & 17{,}20\ \text{A} \end{aligned} \qquad \begin{aligned} \bar{I} &= 17{,}20\ \text{A} : 5 \\ \bar{I} &= 3{,}44\ \ \text{A} \end{aligned}$$

Nun addiert man die Abweichungen ΔI_n (sprich: Delta) vom Mittelwert $\bar{I}$ der Meßwerte und bestimmt daraus den Mittelwert als *durchschnittlichen Fehler* ΔI.

Den Mittelwert aus den Abweichungen bezeichnet man als den durchschnittlichen Fehler einer Messung.

n	I_n	$\bar{I}$	ΔI_n	ΔI
1	3,43		0,01	
2	3,42		0,02	0,012
3	3,46	3,44	0,02	
4	3,45		0,01	
5	3,44		0,00	
Summe	17,20		0,06	

Die Abweichungen werden mit $\Delta I_1, \Delta I_2 \ldots \Delta I_n$ bezeichnet, der durchschnittliche Fehler mit ΔI. Die Berechnung erfolgt am besten in einer Tabelle wie nebenstehend.

$$\Delta I = 0{,}06\ \mathrm{A} : 5 = 0{,}012\ \mathrm{A}$$

Durch das Bestimmen des durchschnittlichen Fehlers grenzt man den Bereich ab, in dem der wahre Wert der Meßgröße liegt. Die Meßgröße kann um den Betrag des durchschnittlichen Fehlers größer oder kleiner sein als der Mittelwert aus den Meßwerten. Das bringt man im **Meßergebnis** zum Ausdruck:

$$I = \bar{I} \pm \Delta I = (3{,}44 \pm 0{,}012)\ \mathrm{A}\,.$$

Hat man nur wenige Messungen ausgeführt, die außerdem noch große Abweichungen aufweisen, dann ist es zweckmäßig, die größte Abweichung vom Mittelwert der Meßwerte als *Fehler* ΔI zu betrachten.

Relative Fehler. Der durchschnittliche Fehler gibt zwar die Meßungenauigkeit für eine Messung an. Will man die Messung aber in ihrer Genauigkeit mit anderen Messungen vergleichen, so berechnet man den *relativen Fehler*.

Der relative Fehler ist der Quotient aus durchschnittlichem Fehler und Mittelwert der Meßwerte.

$$\delta = \frac{\Delta I}{\bar{I}}$$

Er ist zahlenmäßig so groß wie der durchschnittliche Fehler, der auf eine Maßeinheit entfällt. Er ist eine dimensionslose Zahl.
Häufig wird er auch prozentual angegeben, das heißt, es wird errechnet, wieviel Prozent der durchschnittliche Fehler vom Mittelwert der Messungen ausmacht.
Der prozentuale Fehler ergibt sich, indem man berechnet, wieviel Prozent der durchschnittliche Fehler vom Mittelwert der Messungen ausmacht:

$$\frac{\delta\,\%}{100\,\%} = \frac{\Delta I}{\bar{I}}$$

$$\delta\,\% = \frac{\Delta I}{\bar{I}} \cdot 100\,\%\,.$$

In dem Beispiel ist:

$$\delta = \frac{\Delta I}{\bar{I}} = \frac{0{,}012}{3{,}44} \approx 0{,}0035$$

$$\delta\,\% = 0{,}0035 \cdot 100\,\% = 0{,}35\,\%\,.$$

Wäre bei einer anderen Messung $\delta = 0{,}012$ bzw. $\delta\,\% = 1{,}2\,\%$, so ist diese Messung weniger genau.

1.2. Das Ohmsche Gesetz

Aus der Fülle noch unbekannter Zusammenhänge entdeckte Georg Simon Ohm 1826 eine Gesetzmäßigkeit der Vorgänge im Stromkreis. Er schuf damit die Grundlage zum weiteren Erforschen der elektrischen Erscheinungen.

Den Zusammenhang von Spannung, Widerstand und Stromstärke zeigt das **Ohmsche Gesetz.**

In einem Gleichstromkreis ist für einen Stromkreisteil der Quotient aus Spannung und Stromstärke der elektrische Widerstand.

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}} \qquad R = \frac{U}{I} \qquad (1)$$

I	U	R
A	V	Ω

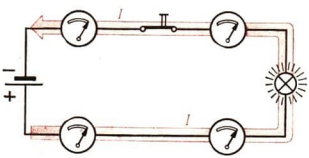
Danach ist $1\,\Omega = \frac{1\,\text{V}}{1\,\text{A}}$ und $1\,\text{A} = \frac{1\,\text{V}}{1\,\Omega}$.

15/1 Georg Simon Ohm

1.3. Der unverzweigte Stromkreis

1.3.1. Die Stromstärke

Durchfließt ein Strom nacheinander mehrere Widerstände, so spricht man von einer *Reihen-, Hintereinander-* oder *Serienschaltung.* Die in diesem Stromkreis vorhandenen freien Elektronen fließen bei einer angelegten Spannung, sie beschreiben einen Kreislauf und stauen sich an keiner Stelle.



15/2 Stromstärkenmessung an verschiedenen Stellen eines unverzweigten Stromkreises

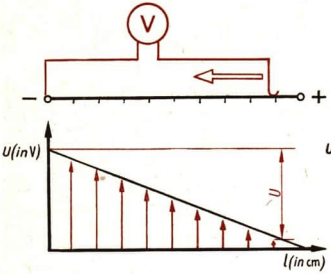
Die elektrische Stromstärke ist in einem unverzweigten Stromkreis an allen Stellen gleich groß.

1.3.2. Der Spannungsabfall

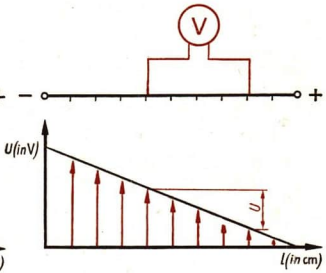
Zwischen den Anschlußstellen eines in einen Stromkreis geschalteten elektrischen Widerstandes ist eine Spannung meßbar. Man nennt diese Spannung in der Technik *Spannungsabfall.* Wählt man einen 100 cm langen Widerstandsdraht und mißt die

Spannung in bestimmten Abständen nacheinander (z. B. 90 cm, 80 cm usw.), dann kann man aus den über der Leiterlänge aufgetragenen Werten (Bild 16/1) erkennen:

Die Spannung nimmt in einem Stromkreis ab.
Die Spannungsabnahme in einem Widerstandsdraht erfolgt linear.



16/1 Abwicklung des Stromkreises mit grafischer Darstellung der Spannungsabnahme



16/2 Spannungsabfall an einem Leiterstück

Schließt man den Spannungsmesser an zwei Punkte auf dem Widerstandsdraht an, so mißt man die Spannungsabnahme zwischen ihnen. Man bezeichnet diese Spannungsabnahme zwischen zwei Punkten als den **Spannungsabfall.**

An jedem stromdurchflossenen Widerstand tritt ein Spannungsabfall auf.

So besteht zwischen zwei beliebigen Punkten eines Stromkreises eine Spannung, die man nach dem Ohmschen Gesetz berechnen kann.

$$U = I \cdot R$$

Der Spannungsabfall an den Zuleitungen zum Elektrogerät ist ein Spannungsverlust.

Beispiel

Wie groß ist der Spannungsabfall U_v in einer Wohnhauszuleitung von $R_L = 0{,}25\ \Omega$, wenn die Abnehmer insgesamt $I = 44$ A dem Netz entnehmen?

Gegeben:

Widerstand $R_L = 0{,}25\ \Omega$
Stromstärke $I = 44$ A

Gesucht:

Spannungsabfall U_v (in V)

Lösung:

$U_v = I \cdot R_L$
$U_v = 44\ \text{A} \cdot 0{,}25\ \Omega$
$U_v = 11\ \text{V}$

Die vorhandene Spannung von 220 V würde in dem Wohnhausnetz auf 220 V – 11 V = 209 V abfallen; das sind 5% Spannungsabfall!

1.3.3. Beachtung von Meßfehlern bei Produkten und Quotienten

Am vorangestellten Beispiel sieht man, daß in der Physik und der Technik oft aus Meßwerten verschiedener Meßgrößen eine andere physikalische Größe errechnet wird. Da die Meßergebnisse mit Fehlern behaftet sind, muß zwangsläufig das Rechenergebnis ebenfalls einen Fehler haben. Es ist nun festzustellen, wie sich Fehler auf ein Rechenergebnis auswirken.
Im folgenden werden die Fehler eines Produktes und eines Quotienten behandelt, auf der Seite 28 die Fehler einer Summe und einer Differenz.

Fehler eines Produktes. Bei der Berechnung eines Spannungsabfalles ist das Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand zu ermitteln.

$$U = I \cdot R$$

Beide Werte sind durch Messungen mit einem Fehler behaftet.

$$I = \bar{I} \pm \Delta I$$
$$R = \bar{R} \pm \Delta R$$

Das Produkt hat also ebenfalls einen Fehler.

$$U = \bar{U} \pm \Delta U = I \cdot R$$
$$U = \bar{U} \pm \Delta U = (\bar{I} \pm \Delta I) \cdot (\bar{R} \pm \Delta R)$$
$$U = \bar{U} \pm \Delta U = \bar{I} \cdot \bar{R} \pm \bar{I} \cdot \Delta R \pm \bar{R} \cdot \Delta I + \Delta I \cdot \Delta R$$

Dabei ist: $\bar{U} = \bar{I} \cdot \bar{R}$.

Der Mittelwert eines Produktes ist gleich dem Produkt der Mittelwerte der Meßwerte.

Der Fehler des Produktes ist:

$$|\Delta U| = |\bar{I} \cdot \Delta R| + |\bar{R} \cdot \Delta I| + |\Delta I \cdot \Delta R|$$

Die durchschnittlichen Fehler sind im allgemeinen klein gegenüber den Meßwerten. So ist das Produkt der beiden durchschnittlichen Fehler $\Delta I \cdot \Delta R$ gegenüber den Produkten $\bar{I} \cdot \Delta R$ und $\bar{R} \cdot \Delta I$ so klein, daß man es vernachlässigen kann.

Als durchschnittlicher Fehler des Produktes wird betrachtet:

$$|\Delta U| = \bar{I} \cdot |\Delta R| + \bar{R} \cdot |\Delta I|$$

Beispiel

Ein Vorschaltwiderstand hat einen Widerstand von $R = (181 \pm 0{,}5)\ \Omega$. Es fließt ein Strom von $I = (4{,}2 \pm 0{,}1)$ A. Wie groß sind der Spannungsabfall und sein Fehler?

Gegeben:	*Gesucht:*
$R = (181 \pm 0{,}5)\ \Omega$	U (in V)
$I = (4{,}2 \pm 0{,}1)$ A	

Lösung:

$$\overline{U} = \overline{I} \cdot \overline{R} = 181\ \Omega \cdot 4{,}2\ \text{A} \approx 760\ \text{V}$$

$$|\Delta U| = \overline{I}\,|\Delta R| + \overline{R}\,|\Delta I| = 4{,}2 \cdot 0{,}5\ \text{V} + 181 \cdot 0{,}1\ \text{V}$$

$$|\Delta U| = 2{,}1\ \text{V} + 18{,}1\ \text{V}$$

$$|\Delta U| \approx 20\ \text{V}$$

$$\underline{\underline{U = \overline{U} \pm \Delta U = (760 \pm 20)\ \text{V}}}$$

Hieraus folgt, daß es im obigen Beispiel keinen Zweck hat, die Spannung U genauer als auf drei Stellen anzugeben. Man soll sich ebenfalls merken, daß Fehler immer nur in gerundeten Zahlen mit höchstens zwei zählenden Stellen anzugeben sind. Würde man das vernachlässigte Glied $\Delta I \cdot \Delta R$ ausrechnen, ergäbe sich:

$$\Delta I \cdot \Delta R = 0{,}5 \cdot 0{,}1\ \text{V} = 0{,}05\ \text{V}.$$

Um den relativen Fehler des Produktes zu berechnen, muß der durchschnittliche Fehler durch den Mittelwert dividiert werden:

$$\left|\frac{\Delta U}{\overline{U}}\right| = \frac{\overline{I} \cdot |\Delta R| + \overline{R} \cdot |\Delta I|}{\overline{I} \cdot \overline{R}}$$

$$\left|\frac{\Delta U}{\overline{U}}\right| = \left|\frac{\Delta I}{\overline{I}}\right| + \left|\frac{\Delta R}{\overline{R}}\right|$$

Der relative Fehler eines Produktes ist gleich der Summe der Beträge der relativen Teilfehler.

Fehler eines Quotienten. Bei der Berechnung von Stromstärken und Widerständen treten Quotienten auf:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{und} \quad R = \frac{U}{I}.$$

Hier sei ohne Beweis mitgeteilt:

Der Fehler des Quotienten $I = \frac{U}{R}$ ist nach der Formel zu berechnen:

$$|\Delta I| = \frac{\overline{U} \cdot |\Delta R| + \overline{R} \cdot |\Delta U|}{\overline{R}^2}$$

Der relative Fehler des Quotienten ist gleich der Summe der Beträge der relativen Teilfehler.

$$\left|\frac{\Delta I}{\overline{I}}\right| = \left|\frac{\Delta U}{\overline{U}}\right| + \left|\frac{\Delta R}{R}\right|$$

Beispiel

Ein Elektrogerät hat einen Widerstand von $R = (52{,}6 \pm 0{,}4)\ \Omega$. Es wird an die Netzspannung angeschlossen: $U = (219{,}0 \pm 0{,}8)\ \text{V}$.
Wie groß sind die Stromstärke und ihr prozentualer Fehler!

Gegeben:

$R = (52{,}6 \pm 0{,}4)\ \Omega$

$U = (219{,}0 \pm 0{,}8)\ \mathrm{V}$

Gesucht:

I (in A)

δ (in %)

Lösung:

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}}{\bar{R}} = \frac{219{,}0\ \mathrm{V}}{52{,}6\ \Omega} \approx 4{,}16\ \mathrm{A}$$

$$|\Delta I| = \frac{\bar{U} \cdot |\Delta R| + \bar{R} \cdot |\Delta U|}{\bar{R}^2}$$

$$|\Delta I| = \frac{219{,}0 \cdot 0{,}4 + 52{,}6 \cdot 0{,}8}{52{,}6^2}\ \mathrm{A}$$

$$|\Delta I| = \frac{87{,}60 + 42{,}08}{2767}\ \mathrm{A}$$

$$|\Delta I| = \frac{129{,}68}{2767}\ \mathrm{A}$$

$$|\Delta I| \approx 0{,}047\ \mathrm{A}$$

Weiter aufgerundet ist $\Delta I = 0{,}05$ A zu setzen.

$$\underline{\underline{I = \bar{I} \pm \Delta I = (4{,}16 \pm 0{,}05)\ \mathrm{A}}}$$

Der relative Fehler ist zu berechnen:

$$\delta = \frac{\Delta I}{\bar{I}} = \frac{0{,}05}{4{,}16}$$

$$\delta = \frac{\Delta I}{\bar{I}} = 0{,}012$$

Der prozentuale Fehler ist dann:

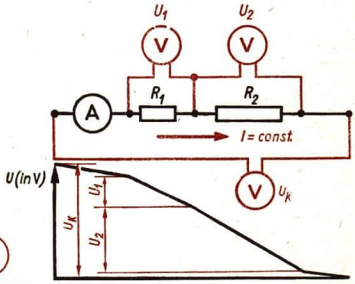
$$\underline{\underline{\delta\% = 1{,}2\%}}$$

1.3.4. Das Kirchhoffsche Spannungsverteilungsgesetz

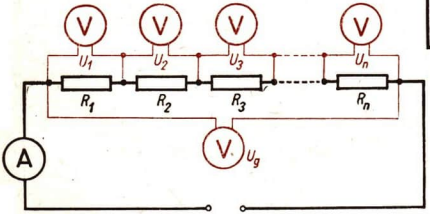
Im Bild 19/1 wird noch einmal ein bekanntes Gesetz dargestellt:

Die Summe der Spannungsabfälle an zwei Widerständen in Reihenschaltung ist gleich der Gesamtspannung.

Führen Sie Versuche durch, indem Sie die Zahl der Widerstände vergrößern, die hintereinander geschaltet werden! Abgesehen von Meßfehlern werden sie feststellen, daß das Gesetz auch für mehr als zwei Widerstände Gültigkeit hat.



19/1 Reihenschaltung von zwei Widerständen mit unterschiedlicher Leistungsaufnahme



19/2 Reihenschaltung mehrerer Widerstände

Bei der Reihenschaltung von Widerständen ist die Summe der Spannungsabfälle gleich der Gesamtspannung.

$$\boxed{U_g = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots + U_n} \tag{2.1}$$

Dieses Gesetz wurde von dem deutschen Physiker ROBERT KIRCHHOFF gefunden und heißt nach ihm das **Kirchhoffsche Spannungsverteilungsgesetz**. Es ist eigentlich noch umfassender, als wir es hier betrachten, und es ist auch auf einen verzweigten Stromkreis anzuwenden.

Da alle in Reihe geschalteten Widerstände von dem gleichen Strom I durchflossen werden, erhält man auch die Größe des Gesamtwiderstandes R_g mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes:

$$I \cdot R_g = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \cdots + I \cdot R_n .$$

In der Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe aller Teilwiderstände.

$$\boxed{R_g = R_1 + R_2 + \ldots + R_n} \tag{2.2}$$

Bildet man das Verhältnis zweier Teilspannungen, so ergibt sich:

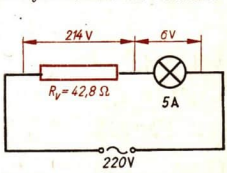
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I \cdot R_1}{I \cdot R_2} .$$

Die Spannungsabfälle verhalten sich in der Reihenschaltung wie die dazugehörigen Widerstände.

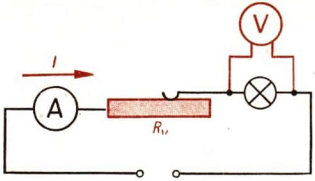
$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}} \tag{2.3}$$

1.3.5. Vorschaltwiderstände

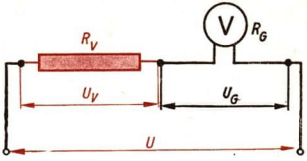
Häufig ist für den Betrieb eines Elektrogerätes eine kleinere Spannung notwendig, als sie von der Spannungsquelle geliefert wird. Diese Spannung kann man durch Zuschalten eines festen oder veränderlichen *Vorwiderstandes* R_v erreichen. Im Vorwiderstand tritt ein Spannungsabfall auf, so daß die Spannung am Gerät kleiner ist als an der Spannungsquelle. Es ist aber zu beachten, daß im Vorwiderstand elektrische Energie in Wärmeenergie umgesetzt wird. Deshalb ist dieses Verfahren unwirtschaftlich. Man setzt es nur bei kurzzeitigem Betrieb ein oder wenn kleinere Leistungen benötigt werden. Die Saalbeleuchtung in Kinos und Theatern wird zum Beispiel über einen veränderlichen Vorwiderstand verdunkelt und dann ausgeschaltet.



20/1 Fester Vorwiderstand an einem Mikroprojektor



21/1 Veränderlicher Vorwiderstand



21/2 Meßbereichserweiterung eines Spannungsmessers durch Vorwiderstand

1.3.6. Erweitern des Meßbereichs von Spannungsmessern

Die Meßwerke von Drehspulgeräten sind meist so gebaut, daß schon bei einer Spannung von 100 bis 200 mV ein Strom fließt, der den Zeiger voll ausschlagen läßt. Bei Dreheisengeräten liegt der Wert etwas höher. Zum Messen einer höheren Spannung muß in Reihe mit dem Meßwerk ein Vorschaltwiderstand R_v geschaltet werden, an dem ein entsprechender Spannungsabfall U_v auftritt.
Der neue Meßbereich mit der maximalen Spannung U_M soll n-mal so groß sein wie der Meßbereich des Gerätes ohne Vorwiderstand R_v:

$$U_M = n \cdot U_G.$$

Die Spannung U_M muß die Summe der Spannungsabfälle am Vorwiderstand U_v und am Meßgerät U_G sein:

$$U_v + U_G = U_M,$$

$$U_v + U_G = n \cdot U_G.$$

Die Spannungen werden nach dem Ohmschen Gesetz ausgedrückt und die Gleichung durch die Stromstärke I dividiert, die für den Vorwiderstand R_v und den Gerätewiderstand R_G die gleiche ist:

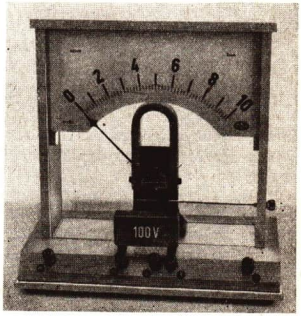
$$I \cdot R_v + I \cdot R_G = n \cdot I \cdot R_G,$$

$$R_v + R_G = n \cdot R_G.$$

Daraus folgt:

$$\boxed{R_v = (n - 1) \cdot R_G} \qquad (3)$$

Wir entnehmen dieser Formel:
Um bis zur n-fachen Spannung mit dem gleichen Meßgerät arbeiten zu können, muß der Vorschaltwiderstand das $(n - 1)$-fache des Gerätewiderstandes sein.



21/3 Demonstrationsgerät mit Vorwiderstand

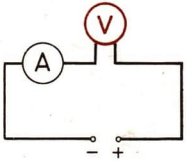
Beispiele

1. Für eine Verdopplung des Meßbereichs ($n = 2$) ergibt sich:
$R_v = R_G$.

2. Für eine Verzehnfachung des Meßbereichs ($n = 10$) ergibt sich:
$R_v = 9 \cdot R_G$.

Ist am Meßgerät der Gerätewiderstand nicht angegeben, legt man den Spannungsmesser an eine kleine Spannung innerhalb seines Meßbereiches und schaltet einen Strommesser vor das Gerät. Der Spannungsmesser zeigt die Spannung (U) und der Strommesser die Stromstärke (I) an. Der Gerätewiderstand ist nach dem Ohmschen Gesetz zu errechnen:

$$R_G = \frac{U}{I}.$$



22/1 Bestimmung des Gerätewiderstandes eines Spannungsmessers

Beispiel

Ein Meßgerät hat einen Meßbereich von 10 V. Es wird an eine Spannung von 5 V angeschlossen. Die Stromstärke beträgt 1 mA. Wie groß ist der Gerätewiderstand?

Gegeben:

Spannung $U = 5\,\text{V}$

Stromstärke $I = 1\,\text{mA}$

Gesucht:

Gerätewiderstand R_G (in Ω)

Lösung:

$$R_G = \frac{U}{I}$$

$$R_G = \frac{5\,\text{V}}{0.001\,\text{A}}$$

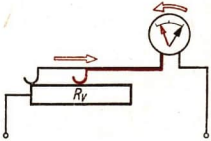
$$\underline{\underline{R_G = 5000\,\Omega}}$$

Das Meßgerät hat bei einem Meßbereich von 10 V einen Gerätewiderstand von 5000 Ω.

1.3.7. Erweitern der Meßbereiche durch Messung

In der Praxis lassen sich Meßbereiche auch ohne Berechnungen hinreichend genau erweitern.

Der Spannungsmesser wird an eine Spannung innerhalb der oberen Hälfte seines Meßbereichs gelegt und ein veränderlicher Vorwiderstand mit dem Gerät in Reihe geschaltet. Dieser wird zunächst auf den Wert Null eingestellt. Man liest den Zeigerausschlag des Gerätes genau ab und stellt den Vorwiderstand dann so ein, daß der Zeigerausschlag nur noch den gewünschten Bruchteil des ursprünglichen Ausschlages beträgt



22/2 Experimentelle Meßbereichserweiterung eines Spannungsmessers

(Bild 22/2.). Für das Verdoppeln des Meßbereiches muß der Zeigerausschlag auf die Hälfte herabgesetzt werden, für das Verzehnfachen auf ein Zehntel.

Bei den industriell gefertigten Vielfachmeßgeräten sind die Vorschaltwiderstände für die verschiedenen Meßbereiche eingebaut und werden durch einen Wahlschalter eingeschaltet.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Wie groß ist der Spannungsverlust in einer Leitung mit einem Widerstand von 12,3 Ω, wenn ein Strom von 17,4 A fließt?
2. Wie viele Glühlampen mit einer Betriebsspannung von 14 V kann man in Reihe an die Netzspannung von 220 V legen?
3. Die Spulen eines Elektromagneten haben einen Widerstand von 60 Ω und sind mit 2 A belastbar. Welcher Widerstand muß vorgeschaltet werden, wenn man den Magneten an das 220-V-Netz anschließen will?
4. Wie verteilt sich die Spannung von 220 V auf die drei Widerstände von 15 Ω, 20 Ω, 25 Ω, die in einem Stromkreis hintereinandergeschaltet sind? Wie groß ist der in der Leitung fließende Strom?
5. Ein Drehspulgerät hat einen Gerätewiderstand von 50 Ω und erreicht bei 2 mA seinen größten Ausschlag. Was für ein Vorschaltwiderstand muß dem Gerät vorgelegt werden, wenn man es als Spannungsmesser für einen Meßbereich bis zu 250 V verwenden will?
6. Zeichnen Sie den Schaltplan eines Stromkreises zum Speisen eines elektrischen Wärmegerätes mit eingebautem Schiebewiderstand zum Verändern der Stromstärke! Ein Strommesser ist vorzusehen!

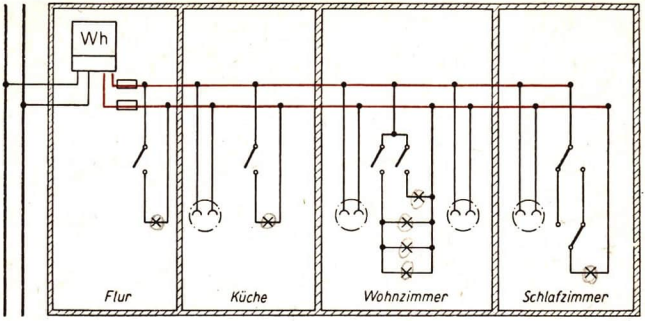
1.4. Der verzweigte Stromkreis

1.4.1. Das Kirchhoffsche Stromverzweigungsgesetz

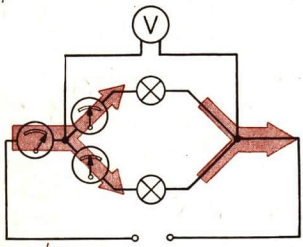
In technischen Schaltungen sind sehr häufig Widerstände parallel an eine Spannungsquelle angeschlossen. Als Beispiel wird in dem Bild 24/1 auf Seite 24 die Schaltung einer Wohnungsanlage gezeigt.
Die Gesetzmäßigkeiten für die *Parallelschaltung* von zwei Widerständen sind schon bekannt.

Parallelgeschaltete Widerstände liegen an der gleichen Spannung.
Die Summe der Stromstärken in den parallelgeschalteten Widerständen ist gleich der Stromstärke im unverzweigten Teil des Stromkreises.

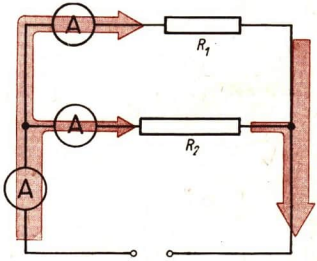
Bei einem Versuch, in dem mehr als zwei Widerstände zwischen zwei Verzweigungspunkten parallel geschaltet werden, finden wir, daß das Gesetz auch für jede beliebige Zahl von Widerständen Gültigkeit hat. In den Versuchen sind kleine Abweichungen durch Ungenauigkeiten der Meßgeräte und der Ablesung zu erwarten.



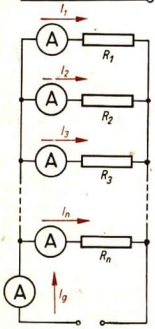
24/1



24/2



24/3



24/4

24/1 Schematisches Schaltbild des Versorgungsnetzes einer Wohnung

24/2 Parallelschaltung zweier gleicher Glühlampen

24/3 Parallelschaltung von ungleichen Widerständen

24/4 Parallelschaltung mehrerer Widerstände

Das Gesetz heißt das **Kirchhoffsche Stromverzweigungsgesetz.**

In einer Stromverzweigung ist die Summe der Teilströme gleich dem Gesamtstrom.

$$\boxed{I_g = I_1 + I_2 + \dots + I_n} \tag{4.1}$$

Drückt man die Teilstromstärken nach dem Ohmschen Gesetz aus, dann ergibt sich das Verhältnis der Teilwiderstände zum Gesamtwiderstand:

$$\frac{U}{R_g} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}.$$

$$\boxed{\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \tag{4.2}$$

Der Kehrwert des Gesamtwiderstandes einer Stromverzweigung ist gleich der Summe der Kehrwerte der Zweigwiderstände.

Der Gesamtwiderstand R_g ist immer kleiner als der kleinste Teilwiderstand, da jeder zu dem kleinsten Teilwiderstand parallelgeschaltete Widerstand einen zusätzlichen Stromweg darstellt.
Verwendet man den Leitwert, dann ist: $G_1 + G_2 + \dots + G_n = G_g$.

Der Gesamtleitwert in einer Parallelschaltung ist die Summe der Leitwerte aller Stromzweige.

Der Gesamtwiderstand R_g einer Parallelschaltung von drei Widerständen errechnet sich aus $\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$. Daraus folgt $\frac{1}{R_g} = \frac{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}$

und schließlich

$$\boxed{R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}} \tag{4.3}$$

Untersucht man das Verhältnis der Teilströme zu den Teilwiderständen, dann erhält man nach dem Ohmschen Gesetz

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}}, \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

$$\boxed{I_1 : I_2 = R_2 : R_1} \tag{4.4}$$

In einer Stromverzweigung verhalten sich die Zweigströme umgekehrt wie die Widerstände der Zweige.

1.4.2. Erweitern des Meßbereichs von Strommessern

Damit die Erwärmung und damit eine Widerstandsveränderung innerhalb der Strommesser in zulässigen Grenzen bleibt, sind die Meßwerke so eingerichtet, daß sie nur von sehr kleinen Strömen in der Größenordnung von einigen mA durchflossen werden. Um mit diesen Geräten große Stromstärken messen zu können, schaltet man parallel zum Gerätewiderstand R_G einen *Nebenwiderstand* R_N in den Stromkreis. Durch den Nebenwiderstand fließt dann ein Teil des Gesamtstromes am Meßwerk vorbei.
Die Erweiterung des Meßbereichs auf das n-fache des Meßbereichs ohne Nebenwiderstand erfordert also die Aufteilung des Gesamtstromes I_M in

$$I_M = I_N + I_G$$

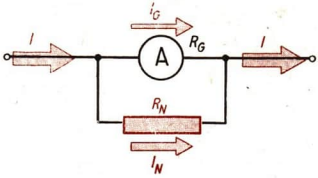
$$I_N + I_G = n \cdot I_G.$$

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes ergibt sich daraus:

$$\frac{U}{R_N} + \frac{U}{R_G} = n \cdot \frac{U}{R_G}$$

$$\frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_G} = n \cdot \frac{1}{R_G}$$

$$\frac{1}{R_N} = (n-1)\frac{1}{R_G}$$



26/1 Nebenwiderstand an einem Strommesser

$$\boxed{R_N = \frac{R_G}{(n-1)}} \qquad (5)$$

Wir entnehmen dieser Formel:
Um bis zur n-fachen Stromstärke mit gleichem Meßgerät arbeiten zu können, muß der Nebenwiderstand der $(n-1)$te Teil des Gerätewiderstandes sein.
Die Nebenwiderstände werden häufig mit dem englischen Wort *Shunt* bezeichnet.

Beispiel

Bei einem Meßgerät soll der Meßbereich von 0,5 A auf 25 A erweitert werden.

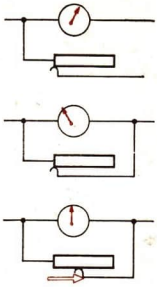
Gegeben:	*Gesucht:*	*Lösung:*
$n = 50$	Nebenwiderstand R_N (in Ω)	$R_N = \frac{44\,\Omega}{49}$
$R_G = 44\,\Omega$		$\underline{\underline{R_N = 0{,}898\,\Omega}}$
$R_N = \frac{R_G}{49}$		

Je größer der Meßbereich werden soll, um so kleiner muß der Nebenwiderstand sein.
Für die Messung großer Stromstärken werden die Nebenwiderstände aus dickem Draht oder aus Blechen hergestellt, damit sie sich nicht zu stark erwärmen. Sie werden auf den notwendigen Wert abgeglichen, indem sie eingesägt oder befeilt oder aber mit Lötzinn verstärkt werden.

1.4.3. Erweitern der Meßbereiche durch Messung

Für die Praxis kann man Meßbereiche ohne Berechnung hinreichend genau erweitern.

Der Strommesser wird so in einen Stromkreis ohne Vorwiderstand geschaltet, daß er von einem Strom durchflossen wird, dessen Stärke innerhalb der oberen Hälfte seines Meßbereichs liegt. Dann schaltet man einen veränderlichen Widerstand in den Stromkreis und legt den Strommesser parallel dazu. Den Widerstand stellt man so ein, daß der Zeigerausschlag auf die Hälfte oder auf ein Viertel zurückgeht. Der Meßbereich ist dann verdoppelt oder vervierfacht.



27/1 Experimentelle Meßbereichserweiterung eines Strommessers

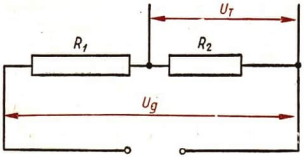
Die Schaltung muß so aufgebaut sein, daß sich der Nebenwiderstand nicht lösen kann, ohne daß der Stromkreis dadurch unterbrochen wird.

- *Welche Gefahren bestehen sonst für das Meßwerk?*

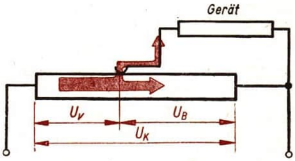
In die Vielfachmeßgeräte sind Nebenwiderstände fest eingebaut und lassen sich für die verschiedenen Meßbereiche einschalten. Für besonders große Stromstärken werden zusätzliche Nebenwiderstände zum Anschrauben geliefert.

1.4.4. Die Spannungsteilerschaltung

Die Spannungsteilerschaltung dient zum Einstellen bestimmter Spannungen. Sie wird besonders häufig in der Funktechnik angewendet. Auch bei physikalischen Versuchen wird sie oft zum Einstellen von Spannungen eingesetzt.
Dabei werden die beiden Kirchhoffschen Gesetze angewendet. Schaltet man zwei Widerstände in Reihe, so fällt nach dem Spannungsverteilungsgesetz an jedem Widerstand die Spannung um einen bestimmten Betrag ab. Die Spannung zwischen den Enden der Schaltung wird im Verhältnis der Widerstände geteilt. Auf dieser Grundlage werden feste Spannungsteilerschaltungen gebaut. Dreh- und Schiebewiderstände haben einen Gleitkontakt, durch den der ganze Widerstand in zwei Teile geteilt wird.



27/2 Feste Spannungsteilerschaltung

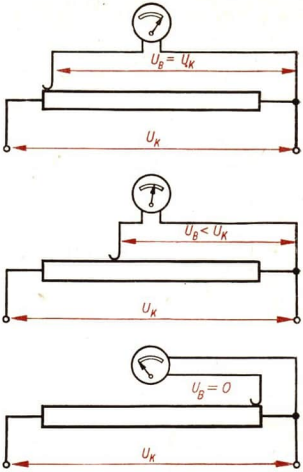


27/3 Veränderliche Spannungsteilerschaltung

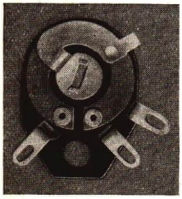
Legt man den ganzen Widerstand in einen Stromkreis, so kann man zwischen dem Gleitkontakt und dem einen Endpunkt die Spannung abgreifen, die an dem einen Teilwiderstand abfällt. Durch Verschieben des Gleitkontaktes ist diese Spannung veränderlich.

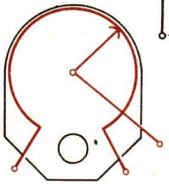
Der Widerstand der Spannungsteilerschaltung liegt mit seinen Enden immer an der Spannungsquelle.
Die Spannung wird zwischen dem einen Ende und dem Gleitkontakt abgegriffen.

Durch die Widerstände des Spannungsteilers fließen nach dem Stromverzweigungsgesetz immer Ströme. Die vom Spannungsteiler aufgenommene elektrische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt; das ist ein Verlust. Deshalb wird die



28/1 Einstellung mit einer Spannungsteilerschaltung





28/2 Potentiometer

Spannungsteilerschaltung nur dort angewendet, wo kleine Ströme oder nur kurzzeitig elektrische Energie benötigt werden. Solche Schaltungen werden in Rundfunk- und Fernsehgeräten oder bei physikalischen Versuchen angewendet. In der Rundfunktechnik bezeichnet man einen veränderlichen Spannungsteilerwiderstand als Potentiometer. Der Vorteil der Spannungsteilerschaltung mit Schiebewiderständen gegenüber der Verwendung von Vorwiderständen besteht darin, daß die Spannung von Null bis zur Klemmenspannung des Stromversorgungsgerätes eingestellt werden kann.

1.4.5. Beachtung von Meßfehlern bei Summen und Differenzen

Fehler einer Summe. Nach dem Spannungsverteilungsgesetz sollen zwei Spannungen addiert werden:

$$U_1 = \overline{U}_1 \pm \Delta U_1 = (4{,}3 \pm 0{,}1)\ \mathrm{V}$$

$$U_2 = \overline{U}_2 \pm \Delta U_2 = (7{,}2 \pm 0{,}2)\ \mathrm{V}.$$

Den Mittelwert der Summe der Spannungen U_g findet man, indem man die beiden Mittelwerte addiert:

$$\bar{U}_g = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 4{,}3\ \text{V} + 7{,}2\ \text{V} = 11{,}5\ \text{V}.$$

Der durchschnittliche Fehler der Gesamtspannung ergibt sich, indem man die absoluten Beträge der Fehler der Meßergebnisse addiert. Es muß der maximale Fehler angenommen werden. Dieser tritt ein, wenn die wahren Werte der Meßgröße beide an der unteren bzw. oberen Fehlergrenze liegen. Es gilt also:

1. $U_1 = \bar{U}_1 - |\Delta U_1| = 4{,}3\ \text{V} - 0{,}1\ \text{V} = 4{,}2\ \text{V}$

und $U_2 = \bar{U}_2 - |\Delta U_2| = 7{,}2\ \text{V} - 0{,}2\ \text{V} = 7{,}0\ \text{V}.$

So ist $U_1 + U_2 = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 - (|\Delta U_1| + |\Delta U_2|) = (11{,}5 - 0{,}3)\ \text{V}.$

2. $U_1 = \bar{U}_1 + |\Delta U_1| = 4{,}3\ \text{V} + 0{,}1\ \text{V} = 4{,}4\ \text{V}$

und $U_2 = \bar{U}_2 + |\Delta U_2| = 7{,}2\ \text{V} + 0{,}2\ \text{V} = 7{,}4\ \text{V}.$

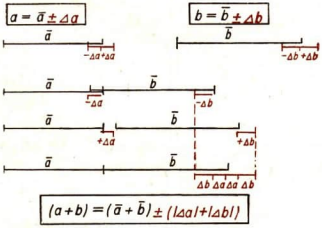
So ist $U_1 + U_2 = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + (|\Delta U_1| + |\Delta U_2|) = (11{,}5 + 0{,}3)\ \text{V}.$

Demnach ist:

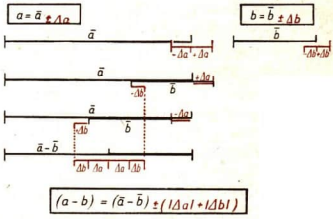
$$U_1 + U_2 = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 \pm (|\Delta U_1| + |\Delta U_2|)$$

$$\underline{\underline{U_1 + U_2 = (11{,}5 \pm 0{,}3)\ \text{V}}}$$

Der Fehler einer Summe ist gleich der Summe der Teilfehler.



29/1 Fehler einer Summe



29/2 Fehler einer Differenz

Fehler einer Differenz. Für eine Differenz gelten die gleichen Betrachtungen wie für die Summe.

Der Mittelwert der Differenz ist gleich der Differenz der Mittelwerte.

Für den Fehler muß wieder der maximale Fehler berücksichtigt werden. Dieser ergibt sich, wenn von den wahren Werten der Meßgrößen der eine an der unteren Fehlergrenze und der andere an der oberen Fehlergrenze liegt. Die Beträge der Fehler sind also auch hier zu addieren.

Es ist nicht sinnvoll, einen Wert als Differenz aus zwei Meßwerten zu berechnen, wenn diese beiden Meßwerte sich nur wenig voneinander unterscheiden. Es ergibt sich dabei ein großer relativer Fehler.

Beispiel

Es steht eine Klemmenspannung zur Verfügung: $U_k = (221 \pm 2)$ V. An einem Vorschaltwiderstand vor einer Glühlampe tritt ein Spannungsabfall von $U_v = (144 \pm 3)$ V auf. Wie hoch ist die Spannung an der Glühlampe?

Gegeben:

$U_k = (221 \pm 2)$ V

$U_v = (144 \pm 3)$ V

Gesucht:

U_L (in V)

Lösung:

$\overline{U}_L = \overline{U}_k - \overline{U}_v$

$\overline{U}_L = 221\text{ V} - 144\text{ V}$

$\overline{U}_L = 77\text{ V}$

$\underline{\underline{U_L = (77 \pm 5)\text{ V.}}}$

$\Delta U_L = |\Delta U_k| + |\Delta U_v|$

$\Delta U_L = 2\text{ V} + 3\text{ V}$

$\Delta U_L = 5\text{ V}$

In der Praxis bestehen durch Leitungs- und Übergangswiderstände und Temperatureinflüsse noch eine Reihe von systematischen Fehlern (s. S. 12), die ein Rechnen mit gerundeten Werten rechtfertigen.

1.4.6. Widerstandsbestimmung

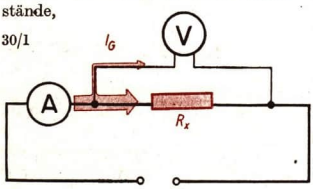
Die Berechnung eines Widerstandes mit dem Ohmschen Gesetz enthält immer Ungenauigkeiten, weil auch bei kleinen Widerständen nach dem Stromverzweigungsgesetz der Strommesser den Teilstrom I_G mit anzeigt. Dieser Teilstrom fließt über den – allerdings sehr hohen – Widerstand des Spannungsmessers (Bild 30/1). Nach dem Bild 30/2 schaltet man, wenn große Widerstände (gegenüber R_v) bestimmt werden sollen. Hierbei entsteht ebenfalls ein Fehler; denn der Spannungsmesser zeigt nun auch den Spannungsabfall U_G des Strommessers mit an. Dieser Meßfehler ist sehr klein, weil auch R_G des Strommessers sehr klein ist.

Merkregel:

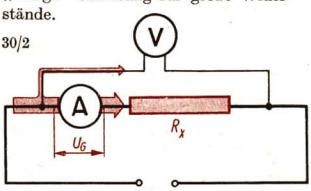
„Kurze" Schaltung für kleine Widerstände,

„Lange" Schaltung für große Widerstände.

30/1



30/2

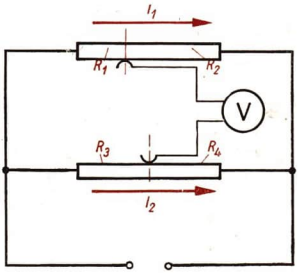


1.4.7. Wheatstonesche Meßbrücke

Der englische Physiker CHARLES WHEATSTONE hat aus zwei Spannungsteilern eine Schaltung entwickelt, die als *Meßbrücke* bezeichnet wird und zum Bestimmen von Widerständen dient.

In einem Vorversuch machen wir uns die Wirkungsweise dieser Schaltung klar.

Man schaltet zwei Schiebewiderstände parallel und verbindet die Gleitkontakte durch eine Brückenleitung, in die man einen Spannungsmesser legt (Bild 31/1). Der eine Widerstand wird durch den Gleitkontakt in die Widerstände R_1 und R_2, der andere in die Widerstände R_3 und R_4 unterteilt. Durch die Widerstände R_1 und R_2 fließt der Strom I_1 und durch die Widerstände R_3 und R_4 der Strom I_2. Durch Verschieben des Gleitkontaktes erreicht man, daß zwischen den Endpunkten der Brückenleitung (Meßgerät) keine Spannung besteht und der Brückenstrom Null wird. Dann ist der Spannungsabfall an R_1 gleich dem Spannungsabfall an R_3 und auch der Spannungsabfall an R_2 gleich dem Spannungsabfall an R_4.



31/1 Vorversuch zur Erläuterung der Wirkungsweise der Widerstandsmeßbrücke

$$U_1 = U_3 \qquad\qquad U_2 = U_4$$

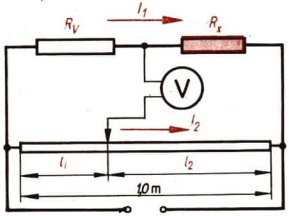
$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_3 \qquad\qquad I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_4$$

Die erste Gleichung wird durch die zweite dividiert, und man erhält das Verhältnis:

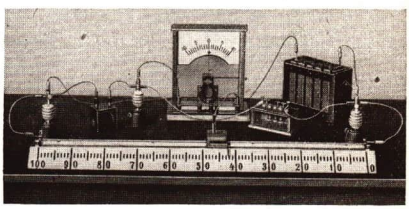
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

In der Meßbrücke ersetzt man den Widerstand R_3 durch den unbekannten Widerstand R_x und den Widerstand R_4 durch einen bekannten Vergleichswiderstand R_v. Für die Widerstände R_1 und R_2 wird ein Widerstandsdraht mit einer Länge von 1,0 m benutzt, auf dem ein Schleifkontakt gleitet (Bild 31/2).

31/2



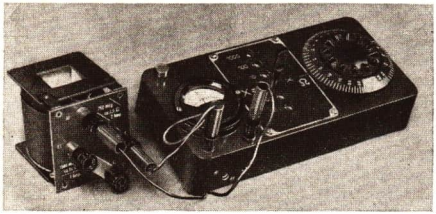
31/3 Meßbrücke für Unterrichtszwecke



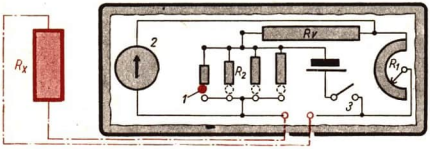
Da der Widerstand eines homogenen Leiters mit konstantem Querschnitt direkt proportional seiner Länge ist, kann man für R_1 und R_2 die Längen l_1 und l_2 einsetzen.

$$\frac{R_x}{R_v} = \frac{l_1}{l_2}, \quad \text{daraus folgt} \quad \boxed{R_x = R_v \cdot \frac{l_1}{l_2}.} \tag{6}$$

Für den Gebrauch in der Praxis werden von der Industrie handliche Geräte nach dem Prinzip der **Meßbrücke** hergestellt.



32/1 Meßbrücke



Die technische Meßbrücke enthält als Spannungsquelle eine Taschenlampenbatterie. Durch einen Kontaktstöpsel (1) können verschiedene Vergleichswiderstände (R_2) eingeschaltet werden. Der Widerstand (R_1) der Meßbrücke ist ein Drehwiderstand. Der Schleifkontakt wird durch einen Drehknopf betätigt, auf dem eine Skale angebracht ist. Das Meßgerät (2) ist mit Nullpunktmittellage ausgeführt. Der zu messende Widerstand (R_x) wird an zwei Buchsen angeschlossen. Das Gerät wird immer nur kurzzeitig mit einem Druckschalter (3) in Betrieb gesetzt. Durch die richtige Wahl des Vergleichswiderstandes und Einregeln des Drehknopfes ist der Strom in der Brücke auf Null zu regulieren. Die Größe des gesuchten Widerstandes ergibt sich als Produkt aus der Skalenablesung und der Widerstandsangabe neben dem Kontaktstöpsel.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Für welche Stromstärke muß die Sicherung eines Stromkreises mindestens bemessen sein, wenn folgende Geräte parallel geschaltet sind: 2 Glühlampen (0,45 A), 1 Glühlampe (0,18 A), 1 Heizofen (5,45 A), 1 Radioapparat (0,27 A), 1 Staubsauger (2,27 A)?

2. In einer Werkstatt sind 27 Glühlampen, parallel geschaltet, in Betrieb. Jede Lampe hat einen Widerstand von 800 Ω und nimmt einen Strom von 0,27 A auf.

   2.1. Wie hoch ist die Spannung an jeder Lampe?

   2.2. Wie groß ist die Gesamtstromstärke?

   2.3. Wie groß ist der Gesamtwiderstand aller Lampen?

3. Zu einem Widerstand von 20 Ω wird ein Widerstand von 8 Ω parallel geschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

4. Eine 40-W-Glühlampe für 220 V hat einen Widerstand von etwa 1200 Ω. Welchen Gesamtwiderstand haben zwei, drei, vier und mehr parallelgeschaltete Lampen? Wie groß ist in jedem Einzelfall die Stromstärke?

5. Ein Strom von 2 A verzweigt sich und durchfließt zwei parallelgeschaltete Widerstände von 15 Ω und 35 Ω. Wie verteilt sich der Strom auf die beiden Widerstände? Wie groß ist die angelegte Spannung? Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

6. Lösen Sie die gleiche Aufgabe für die Aufteilung eines Stromes von 2 mA auf drei parallelgeschaltete Widerstände von 20 Ω, 30 Ω und 50 Ω! Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

7. Drei Widerstände sind unter Berücksichtigung des Meßfehlers bestimmt worden:

   $R_1 = (14{,}4 \pm 0{,}1)\ \Omega, \quad R_2 = (83{,}2 \pm 0{,}6)\ \Omega, \quad R_3 = (22{,}3 \pm 0{,}4)\ \Omega.$

   7.1. Berechnen Sie die Summe der in Reihe geschalteten Widerstände mit ihren durchschnittlichen, relativen und prozentualen Fehlern!

   7.2. Berechnen Sie den Strom, der durch diese Widerstände fließt, wenn sie an eine Spannung von (219 ± 2) V angeschlossen werden!

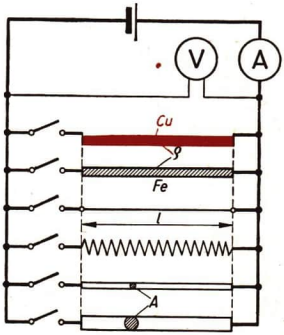
8. Ein Drehspulgerät mit einem inneren Widerstand von 50 Ω erreicht für 2 mA seinen Höchstausschlag. Welcher Widerstand muß dem Gerät parallelgeschaltet werden, wenn es als Strommesser für einen Meßbereich bis zu 5 A verwendet werden soll?

9. Zeichnen Sie den Schaltplan eines als Spannungsteiler verwendeten Schiebewiderstandes für ein elektrisches Wärmegerät! Ein Spannungsmesser ist vorzusehen.

1.5. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

1.5.1. Das Widerstandsgesetz

Die Abhängigkeit des *Widerstandes* von den Abmessungen und dem Werkstoff des Leiters kann mit der Schaltung nach Bild 33/1 nachgewiesen werden. Es ergibt sich nach den beiden Kirchhoffschen Gesetzen, daß der Widerstand eines Leiters um so größer ist, je geringer sein Querschnitt und je länger der Leiter ist. Weiterhin ist bekannt, daß der Widerstand direkt proportional dem spezifischen Widerstand des Leitermaterials ist.



33/1 Schaltung zum Vergleich von Widerständen aus verschiedenem Material, von verschiedener Länge und von verschiedenem Querschnitt

Das Widerstandsgesetz lautet:

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{spezifischer Widerstand} \cdot \text{Leiterlänge}}{\text{Leiterquerschnitt}} \qquad R = \frac{\varrho \cdot l}{A} \tag{7}$$

R	ϱ	l	A
Ω	$\frac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}$	m	mm^2

Oft rechnet man mit dem Kehrwert des spezifischen Widerstandes, dem *spezifischen Leitwert* $\varkappa$:

$$\varkappa = \frac{1}{\varrho} \quad \varrho = \frac{1}{\varkappa}.$$

Beispiel

Wie groß ist der Widerstand einer stählernen Stromschiene von 12 m Länge?

Gegeben:

Masse je Meter Schiene $33{,}4\,\frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Dichte von Stahl: $7{,}8\,\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$

$\varrho = 0{,}12\,\frac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}$

Gesucht:

Querschnitt A (in mm^2)

Widerstand R (in Ω)

Lösung:

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

$$\underline{\underline{R = 0{,}000336\,\Omega}}$$

Der Widerstand der Stromschiene beträgt 0,000336 Ω.

1.5.2. Widerstand und Temperatur

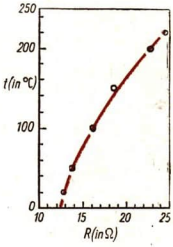
Ein elektrischer Strom erwärmt infolge der Zusammenstöße der sich bewegenden freien Elektronen mit den Metallionen den Leiter. Infolge der größeren Schwingungen der Metallionen bei höherer Temperatur vergrößert sich die Zahl der Zusammenstöße mit den freien Elektronen. Damit aber vergrößert sich der Widerstand des metallischen Leiters bei ansteigender Temperatur.

Bei Kohle und allen anderen *Halbleitern* (z. B. Germanium, Silizium) nimmt der Widerstand mit ansteigender Temperatur ab, weil infolge der Erwärmung aus den Atomen des Halbleiters zusätzlich Elektronen frei werden und den Elektronenstrom verstärken. Diese Erscheinung wirkt sich so aus, daß sich der Widerstand verringert, obwohl auch hier wie in jedem Leiter eine größere Behinderung der Elektronenbewegung eintritt.

Mit ansteigender Temperatur nimmt der Widerstand eines metallischen Leiters zu. Bei Halbleitern nimmt der Widerstand ab.

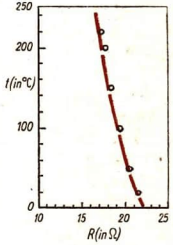
Eine Wendel aus dünnem Stahldraht wird ein wenig auseinandergezogen, so daß sich die Windungen nicht mehr gegenseitig berühren. Sie wird in ein Ölbad gehängt und an eine Niederspannung angeschlossen.
Spannung und Stromstärke werden gemessen. Das Ölbad wird auf 20 °C temperiert und dann langsam auf 220 °C erwärmt. Bei verschiedenen Temperaturen werden Spannung und Stromstärke abgelesen und der Widerstand R_t berechnet.

Temperatur t (in °C)	Spannung U (in V)	Stromstärke I (in A)	Widerstand R_t (in Ω)
20	1	0,078	12,8
50	1	0,073	13,7
100	1	0,0625	16,0
150	1	0,054	18,5
200	1	0,044	22,7
220	1	0,041	24,4



Das Diagramm zeigt, daß sich der Widerstand nahezu linear ändert. Mit höherer Temperatur werden die Abweichungen größer.
In ähnlicher Weise wie die Heizwendel kann man eine Bleistiftmine als Halbleiter im Ölbad untersuchen und kommt zu folgenden Werten:

Temperatur t (in °C)	Spannung U (in V)	Stromstärke I (in A)	Widerstand R_t (in Ω)
20	2,6	0,12	21,6
50	2,6	0,126	20,6
100	2,6	0,133	19,5
150	2,6	0,141	18,4
200	2,6	0,146	17,8
220	2,6	0,15	17,35



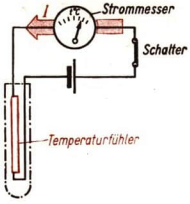
1.5.3. Technische Bedeutung der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes ist technisch bedeutungsvoll. In vielen Fällen macht sie sich störend bemerkbar.

Beispiel

Bei elektrischen Geräten ist zu beachten, daß die Einschaltstromstärke bei kaltem Widerstand erheblich größer ist als die Stromstärke im Betriebszustand. Gegebenenfalls muß der Schalter mit einem Widerstand gekoppelt werden, der mit zunehmender Erwärmung des Gerätes ausgeschaltet wird.

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes wird aber auch technisch ausgenutzt. Ein Beispiel dafür sind die Widerstandsthermometer. Der temperaturabhängige Widerstand wirkt auf den Stromfluß. Der Strommesser ist in Grad Celsius geeicht und gestattet damit direkt das Ablesen der Temperatur. In Steuerungs- und Regelanlagen können Widerstandsthermometer ebenfalls eingesetzt werden.



36/1 Schaltbild eines Widerstandsthermometers

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Zeichnen Sie das Schaltbild eines Stromkreises, bestehend aus einem Akkumulator, einer Glühlampe, einem Schalter und einer Sicherung! Ein Strommesser soll die Stromstärke und ein Spannungsmesser die Spannung an der Glühlampe messen.

2. Auf einem Kurbelwiderstand findet man die Angabe 25 Ω und 3,2 A. Welche Spannung darf man anlegen, ohne den Widerstand zu überlasten?

3. Die Spannung einer Spannungsquelle wird mit verschiedenen Meßgeräten gemessen. Es ergeben sich folgende Meßwerte (in V):
11,8; 12,1; 11,9; 12,0; 12,1.
Berechnen Sie den Mittelwert, den durchschnittlichen, relativen und prozentualen Fehler der Messung!

4. Lösen Sie die gleiche Aufgabe für eine Stromstärkemessung (in A) 1,34; 1,32; 1,33; 1,35; 1,32!

5. Welchen Widerstand hat eine Freileitung aus 2 Cu-Drähten mit einem Querschnitt von 12 mm² und einer Länge von 874 m?

6. In Versuchsreihen ist die Widerstandsänderung einer Metallfadenglühlampe und einer Kohlefadenglühlampe in Abhängigkeit von der Stromstärke zu vergleichen.

   6.1. Zeichnen Sie Schaltbilder für den Versuchsaufbau!

   6.2. Nehmen Sie Meßreihen auf, indem Sie die Spannung von 10 V an in Stufen von 10 V heraufsetzen!

   6.3 Zeichnen Sie Diagramme nach den Meßreihen, und erläutern Sie die Versuchsergebnisse!

7. Messen Sie an einem Eisendraht von etwa 1 m Länge fünfmal seine Länge mit dem Gliedermaßstab. Bestimmen Sie mit der Feinmeßschraube an fünf Stellen seinen Durchmesser.

   7.1. Berechnen Sie die Mittelwerte und die durchschnittlichen Fehler der Länge und des Durchmessers!

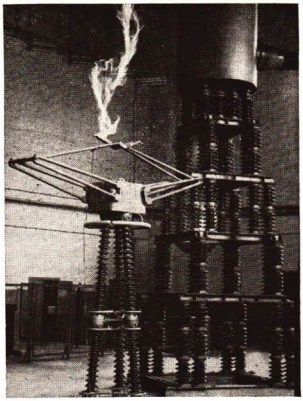
   7.2. Berechnen Sie den Mittelwert und den durchschnittlichen Fehler der Querschnittsfläche!

   7.3. Wie groß ist der Widerstand des Drahtes und der Fehler, wenn sein spezifischer Widerstand $\varrho = (0{,}13 \pm 0{,}04)\,\frac{\Omega\,\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$ ist?

8. Berechnen Sie den Widerstand eines Gerätes mit den Werten der Spannung und der Stromstärke aus den Aufgaben 3. und 4.!

9. In einem Erdkabel besteht ein Kurzschluß zwischen den beiden Leitern. Der Querschnitt des Kabels ist $A = (16 \pm 0{,}02)\ \mathrm{mm}^2$. Der Widerstand der beiden Leiter über die Kurzschlußstelle wird vom Kabelende her gemessen. Er beträgt $R = (2{,}34 \pm 0{,}03)\ \Omega$. Wo und in welcher Länge muß das Kabel aufgegraben und ersetzt werden? $\varrho_{Cu} = 0{,}155\,\frac{\Omega\,\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

2. Grundlagen der Elektrostatik



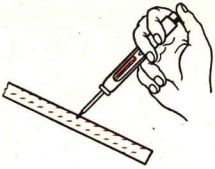
Die in einer Hochspannungsanlage aufgespeicherte elektrische Energie wird in einem Prüffeld zur Auslösung gebracht. Als Gegenpol der Anlage dient das Prüfstück, an dem untersucht wird, ob die Entladung den gewünschten Verlauf nimmt oder ob der elektrische Durchschlag an unerwünschten Stellen eintritt.
Solche Hochspannungsanlagen werden in den Forschungsinstituten zum Untersuchen elektrostatischer Erscheinungen benutzt.

2.1. Die elektrische Ladung

Nach dem heutigen Stand der Wissenschaft kann man sagen: Die Atome sind größtenteils aus elektrisch geladenen Bestandteilen zusammengesetzt, wobei die positiven und negativen Ladungsteile gleichmäßig verteilt sind.
Außer dem physikalischen Vorgang des Elektronenstromes gibt es Erscheinungen, bei denen die Elektronen nicht in Bewegung bleiben, sondern sich auf Körper sammeln und dort ruhende Ladungen bilden. Dieses Untersuchungsgebiet wird als **Elektrostatik** bezeichnet. Zwar sind die Grundlagen der Elektrostatik, mit denen wir uns hier beschäftigen, schon genau untersucht worden, aber die Forschung auf diesem Gebiet geht unter dem Einsatz modernster technischer Anlagen in Laboratorien und mit künstlichen Erdsatelliten weiter, wobei es die Kenntnis der physikalischen Gesetze ermöglicht, die Technik immer weiter zu entwickeln.

2.1.1. Die Ladungstrennung

Im allgemeinen trifft man im Sprachgebrauch noch immer an, daß von einer Erzeugung von Elektrizität gesprochen wird. Diese Art der Formulierung ist falsch, da sie den materiellen Charakter der Elektrizität verleugnet. In Wirklichkeit handelt es sich stets um eine Trennung negativer und positiver Ladungsträger voneinander. Als bekannt können wir voraussetzen, daß sich zwei leicht beweglich aufgehängte, ungleich geladene Stäbe anziehen. Die Ursache dafür ist in der erfolgten *Ladungstrennung* zu suchen.



38/1 Nachweis der Ladung eines PVC-Stabes mit einem Polprüfer
Reibt man einen PVC-Stab mit einem Wollappen und berührt ihn dann mit dem Polprüfer, so leuchtet die berührende Elektrode kurz auf. Der PVC-Stab war negativ aufgeladen, denn in einer Glimmlampe leuchtet die Elektrode auf, die am Minuspol liegt

Untersuchungen haben ergeben, daß die Ladungstrennung nicht auf das Reiben zurückzuführen ist, sondern allein auf die Berührung zweier verschiedener Stoffe. Durch das Reiben wird lediglich eine bessere Berührung hergestellt. Dabei treten Elektronen von dem einen Körper auf den anderen über. Trennt man die Stoffe schnell voneinander, so verbleiben auf dem einen überschüssige Elektronen. Er ist elektrisch negativ geladen. Auf dem anderen Körper ist ein Elektronenmangel entstanden. Er ist elektrisch positiv geladen.
Diese Vorgänge sind besonders gut an Isolierstoffen zu beobachten. Bei Metallen sind die Aufladungserscheinungen geringer und gleichen sich infolge der besseren Bewegungsmöglichkeit der Elektronen leicht wieder aus.

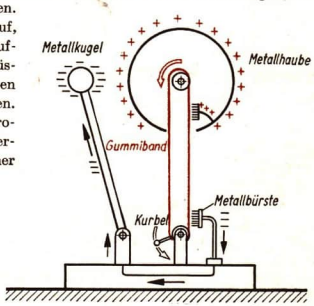
Durch das gegenseitige Berühren verschiedener Stoffe tritt eine Ladungstrennung ein.

Negative Ladung: **Elektronenüberschuß**
Positive Ladung: **Elektronenmangel**

Auf der Grundlage der Ladungstrennung durch Berühren können sich zwischen zwei Ladungen sehr hohe elektrische Spannungen ausbilden.

Beispiel

Bei der Herstellung von Geweben, Papier und Plastfolien entstehen durch die Berührung des schnellbewegten Materials mit den Maschinenteilen leicht hohe Aufladungen, die zu Störungen des Betriebes führen können.
In einer Webmaschine treten Webfehler auf, wenn sich die Fäden durch elektrische Aufladung abstoßen. An solchen Maschinen müssen besondere Vorkehrungen zum Ableiten der elektrischen Ladungen getroffen werden. Auch an Treibriemen entstehen elektrostatische Aufladungen, die zum Funkenüberschlag und damit zu einem Brand oder einer Staubexplosion führen können.



38/2 Wirkungsweise des Bandgenerators
(Das Bild zeigt einen Schulbandgenerator)

Im Bandgenerator wird diese Art der Ladungstrennung bewußt ausgenutzt, um hohe elektrische Spannungen zu erzeugen. Den ersten Bandgenerator konstruierte 1933 der niederländische Physiker VAN DE GRAAF.
Einem umlaufenden endlosen Band aus Gummi oder Plast werden fortlaufend über eine Metallbürste negative Ladungen entzogen, so daß sich das Band positiv auflädt. Es entzieht der Metallhaube Elektronen. Die Haube ist dann gegenüber der Metallkugel positiv geladen. Mit einem der größten Bandgeneratoren, der in Charkow steht, können Spannungen bis zu 4 Millionen Volt erzeugt werden.

2.1.2. Die Elektrizitätsmenge

Eine Spannung von mehreren Millionen Volt ist für unsere Vorstellungen sehr hoch. Man darf aber nicht vergessen, daß diese Spannung allein noch nicht dafür entscheidend ist, welche Wirksamkeit ein Strom haben kann. Außer der Spannung ist auch die Menge der Ladungsträger von Bedeutung, die beim Ausgleich als Elektronenstrom in Bewegung gesetzt wird. Die Zahl der Elektronen, die eine Ladung herbeiführt, ist aber verhältnismäßig gering, wenn man sie mit der Zahl der Elektronen vergleicht, die sich in einem Stromkreis bewegt. Beim Funkenüberschlag am Kamm oder an Dederonkleidung fließen so geringe Ströme, daß trotz der hohen Spannung die Gefahr einer Verletzung nicht besteht.
Die Gesamtzahl der Elektronen, die ein Körper aufgenommen oder abgegeben hat, entspricht der Ladung. Will man die Ladung Q bestimmen, so muß man die Stromstärke I messen, die bei der Auf- oder Entladung auftritt und sie mit der Zeit t multiplizieren, während der der Strom fließt.

Für kurze Zeitspannen verwendet man das Formelzeichen Δt. Der große griechische Buchstabe Δ (Delta) ist das Zeichen für eine Differenz. Hier handelt es sich um die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn und dem Ende eines Ladungsvorganges.

Die Ladung ist das Produkt aus Stromstärke und Zeitdauer des Stromflusses.

Ladung = Stromstärke · Zeit	$Q = I \cdot \Delta t$

(8)

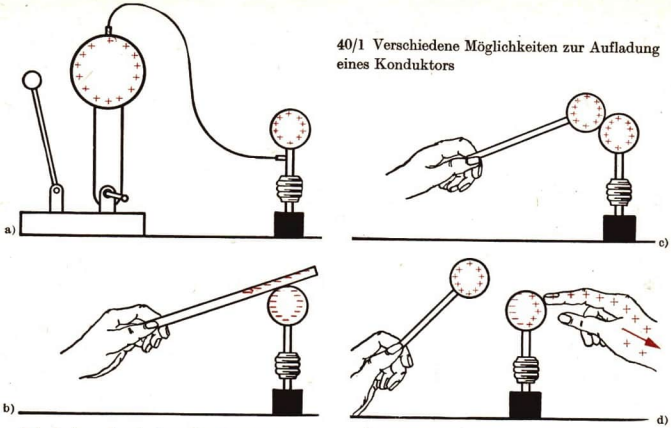
Q	I	t
As	A	s

Als Maßeinheit für die Ladung oder Elektrizitätsmenge ergibt sich die **Amperesekunde.** Zu Ehren des französischen Physikers CHARLES AUGUSTE DE COULOMB bezeichnet man eine Amperesekunde als ein **Coulomb** (Kurzzeichen C):

1 As = 1 C.

Durch zahlreiche Messungen nach verschiedenen Methoden ist es gelungen, die Ladungsgröße eines Elektrons, die elektrische **Elementarladung** e zu bestimmen:

$$e = \frac{1{,}602}{10^{19}} \text{ Coulomb.}$$



40/1 Verschiedene Möglichkeiten zur Aufladung eines Konduktors

a) Aufladung durch einen Bandgenerator
b) Aufladung durch einen PVC-Stab
c) Übertragung einer Ladung mit einem zweiten Konduktor
d) Aufladung durch Influenz

Daraus ergibt sich, daß die Ladungseinheit 1 C aus etwa $0{,}63 \cdot 10^{19}$ = 6300000000000000000 Elektronen besteht. Fließt in einem elektrischen Leiter eine Stromstärke von einem Ampere, so bedeutet das: In einer Sekunde passiert eine Ladung von einem Coulomb, also eine Zahl von $0{,}63 \cdot 10^{19}$ Elektronen, den Leiterquerschnitt.

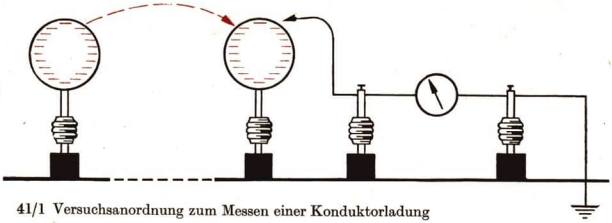
Wie kann man nun eine elektrische Ladung nachweisen?

Es ist möglich, gut isolierte Metallkörper von einer Gleichspannungsquelle oder einem geladenen Körper her aufzuladen. Derartige Metallkörper für Versuchszwecke bezeichnet man als **Konduktoren**. Das Entladen des Konduktors wird durch Ableiten der Ladung zur Erde erreicht, wobei während einer sehr kurzen Zeit ein Strom fließt, dessen Stromstärke jedoch nicht konstant ist. Man nennt einen solchen Vorgang einen **Stromstoß**.

Zum Messen von Stromstößen verwendet man **ballistische Strommesser**. Durch einen Stromstoß erreicht der Zeigerausschlag nicht den Maximalwert der Stromstärke, weil eine Schwingung des Zeigers längert dauert als der Stromstoß. Genaue Untersuchungen zeigen, daß die Zeigerausschläge bei einem Stromstoß der dem Meßgerät zugeleiteten Ladung proportional sind.

Infolge der kurzen Dauer der meisten Stromstöße reagiert jedes Drehspulmeßwerk als ballistischer Strommesser.

Beim Berühren eines ungeladenen Konduktors mit einem gleich großen geladenen Konduktor verteilt sich die Ladung gleichmäßig auf die beiden Konduktoren, so daß jeder die halbe Ladung aufweist.



41/1 Versuchsanordnung zum Messen einer Konduktorladung

Eine Konduktorkugel wird durch kurzzeitige Verbindung mit einem Bandgenerator aufgeladen. Von ihr überträgt man einen Teil der Ladung auf eine zweite, gleich große Konduktorkugel durch kurzzeitige Berührung. Diese Konduktorkugel bringt man zur Entladung über ein Spiegelgalvanometer an einem Erdanschluß. Der Stoßausschlag des Meßgerätes wird abgelesen. Man entnimmt der ersten Konduktorkugel erneut eine Ladung und stellt fest, daß die Ladung noch halb so groß ist.

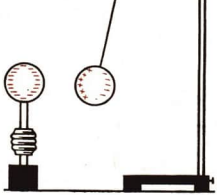
2.1.3. Influenz

Schon im Altertum war in Griechenland bekannt, daß geriebene Bernsteinstücke leichte Körper anziehen können. Aus dem griechischen Wort für Bernstein *Elektron* (*ελεκτρον*) sind die Bezeichnungen Elektrizität, elektrisch und Elektron abgeleitet. Aber erst, als im 18. und 19. Jahrhundert die Physik zu einer systematischen Wissenschaft entwickelt wurde, untersuchten die Naturforscher diese Vorgänge genauer und fanden eine Erklärung für sie.

Es ist uns bekannt, daß zwei geladene Körper aufeinander eine Kraft ausüben. Untersuchen wir nun, wie sich ein geladener und ein ungeladener Körper zueinander verhalten!

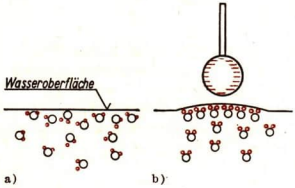
Nähert man einer ungeladenen, außenverspiegelten Glaskugel nach Bild 41/2 einen negativ geladenen Konduktor, dann wird sie zu ihm hingezogen. Die leicht beweglichen freien Elektronen werden auf die dem Konduktor abgewandte Seite der Kugel gedrückt. So liegt dem Konduktor gegenüber eine positive Ladung. Berührt man die dem Konduktor abgewandte Seite der Kugel mit einer Erdleitung oder auch nur mit der Hand, so werden Elektronen abgeleitet, und auf der Kugel bleibt eine positive Ladung zurück (Bild 40/1d).

Die Ladungstrennung auf einem Körper durch Einwirken einer anderen Ladung nennt man Influenz.

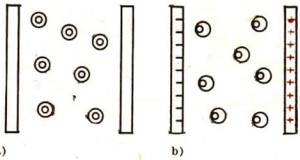


41/2 Influenzwirkung zwischen einem Konduktor und einer an einem Seidenfaden hängenden Kugel

Auch nichtleitende ungeladene Körper unterliegen der Einwirkung von elektrischen Ladungen. Derartige Vorgänge sind ähnlich wie Influenzerscheinungen zu erklären. In den Molekülen nichtleitender Körper kann eine unsymmetrische Ladungsverteilung auftreten. Die Moleküle sind polarisiert.
Es gibt Stoffe, bei denen die Moleküle von vornherein polarisiert sind. Sie haben eine **Orientierungspolarisation.** Als Beispiel ist das Wassermolekül gezeigt (Bild 42/1). Die Polarisation macht sich im allgemeinen aber infolge der ungeordneten Wärmebewegungen nicht bemerkbar. Bei Annäherung einer Ladung erfolgt jedoch eine Ausrichtung der Moleküle, so daß Anziehungskräfte auftreten.



42/1 Modell der Orientierungspolarisation der Wassermoleküle
a) die Moleküle liegen ungeordnet
b) Unter Einfluß eines Konduktors richten sich die Moleküle aus, so daß es zu einer Anziehung kommt

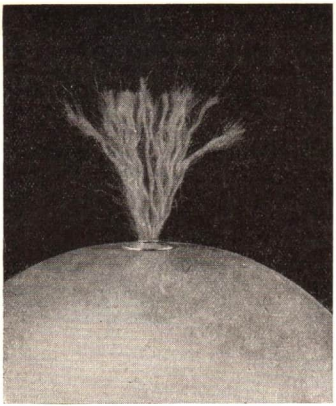


42/2 Modell der Verschiebungspolarisation
a) Die Atomkerne liegen im Mittelpunkt der Elektronenhülle
b) Durch den Einfluß eines elektrischen Feldes liegen die Atomkerne außerhalb des Mittelpunktes der Elektronenhülle

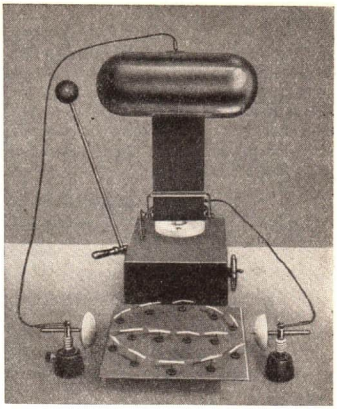
In allen Atomen tritt eine **Verschiebungspolarisation** ein, wenn ein äußeres elektrisches Feld auf sie einwirkt. Modellmäßig kann man sich vorstellen, daß die Elektronenhülle gegenüber dem Atomkern verschoben wird. Dadurch kommt es zwischen einem geladenen und einem ungeladenen Isolierkörper zu Anziehungskräften (Bild 42/2).

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Reiben Sie einen Kamm, ein Lineal oder einen Zeichenwinkel aus PVC!
   1.1. Halten Sie es über den Kopf eines Mitschülers und beobachten Sie die Bewegung der Haare!
   1.2. Nähern Sie das geladene PVC-Stück einem Häufchen sehr kleiner Papierschnitzel auf dem Tisch. Erklären Sie das Verhalten der Teilchen!
2. Halten Sie einen Bogen Papier gegen die Wand eines heißen Ofens und bürsten Sie mit einer Kleiderbürste etwa zehnmal darüber! Das trockene Papier wird stark negativ aufgeladen und klebt an der Ofenwand fest. Reißen Sie im verdunkelten Zimmer das Papier von der Ofenwand und beobachten Sie die Funkenüberschläge!
3. Mit welchen Hilfsmitteln kann man nachweisen, ob ein Körper elektrisch geladen ist, und welche Ladung er trägt?
4. Wie groß ist die in einer Stunde durch eine 40-W-Glühlampe fließende Ladung (Betriebsspannung 220 V)?



43/1 Unter Einfluß eines elektrischen Feldes spreizt sich ein Faserbüschel strahlenförmig



43/2 Nachweis des elektrischen Feldes in einer Ebene mit Papierfähnchen

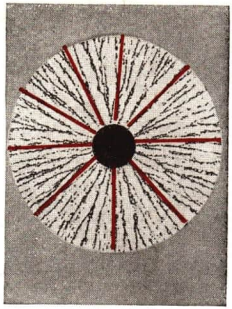
2.2. Das elektrische Feld

2.2.1 Die Feldlinien des elektrischen Feldes

Wir haben gesehen, daß elektrisch geladene Körper auf andere Körper ohne gegenseitige Berührung Kräfte ausüben.

Der Zustand eines Raumes, in dem sich elektrisch geladene Körper befinden und in dessen Bereich für jeden Ort Kraftwirkungen nachgewiesen werden können, heißt elektrisches Feld. Das elektrische Feld ist eine Form der Materie.

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, elektrische Felder nachzuweisen. Gipskristalle, Bärlappsporen oder Haarhäcksel auf einer Glasplatte oder Grießkörner in Öl ordnen sich unter Einfluß eines elektrischen Feldes in bestimmten Linien an. Derartige Feldlinienbilder wurden von dem englischen Physiker MICHAEL FARADAY beobachtet. Er schuf daraufhin eine Modellvorstellung vom elektrischen Feld.
Die Feldlinienbilder entstehen durch das Aneinanderreihen von kleinen Körpern infolge der Kraftwirkungen im elektrischen Feld. Sie geben an, in welcher Richtung die Kräfte im Feld in jedem Punkt wirksam sind. Das Feld ist aber nicht nur entlang der Linien wirksam, sondern es erfüllt den ganzen Raum. Auf welchen Feldlinien sich die Teilchen anordnen, hängt von der zufälligen Lage der Teilchen im Raum ab. Man muß also sagen, daß eine endliche Zahl von Feldlinien nicht ausreicht, um das gesamte



44/1 Radiales Feld einer elektrischen Ladung (Grieß in Öl)

Feld zu erfassen. Trotzdem hat es sich als zweckmäßig erwiesen, mit dem Feldlinienbild zu arbeiten, indem man nur einige Feldlinien zeichnet. Dabei ist zu beachten:

Durch einen Punkt läuft immer nur eine Feldlinie.
Feldlinien können sich nicht schneiden.
Die Feldlinien liegen in der Zeichnung dort dichter, wo das Feld stärker ist.

Man hat für die Feldliniendarstellung weiter festgelegt:

Die Richtung der elektrischen Feldlinien verläuft von der positiven zur negativen Ladung.

2.2.2. Der materielle Charakter des Feldes

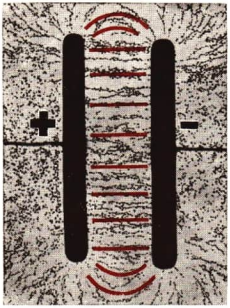
Die elektrischen Felder erfüllen kontinuierlich den ganzen Raum und üben Kraftwirkungen auf Körper aus. Sie sind Träger von Energie, haben eine unendliche Ausdehnung und können sich gegenseitig durchdringen. Durch eingehende Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß sie auch einer sehr kleinen Masse äquivalent sind. Alle diese Eigenschaften existieren ständig.
Damit sind auch die Felder eine *Form der Materie*, denn sie bestehen unabhängig von unserem Bewußtsein, sie sind physikalisch durch ihre Wirkungen nachweisbar und meßbar.

Elektrische Felder sind eine Zustandsform der Materie.

Diese Form der Materie unterscheidet sich allerdings erheblich von der bisher bekannten Form der stofflichen Materie. Die charakteristischen Besonderheiten der stofflichen Materie sind unter anderen die Teilbarkeit des Ganzen in seine Teile und die Beständigkeit begrenzter Teilchen.
Die Materie tritt in Form von Stoffen und in Form von Feldern auf.
Wenn wir uns die Naturgesetze nutzbar machen wollen, gilt es zu untersuchen, welche gemeinsamen und für die Technik und Wissenschaft nützlichen Eigenschaften die Formen der Materie, in unserem speziellen Falle das elektrische Feld, besitzen.

2.2.3. Formen des elektrischen Feldes

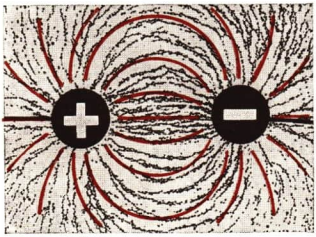
Zwischen zwei verschieden geladenen, parallelen Platten tritt ein Feld auf, das man als **homogenes elektrisches Feld** bezeichnet (Bild 45/1).



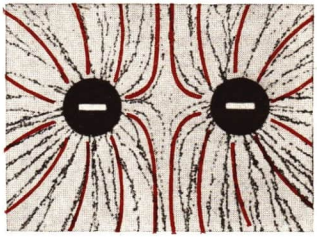
45/1 Elektrisches Feld zwischen zwei Platten

Im homogenen elektrischen Feld laufen die Feldlinien geradlinig parallel zueinander und haben überall die gleiche Dichte.

Das Feld an den Rändern der Platten ist *inhomogen*. Man nennt es auch Streufeld.
Weitere Feldlinienbilder zeigen den Feldlinienverlauf, der zu einer Anziehung oder Abstoßung geladener Körper führt. Man muß sich vorstellen, daß in Richtung der Feldlinien Zugkräfte und quer zu ihnen Druckkräfte auftreten (Bilder 45/2 und 45/3).



45/2 Feldlinienverlauf zwischen ungleichartig geladenen Körpern. Zugkräfte in Richtung der Feldlinien führen zu einer Anziehung



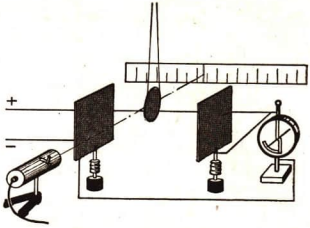
45/3 Feldlinienverlauf zwischen gleichartig geladenen Körpern. Druckkräfte senkrecht zu den Feldlinien führen zur Abstoßung

2.3. Die elektrische Feldstärke

2.3.1. Die elektrische Feldkraft

Man kann sich nicht mit der Feststellung begnügen, daß in einem elektrischen Feld auf Körper Kräfte ausgeübt werden. Es ist ein Grundprinzip der physikalischen Arbeitsmethode, die Größen zahlenmäßig in ihrer mathematischen Abhängigkeit voneinander zu erfassen. Dazu müssen hier die Beziehungen zwischen der *Kraft*, der *Ladung* und den *Bestimmungsgrößen des elektrischen Feldes* experimentell untersucht werden. In grober Annäherung kann man die Verhältnisse aus den folgenden einfachen Versuchen erkennen.

Zwischen zwei Platten wird ein homogenes elektrisches Feld aufgebaut. Die als Pendel aufgehängte Metallscheibe wird negativ geladen. Durch die Kraftwirkung des elektrischen Feldes auf die Ladung der Scheibe wird sie zur positiven Platte hin abgelenkt. Die Pendelausschläge der Scheibe sind der ablenkenden Kraft proportional. Man kann so den Betrag der Ablenkung der Scheibe als Maß für die Größe der ablenkenden Kraft betrachten. Es werden drei Versuchsreihen durchgeführt:



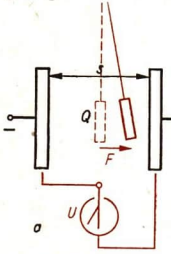
46/1 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Feldkräfte

Versuchsreihe 1 — Feldkraft und Feldspannung (Bild 46/2).

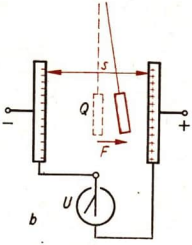
Der Plattenabstand s und die Ladung Q auf der Scheibe bleiben gleich. Die Feldspannung U wird verändert. Bei halber Spannung geht die Ablenkung auf die Hälfte und bei einem Drittel der Spannung auf ein Drittel zurück.

Die ablenkende Feldkraft ist der Feldspannung proportional.

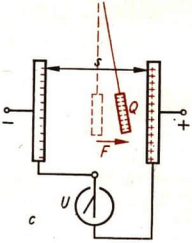
$$F \sim U$$



46/2 Die Feldkraft ist von der Feldspannung abhängig



46/3 Die Feldkraft ist vom Plattenabstand abhängig



46/4 Die Feldkraft ist von der Ladung des Probekörpers abhängig

Versuchsreihe 2 — Feldkraft und Plattenabstand (Bild 46/3).

Die Feldspannung U und die Ladung Q werden konstant gehalten. Der Plattenabstand s wird auf die Hälfte, auf ein Drittel und auf ein Viertel verringert. Die Ablenkung wird dabei doppelt, drei- und viermal so groß.

Die ablenkende Feldkraft ist dem Plattenabstand umgekehrt proportional.

$$F \sim \frac{1}{s}$$

Versuchsreihe 3 — Feldkraft und Ladung (Bild 46/4).

Die Feldspannung U und der Plattenabstand s werden konstant gehalten.

Man verändert durch verschiedene Spannungen der Aufladungsspannungsquelle die Ladung Q auf dem Probekörper.
Es zeigt sich:

Die ablenkende Kraft ist der Ladung des Probekörpers proportional.

$$F \sim Q$$

Die Teilergebnisse lassen sich zusammenfassen:

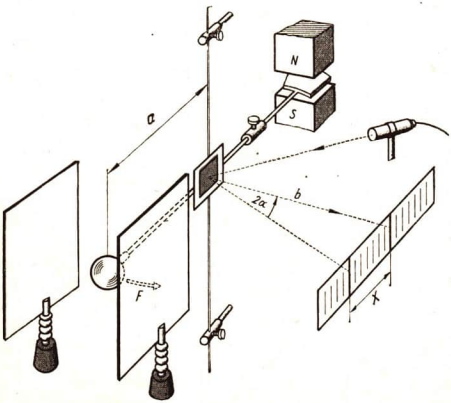
$$F \sim \frac{U}{s} \cdot Q.$$

Zu einer genauen Messung der Kräfte muß man eine Drehwaage einsetzen, deren Wirkungsweise aus dem Bild 47/1 zu ersehen ist. Die Scheibe am Dreharm zwischen den beiden Magnetpolen dient zum Abbremsen der Schwingungen.
Für das Messen der Spannung benötigt man ein geeichtes Meßgerät, und die Ladungen des Probekörpers müssen mit einem geeichten Spiegelgalvanometer bestimmt werden. Außerdem muß man in einem trockenen, staubfreien Raum arbeiten, da sonst sehr schnell Elektronen an die Umgebung abgegeben werden. Dabei wird die quantitative Abhängigkeit der Größen gefunden:

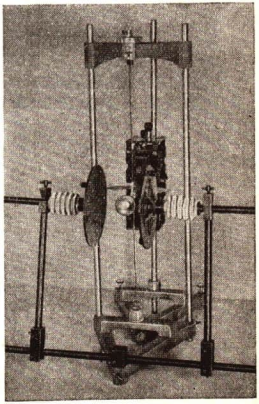
$$\boxed{F = 0{,}102\,\frac{U}{s} \cdot Q} \qquad (9)$$

F	U	d	Q
kp	V	m	As

47/1 Prinzip der Drehwaage zum Messen der Feldkräfte



47/2 Technische Ausführung einer Drehwaage aus Aufbauteilen



Wählt man für die Feldkraft als Maßeinheit das Newton (N), die im Teil Mechanik definiert wird,

$$1\ \text{N} = 0{,}102\ \text{kp}$$
$$9{,}81\ \text{N} = 1\ \text{kp}$$

dann vereinfacht sich die Gleichung:

$$\boxed{\text{Feldkraft} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Plattenabstand}} \cdot \text{Ladung} \quad \Big| \quad F = \frac{U}{s} \cdot Q} \tag{10}$$

2.3.2. Definition der elektrischen Feldstärke

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, daß die Feldkraft im elektrischen Feld einerseits von der Größe der Ladung abhängig ist, die man von außen in das Feld bringt. Andererseits hängt sie auch von zwei Bestimmungsstücken des Feldes ab, von dem Quotienten aus Spannung und Plattenabstand. Der Plattenabstand ist gleich der Feldlinienlänge. Den Quotienten dieser beiden Größen bezeichnet man als die **elektrische Feldstärke** E des homogenen elektrischen Feldes.

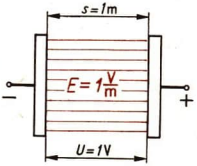
Die elektrische Feldstärke zwischen zwei Platten ist der Quotient aus Spannung und Feldlinienlänge.

$$\boxed{\text{Elektrische Feldstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Feldlinienlänge}} \quad \Big| \quad E = \frac{U}{s}} \tag{11}$$

E	U	s
V/m	V	m

Die *Maßeinheit der elektrischen Feldstärke* ist gesetzlich festgelegt:

> Das Volt/Meter ist die elektrische Feldstärke eines homogenen elektrischen Feldes, in dem der Spannungsabfall je 1 m Feldlinie 1 V beträgt.



48/1 Veranschaulichung der Feldstärkeneinheit

Mit Hilfe der Feldstärke läßt sich die Feldkraft allgemein für homogene und inhomogene Felder ausdrücken:

$$\boxed{F = E \cdot Q} \tag{12}$$

Beispiel

Zwischen zwei parallelen Platten im Abstand von 0,35 m besteht eine Spannung von 380 V. Wie groß ist die elektrische Feldstärke im homogenen Teil des Feldes?

Gegeben:
Spannung $U = 380\ \text{V}$
Plattenabstand $s = 0{,}35\ \text{m}$

Gesucht:
elektrische Feldstärke $E\left(\text{in } \frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$

Lösung:

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

$$E = \frac{380\,\text{V}}{0{,}35\,\text{m}}$$

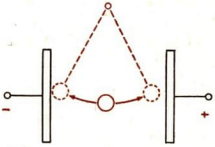
$$\underline{\underline{E = 1086\,\frac{\text{V}}{\text{m}}}}$$

Die elektrische Feldstärke beträgt 1086 $\frac{\text{V}}{\text{m}}$.

2.3.3. Die Arbeit im elektrischen Feld

Durch die Kräfte im elektrischen Feld können geladene Körper genauso bewegt werden wie beim Einwirken einer mechanischen Kraft.

Zwischen zwei Platten, die an eine Hochspannungsquelle angeschlossen sind, wird eine mit Aluminiumfolie umhüllte Holundermarkkugel gehängt. Man stößt die Kugel leicht gegen die eine Platte, so daß sie eine Ladung aufnimmt. Dadurch bewegt sie sich zu der anderen Platte, gibt hier ihre Ladung ab und nimmt eine entgegengesetzte Ladung auf. So pendelt der Körper ständig zwischen den beiden Platten hin und her.



49/1
Bewegung eines Pendels im elektrischen Feld

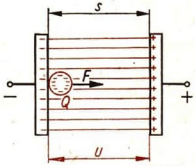
Bei der Bewegung eines geladenen Körpers im elektrischen Feld wird Arbeit verrichtet. Diese Arbeit kann berechnet werden. Der Körper legt unter Einwirkung der Feldkraft F den Weg des Plattenabstandes s zurück. Die mechanische Arbeit ist:

Arbeit = Feldkraft · Plattenabstand	$W = F \cdot s$

(13.1)

Diese Arbeit dient zum Vergrößern der Geschwindigkeit des Körpers. Die Feldkraft ist durch die Feldstärke und die Ladung auszudrücken:

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



49/2 Eine Ladung bewegt sich im elektrischen Feld

So ist die Arbeit:

Arbeit = Feldspannung · Ladung	$W = U \cdot Q$

(13.2)

Die Ladung Q ist gleich dem Stromstoß $I \cdot \Delta t$, den der Pendelkörper aufgenommen hat:

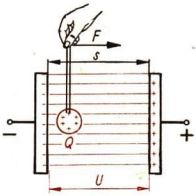
$$W = U \cdot I \cdot \Delta t.$$

Das Produkt aus Spannung, Stromstärke und Zeit wird als **elektrische Arbeit** bezeichnet.

Einer mechanischen Arbeit entspricht immer eine bestimmte elektrische Arbeit.

Die Umkehr dieses Vorganges, die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie, läßt sich auch aus der Bewegung von Ladungen im elektrischen Feld herleiten.

Man bewegt einen Konduktor, der eine positive Ladung trägt, entgegen der Kraftwirkung in einem elektrischen Feld von der negativen zur positiven Platte. Dabei muß entlang des Weges s die Kraft F aufgewendet, also eine mechanische Arbeit verrichtet werden, um die Ladung der positiven Platten zu vergrößern. Die Kraft ist dabei allerdings sehr klein.



50/1 Eine Ladung wird im elektrischen Feld bewegt

Es ist wieder:

$$W = F \cdot s = \frac{U}{s} \cdot Q \cdot s = U \cdot Q = U \cdot I \cdot \Delta t.$$

Bei der Bewegung von Ladungen entgegen der Feldkraft wird mechanische Arbeit in elektrische Energie umgewandelt.

Unsere Überlegungen zeigen uns:

Elektrische und mechanische Energie sind ineinander umwandelbar. Die Größe der Energie bleibt bei diesen Umwandlungen erhalten.

Durch diesen Satz wird ein Teil des umfassenden Satzes von der Erhaltung der Energie zum Ausdruck gebracht.
Aus dem früheren Physikunterricht ist schon bekannt, daß dieser Satz für die Umwandlungen

mechanische Energie ⟷ Wärmeenergie und
elektrische Energie ⟷ Wärmeenergie gilt.

Im weiteren Verlauf des Physikunterrichtes wird seine umfassende Gültigkeit für alle Energieumwandlungen nachgewiesen.

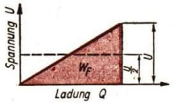
2.3.4. Die Energie des elektrischen Feldes

Trennt man Ladungen, dann müssen diese entgegen der Feldkraft bewegt werden. Berührt man einen PVC-Stab mit einem Wollappen und trennt sie anschließend voneinander, so müssen die Anziehungskräfte entgegengesetzter Ladungen überwunden werden. Zwischen den beiden Körpern entsteht ein elektrisches Feld. Dieses Feld ist Träger der elektrischen Energie, die aus der mechanischen Arbeit entstanden ist.
Die elektrische Energie kann bei einer Entladung der Körper wieder in andere Energiearten überführt werden. Eine teilweise Umwandlung in Lichtenergie tritt ein, wenn man den PVC-Stab mit einer Glimmlampe berührt. Mechanische Energie läßt

sich zurückgewinnen, wenn man die geladenen Körper aufeinander einwirken läßt, so daß eine Bewegung eintritt.

Man kann den Energieinhalt eines elektrischen Feldes berechnen, wenn man sich vorstellt, daß eine Ladungstrennung in sehr kleinen einzelnen Portionen erfolgt. Zu Beginn der Ladungstrennung ist die Spannung und damit die Feldstärke und die Feldkraft gleich Null. Am Ende der Ladungstrennung erreichen Spannung, Feldstärke und Feldkraft ihren Maximalwert. Im Mittel besteht während der Ladungstrennung die halbe Spannung, die halbe Feldstärke und die halbe Feldkraft gegenüber den Maximalwerten. Die gesamte Feldenergie W_F ist also:

$$\boxed{\textbf{Feldenergie} = \frac{\textbf{Spannung}}{2} \cdot \textbf{Ladung}} \quad \boxed{W_F = \frac{U}{2} \cdot Q} \tag{14}$$



51/1 Grafische Darstellung der Energie eines elektrischen Feldes. Die Dreieckfläche stellt die Feldenergie bei wachsender Spannung dar. Sie ist gleich der Rechteckfläche, die mit der halben Maximalspannung gebildet wird

Wir haben die elektrische Spannung bisher als eine Grundgröße der Elektrizität betrachtet, durch die man die Ursache für den elektrischen Strom erfaßt. Aus den Vorgängen im elektrischen Feld erkennen wir, daß die Spannung keine ursprüngliche Größe ist. Sie tritt als Folge der Arbeit auf, die beim Aufbau des elektrischen Feldes bei der Trennung der Ladungen verrichtet wird. Aus Gleichung 13.2 ergibt sich:

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

Wir erfahren auf S. 66, wie die Maßeinheit der Spannung aus diesem Zusammenhang heraus definiert wird.

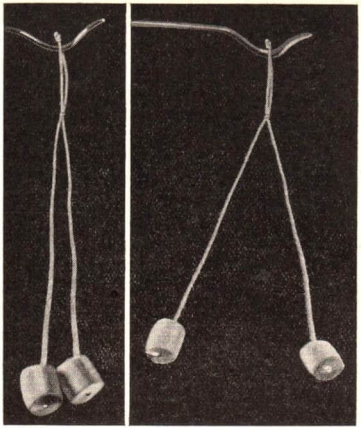
Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Von welchen Größen ist die Kraft abhängig, die auf eine Ladung im elektrischen Feld wirkt?
2. Wie ist die elektrische Feldstärke definiert?
3. Zwei Platten im Abstand von 0,25 m werden von verschiedenen Spannungsquellen aufgeladen.
   3.1 Berechnen Sie die Feldstärke des homogenen Teils des elektrischen Feldes! (Taschenlampenbatterie 4,5 V, Netzspannung 220 V, Stromversorgungsgerät 600 V, Bandgenerator 400 000 V.)
   3.2. Wie verändern sich die Feldstärken, wenn man den Plattenabstand bei angeschalteter Spannungsquelle verändert auf 0,15 m; 0,4 m; 1,2 m?
4. Entwickeln Sie eine Gleichung, die es ermöglicht, die Feldstärke zu berechnen! Gegeben sind die auf einen geladenen Körper wirkende Kraft und dessen Ladung.
5. Auf einen Probekörper wirkt eine Kraft $F = 2{,}67$ mp. Seine Ladung beträgt $Q = 3 \cdot \frac{1}{10^{10}}$ C. Wie groß ist die Feldstärke?

2.4. Elektrische Felder in Technik und Natur

2.4.1. Elektroskope — Elektrometer

Auf Grund der Kraftwirkung im elektrischen Feld kann man Ladungen nachweisen und Spannungen messen.
Ein **elektrisches Doppelpendel** besteht aus zwei an Seidenfäden aufgehängten Holundermarkkügelchen. Je größer die Ladungen sind, um so weiter entfernen sich die Kugeln voneinander. Nach dem gleichen Prinzip arbeiten Papierblatt- und Goldblattelektroskope.
Im **Braunschen Elektrometer** (Bild 10/2) wird ein Zeiger von einem mit der Konduktorkugel leitend verbundenen Metallteil abgestoßen. Die Größe des Ausschlags ist auf einer Skale ablesbar. Die Skale kann in kV eingeteilt sein.

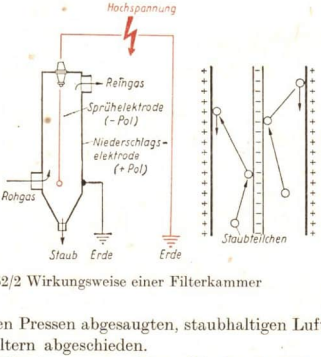


a b

52/1 Elektrisches Doppelpendel aus Holundermarkstückchen a) ungeladen b) geladen

2.4.2. Die elektrostatische Gasreinigung

Durch die Schornsteine der Kraftwerke werden mit den Verbrennungsgasen ständig große Mengen an Asche und Staub in die Luft mitgerissen. Um die Menschen und die Natur vor diesem Staub zu schützen, müssen die Abgase entstaubt werden. Dazu nutzt man die Kraftwirkung in elektrischen Feldern aus.
Aus den Abgasen der Erzröstanlagen wird der wertvolle Erzstaub bis zu 98 % zurückgewonnen.



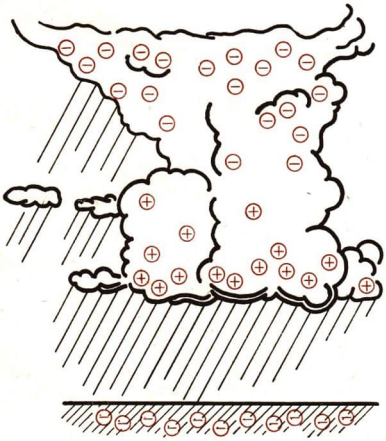
52/2 Wirkungsweise einer Filterkammer

In den Brikettfabriken wird aus der an den Pressen abgesaugten, staubhaltigen Luft der Kohlenstaub ebenfalls mit Elektrofiltern abgeschieden.
Die verunreinigten Gase werden durch Filterkammern geleitet. Die Staubteilchen übernehmen von den ausgespannten Drähten negative Ladungen und wandern an die positiv geladenen Wände. Von diesen fallen sie in Staubbunker.
Zum Entstauben größerer Gasmengen werden mehrere Kammern in einem **Elektro-**

Filter-Schlot zusammengefaßt. Filterschlote werden in Kraftwerken, Brikettfabriken, Zementwerken und anderen chemischen Werken eingesetzt.
Noch sind bei weitem nicht alle Schornsteine von Industriebetrieben mit Elektrofiltern ausgerüstet, aber für viele Betriebe sind derartige Anlagen schon gebaut.

2.4.3. Das Gewitter — Blitzschutzanlagen

Durch das Wettergeschehen werden ständig große Luftmassen bewegt. Die Luft steigt dabei oft außerordentlich unstetig und mit großer Geschwindigkeit bis zu einigen tausend Metern empor. Mit abnehmendem Luftdruck tritt eine Abkühlung ein, und die Feuchtigkeit der Luft kondensiert in Wassertröpfchen. Es bilden sich hochaufragende Haufenwolken. In der starken Luftströmung werden die Wassertröpfchen auseinandergerissen. Dabei tritt eine Ladungstrennung ein. Die leichteren Tröpfchen werden schneller emporgetragen als die schwereren. Sie sind negativ geladen, während die schweren, positiv geladenen Tropfen in den tieferen Wolkenschichten zurückbleiben. So entstehen weiträumige elektrische Felder mit großen Feldstärken. Sie bestehen zwischen den positiv und negativ geladenen Wolkenteilchen und auch zwischen den positiven Wolken und der Erdoberfläche, die gegenüber der Atmosphäre immer eine negative Ladung hat. Die Feldstärken können in diesen Feldern so groß werden, daß in Blitzen kilometerlange Funkenüberschläge erfolgen.
Auf Grund der Ladungsverteilung schlagen Blitze von einem Wolkenteil in den anderen über. Viele Blitze schlagen aber auch zwischen den positiv geladenen Wolkenteilen und der Erde über. In den elektrischen Feldern bestehen Spannungen bis zu 100 Millionen Volt. Bei der Entladung werden eine Spannung von etwa 100000 V und eine Stromstärke bis zu 100000 A während der Dauer von ungefähr $3 \cdot 10^{-11}$ Stunden wirksam. Aus diesen Werten ergibt sich ein Ladungstransport von etwa 0,01 C und eine Energie von ungefähr 0,00015 kWh.
Die Blitze zwischen der Erde und den Wolken gefährden Menschen und Gebäude. In der Nähe eines Blitzeinschlages können Menschen getötet oder gelähmt werden. Gebäude können in Brand geraten oder beschädigt werden. Besonders gefährdet sind ein-



53/1 Die Ladung von Gewitterwolken

zelnstehende Bäume und hohe Gebäude, da sich an ihren Spitzen besonders hohe Feldstärken ausbilden.

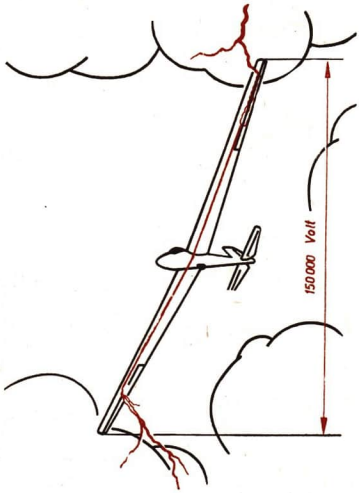
In früheren Zeiten sahen die Menschen im Gewitter das Wirken übernatürlicher Kräfte ihrer Götter, deren Zorn sie fürchteten. Viele abergläubische Auffassungen haben sich noch bis in unsere Zeit erhalten, obwohl die elektrischen Vorgänge des Gewitters schon seit 200 Jahren erforscht und bekannt sind. Die Gewitterregeln gründen meist auf völlig falschen Anschauungen. Die Bäume haben durch unterschiedliche Rindenbeschaffenheit, Feuchtigkeitsgehalt und Verbindung mit dem Grundwasserspiegel ganz verschiedene elektrische Leitfähigkeit. Aber unabhängig davon schlagen die Blitze besonders leicht in alleinstehende Bäume wie auch in hohe Gebäude ein. An Spitzen bilden sich immer größere Feldstärken aus, durch die der Funkenüberschlag dorthin geleitet wird. Diese Tatsache kann man für den Blitzschutz ausnutzen. Man kann es deshalb nicht empfehlen, irgendeinen Baum als Schutz vor Blitzeinschlag aufzusuchen.

Hohe Gebäude werden durch Blitzschutzanlagen geschützt. Diese Anlagen ermöglichen bei Blitzschlag die Ableitung der dem Gebäude zugeführten Ladung zur Erde. Deshalb werden die Leitungen mit großem Querschnitt versehen und bis zum Grundwasserspiegel geführt.

Für Flugzeuge ist die Gefahr beim Auftreten einer elektrischen Entladung nicht sehr groß. Beim Durchfliegen von Gewitterwolken nimmt der metallene Flugzeugkörper den Ladungszustand seiner Umgebung an. Infolge der hohen Fluggeschwindigkeit wird durch die Berührung mit ionisierten Luftteilchen die Ladung innerhalb kurzer Zeit wieder abgeführt, so daß vom Flugzeug bei der Landung nur eine geringe Ladung über Metallbürsten an die Erde abgegeben wird.

Trotzdem ist es schon vorgekommen, daß Flugzeuge beim Durchfliegen unterschiedlicher Ladungsgebiete in Gewittern durch Blitzeinschlag, aber nur an der Außenhaut, beschädigt wurden.

Leistungssegelflugzeuge, die beim Wolkenblindflug mit Sicherheit in schneller Folge unterschiedliche Ladungsgebiete durchfliegen, müssen für den Ladungsausgleich innerhalb des Steuergestänges besondere Lei-



54/1 Segelflugzeug in Gewitterwolken

55/1 Benjamin Franklin

tungen besitzen. Die Leitungen überbrücken die Kugellager der Steuergelenke innerhalb des nichtmetallenen Segelflugzeuges, damit diese beim Ladungsübergang nicht „verschmoren" und dadurch die Steuerung ausfallen kann. Die aufgenommene Ladung wird über Bürsten vom Flugzeug an die Luft abgegeben.

Die Erkenntnis, daß das Gewitter eine elektrische Erscheinung ist, wurde 1752 von dem Amerikaner Benjamin Franklin gewonnen. Franklin hat nicht nur als Wissenschaftler Bedeutung. Er gehörte zu den Kräften in Amerika, die den Kampf um die Befreiung von der englischen Kolonialherrschaft führten. Er war als Politiker an der Unabhängigkeitserklärung und der Ausarbeitung der Verfassung der USA 1776 und 1789 beteiligt.

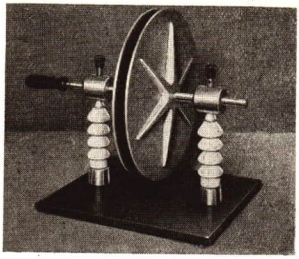
Zur Entdeckung der atmosphärischen elektrischen Ladung benutzte Franklin einen Drachen, den er hoch aufsteigen ließ. Er beobachtete dann, wie sich an dem Bindfaden die einzelnen Fasern abspreizten, als ob eine Elektrisiermaschine angeschlossen wäre. Als der Faden durch Regen naß wurde, konnte er Funkenüberschläge zur Erde beobachten. Von dieser Erkenntnis ausgehend, baute sich Franklin eine Anlage, mit der er sich Elektrizität in sein Laboratorium hereinholte. Man kann sie als den ersten Blitzableiter auffassen. Am Schornstein brachte er eine Auffangstange an und verlegte einen Draht durch ein Glasrohr durch das Haus. Das Ende schloß er zur Erdung an eine stählerne Pumpe an. An einer Stelle war der Draht unterbrochen. Zwischen zwei Klingelglocken hing hier ein Kupferkügelchen. Es pendelte unter dem Einfluß der elektrischen Feldstärke hin und her. An dieser Stelle konnte Franklin für andere Versuche elektrische Ladungen entnehmen. Bei einem Blitzeinschlag bildete sich hier ein Lichtbogen, und die Ladungen wurden zur Erde abgeleitet.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Fertigen Sie sich nach Bild 52/1 ein elektrisches Doppelpendel an! Untersuchen Sie damit die elektrische Ladung von verschiedenen Plasten, von Glas und Hartgummi, nachdem Sie diese Stoffe mit verschiedenem Reibzeug (Wolle, Seide, Dederon) gerieben haben!
2. Erläutern Sie die Wirkungsweise eines Elektrometers!
   Warum zeigt ein Elektrometer schon einen Ausschlag, wenn man ihm einen elektrisch geladenen Körper nähert?
3. Wie arbeitet ein Elektrofilterschlot, und welche wirtschaftliche Bedeutung hat er?
4. Wodurch bilden sich die hohen Spannungen zwischen Gewitterwolken aus?
5. Wie soll man sich bei Gewitter verhalten?
6. Wie weit ist ein Blitz entfernt, wenn man den Donner 14 s nach dem Blitzüberschlag hört?
7. Warum muß das Steuergestänge in Leistungssegelflugzeugen eine einwandfreie Leitfähigkeit gewährleisten?

2.5. Der Kondensator

In jedem elektrischen Feld ist Energie vorhanden. Schon früh in der Geschichte der Elektrotechnik hat man Möglichkeiten gefunden, elektrische Energie vorübergehend in geladenen Körpern zu speichern. Dazu diente die **Leidener Flasche**. Ein zylindrisches Glasgefäß ist von innen und außen mit einem Stanniolbelag versehen. Der eine Belag kann positiv und der andere negativ aufgeladen werden.

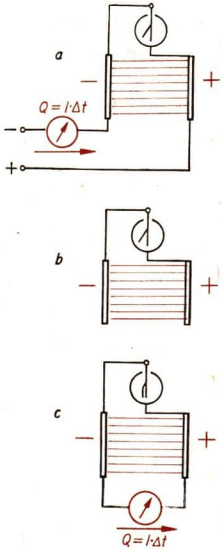


56/1 Plattenkondensator und Schaltzeichen für Kondensatoren

2.5.1. Ladung und Entladung von Kondensatoren

Bevor die heute üblichen Kondensatoren betrachtet werden, müssen wir uns mit den Gesetzmäßigkeiten der Kondensatoren näher vertraut machen.
Bei der Untersuchung des homogenen elektrischen Feldes werden zwei parallele, isoliert aufgestellte Platten verwendet. Diese Anordnung bezeichnet man als **Plattenkondensator**.

Ein Plattenkondensator wird an eine Gleichspannungsquelle über ein Spiegelgalvanometer angeschlossen. Er nimmt mit einem Stromstoß eine Ladung auf. Die eine Platte erhält einen Elektronenüberschuß. Auf der anderen Platte entsteht ein Elektronenmangel. Zwischen den beiden Platten besteht ein elektrisches Feld. Löst man die beiden Verbindungen zur Spannungsquelle, so bleibt das Feld als *selbständiges elektrisches Feld* bestehen. Ein Elektroskop zeigt dies an.



56/2
a) Aufladung eines Plattenkondensators
b) Selbständiges elektrisches Feld am geladenen Plattenkondensator
c) Entladung eines Plattenkondensators

Durch eine Verbindungsleitung, in der ein Spiegelgalvanometer liegt, werden die beiden Platten kurzgeschlossen. Das Spiegelgalvanometer zeigt den Entladungsstromstoß an, durch den das elektrische Feld abgebaut wird.

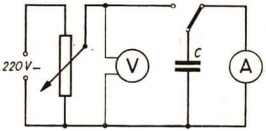
Ein Kondensator kann in einem selbständigen elektrischen Feld elektrische Energie speichern.

2.5.2. Die Kapazität des Kondensators

Wie überall in der Physik sind die gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Größen, also die funktionalen Zusammenhänge, festzustellen. Es gilt hier zu untersuchen, welche Beziehungen zwischen der Spannung und der Ladung am Kondensator bestehen.

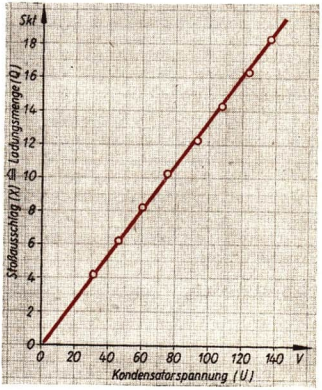
In einer Versuchsanordnung nach Bild 57/1 wird durch Betätigung einer Morsetaste ein Kondensator abwechselnd auf- und entladen. Am Spannungsmesser ist die jeweilige Ladespannung U abzulesen. Mit einem ballistischen Strommesser sind die bei der Auf- und Entladung auftretenden Stromstöße mit der Ladung Q zu messen. Eine Versuchsreihe ergibt, daß die Ladung der Spannung proportional ist:

$$Q \sim U.$$



57/1 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Ladung und Spannung am Kondensator

Stets stellt man die gleiche Gesetzmäßigkeit fest. Der Wert des Verhältnisses von Ladung und Spannung, der Quotient $\frac{Q}{U}$, hat für jeden Kondensator einen konstanten Wert. Man nennt diese Konstante die **Kapazität** eines Kondensators.



57/2 Grafische Darstellung der Abhängigkeit der Ladung von der Spannung. Auf der Ordinatenachse sind die Skalenteile der Stoßausschläge eines Strommessers abgetragen, die der Ladung proportional sind

Die Kapazität C eines Kondensators ist der Quotient aus Ladung und Spannung.

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Spannung}} \qquad C = \frac{Q}{U} \tag{15.1}$$

C	Q	U
F	As	V

Die *Maßeinheit der Kapazität* ist gesetzlich festgelegt. Sie heißt nach dem englischen Physiker MICHAEL FARADAY das **Farad**.

Das Farad ist die Kapazität eines Kondensators, der bei einer Spannung von 1 V die Elektrizitätsmenge 1 C aufnimmt.

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

Diese Einheit ist außerordentlich groß. Technische Kondensatoren haben erheblich kleinere Kapazitäten. Darum sind die kleineren Einheiten gebräuchlich:

1 Mikrofarad $\quad 1\,\mu\text{F} = \frac{1}{10^6}\,\text{F}$

1 Nanofarad $\quad 1\,\text{nF} = \frac{1}{10^9}\,\text{F}$

1 Picofarad $\quad 1\,\text{pF} = \frac{1}{10^{12}}\,\text{F}.$

Technische Kondensatoren haben Kapazitäten von wenigen Picofarad bis zu einigen hundert Mikrofarad.

2.5.3. Kapazität und Abmessungen des Kondensators

Die Kapazität der Kondensatoren ist von ihren Abmessungen abhängig. Diese Abhängigkeit soll experimentell bestimmt werden.

Versuchsreihe 1 – Kapazität und Plattengröße.

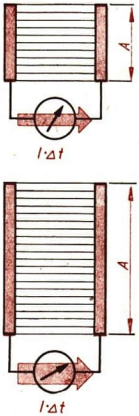
Man verwendet Kondensatoren, deren Flächen sich wie 1 : 2 : 3 : 4 verhalten. Bei gleichem Plattenabstand werden sie unter gleicher Spannung aufgeladen. Die Ladungsmengen werden durch die Entladungsstromstöße mit einem Spiegelgalvanometer bestimmt und verglichen. Sie verhalten sich ebenfalls wie 1 : 2 : 3 : 4. Daraus folgt: Die Ladung eines Kondensators ist der Plattenfläche A proportional:

$Q \sim A.$

Weil die Spannung konstant gehalten wurde und $C = \frac{Q}{U}$ ist, ergibt sich:

$C \sim A.$

Die Kapazität ist der Plattenfläche proportional.



58/1 Abhängigkeit der Kapazität von der Plattenfläche

Versuchsreihe 2 – Kapazität und Plattenabstand.

Ein Plattenkondensator wird bei verschiedenen Plattenabständen mit gleicher Spannung aufgeladen. Die Stromstöße werden in Skalenteilen am Spiegelgalvanometer abgelesen und die Plattenabstände gemessen.

Es zeigt sich, daß die Produkte aus Ladung und Plattenabstand konstant sind.
Es ist:

$$Q \sim \frac{1}{s}.$$

Bei konstanter Spannung folgt daraus:

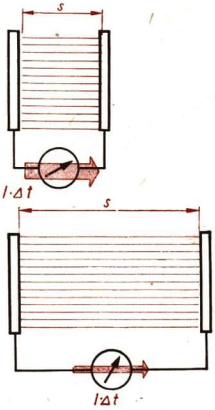
$$C \sim \frac{1}{s}.$$

Die Kapazität ist dem Plattenabstand umgekehrt proportional.

Die beiden Proportionalitäten sind zusammenzufassen:

$$C \sim \frac{A}{s}.$$

Die Kapazität eines Kondensators ist der Plattenfläche proportional und dem Plattenabstand umgekehrt proportional.



59/1 Abhängigkeit der Kapazität vom Plattenabstand

Versuchsreihe 3 – Kapazität und Dielektrikum.

Bei den vorangegangenen Untersuchungen befand sich zwischen den Platten des Kondensators Luft. Man kann den Zwischenraum aber auch mit anderen Isolierstoffen ausfüllen.

Der Stoff, in dem sich das elektrische Feld ausbildet, wird als **Dielektrikum** bezeichnet. Verschiedene Dielektrika führen bei gleicher Plattengröße und gleichem Plattenabstand zu unterschiedlichen Kapazitäten eines Kondensators.
Durch genaue Messungen ist der Proportionalitätsfaktor im Vakuum zwischen der Kapazität C_0 und dem Quotienten $\frac{A}{s}$ bestimmt worden. Man nennt ihn die **absolute Dielektrizitätskonstante** oder **Influenzkonstante** ε_0:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{s}.$$

Ihr Wert ist

$$\varepsilon_0 = \frac{8{,}86}{10^{12}} \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}.$$

Kapazität = Influenzkonstante · $\frac{\text{Oberfläche}}{\text{Oberflächenabstand}}$	$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{s}$

(15.2)

C_0	ε_0	A	s
F	F/m	m²	m

Befinden sich Isolierstoffe als Dielektrikum zwischen den Kondensatorplatten, so ist die Kapazität stets größer als im Vakuum. Für die verschiedenen Dielektrika ist der Zahlenwert bekannt, der angibt, um wievielmal die Kapazität größer ist als die Kapazität im Vakuum. Man nennt ihn die **relative Dielektrizitätskonstante** ε_r eines Stoffes.

Die Kapazität C eines Kondensators mit einem Dielektrikum wird demnach berechnet: $C = \varepsilon_r \cdot C_0$.

$$\boxed{C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{s}} \qquad (15.3)$$

Tabelle 2: Dielektrizitätskonstante einiger Isolierstoffe

Isolierstoff	ε_r	Isolierstoff	ε_r
Vakuum	1	Glas, Porzellan	5
Luft	1,006	Glimmer	7
Papier	2	Aluminiumoxyd	8,5
Paraffin	2	Tempa S	14
Trolitul	2,4	Condensa F	80
Styroflex	2,5	Epsilan 900	900
Preßspan	3	Epsilan 7000	7000
PVC-weich	4		

Die Dielektrizitätskonstante der Luft ist nahezu 1. Für Luftkondensatoren rechnet man hinreichend genau mit der Dielektrizitätskonstante 1.

Beispiel

Zwei kreisförmige Metallplatten mit 20 cm Durchmesser stehen sich in Luft mit 4 mm Abstand gegenüber. Wie groß ist die Kapazität dieser Anordnung?

Gegeben:
Durchmesser $D = 20$ cm
Abstand $s = 4$ mm
Dielektrikum $\varepsilon_r = 1$

Gesucht:
Kapazität C (in pF)

Lösung:

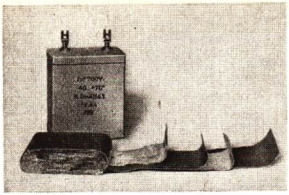
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{s} \qquad A = \frac{D^2 \pi}{4}$$

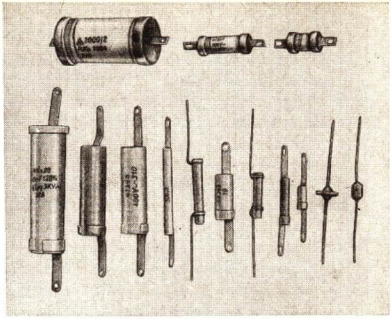
$$C = \frac{8{,}86\ \mathrm{F}}{10^{12}\ \mathrm{m}} \cdot 1 \cdot \frac{0{,}0314\ \mathrm{m}^2}{0{,}004\ \mathrm{m}} \qquad A = \frac{0{,}2^2 \cdot 3{,}14}{4}\ \mathrm{m}^2$$

$$C = \frac{69{,}6}{10^{12}}\ \mathrm{F} \qquad \underline{A = 0{,}0314\ \mathrm{m}^2}$$

$\underline{\underline{C \approx 70\ \mathrm{pF}}}$ *Die Kapazität beträgt 70 pF.*

- *Welche Abmessungen müßte ein Plattenkondensator von 1 F besitzen?*

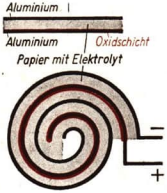




61/1 Wickelkondensator
61/2 Keramikkondensator.
Der VEB Keramische Werkstätten Hermsdorf ist der führende Betrieb in der DDR für die Herstellung derartiger Kondensatoren

2.5.4. Technische Kondensatoren

Für den Gebrauch in der Technik ist es wünschenswert, Kondensatoren mit möglichst großen Kapazitäten auf kleinem Raum unterzubringen. Dazu ist es notwendig, die Platten nahe aneinanderzubringen und einen Isolierstoff mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten zwischen die Platten zu legen. Dabei besteht aber die Gefahr, daß Funken durch den Isolierstoff schlagen und den Kondensator zerstören. Darum findet man auf allen Kondensatoren die Angabe der höchstzulässigen Spannung.
Für die verschiedenen technischen Verwendungszwecke sind besondere Kondensatortypen entwickelt worden.
In **Plattenkondensatoren** sind Silberbeläge auf Glimmerplatten aufgedampft. Zur Vergrößerung der Fläche sind viele solche Platten übereinandergeschichtet und in zwei Gruppen miteinander verbunden. Die Höchstspannung beträgt 500 V. Es werden Kondensatoren mit Kapazitäten von einigen Mikrofarad hergestellt.
Sehr häufig werden **Wickelkondensatoren** verwendet. Zwischen zwei Streifen aus Aluminiumfolie liegen paraffinierte Papierstreifen oder Styroflexfolien. Diese Streifen sind aufgewickelt und mit Vergußmasse in ein Gehäuse eingebettet. Die Kondensatorengehäuse sind meist aus Metall gefertigt, um die elektrischen Felder nach außen abzuschirmen. Wickelkondensatoren haben etwa die gleichen Abmessungen wie Plattenkondensatoren.



61/3
Elektrolytkondensator (schematisch)

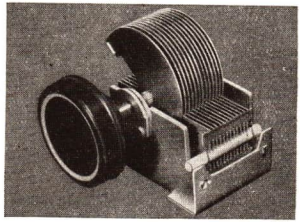
Kleinere Kondensatoren werden in vielen Fällen mit keramischen Isolierstoffen aufgebaut. Spezielle keramische Stoffe mit hohen Dielektrizitätskonstanten sind Calit, Tempa und Condensa. Von großer Bedeutung sind in der Technik die **Elektrolytkondensatoren** (Elko). Es sind Wickelkondensatoren, in denen das Dielektrikum elektrolytisch gebildet wird. Zwischen zwei Aluminiumstreifen liegt ein Natronzellulosepapier, das mit einer Borsäureglyzerinlösung getränkt ist.

Auf dem einen Aluminiumstreifen entsteht elektrolytisch eine dünne Oxidschicht. Sie dient als Dielektrikum. Das anliegende leitfähige Papier und der andere Aluminiumstreifen stellen die zweite Kondensatorplatte dar.

Da die Oxidschicht sehr dünn ist, kann man sehr kleine Elektrolytkondensatoren mit großen Kapazitäten von einigen hundert Mikrofarad herstellen. Je dünner man die Schichten macht, um so kleiner sind die zulässigen Höchstspannungen. Wegen der elektrolytisch erzeugten Schicht dürfen Elkos nur an Gleichspannung angeschlossen werden. Dabei ist auf die richtige Polung zu achten, die auf den Kondensatoren angegeben ist.

In der Funktechnik werden Kondensatoren mit veränderlicher Kapazität benötigt. Es gibt **Drehkondensatoren** mit Luft und solche mit Hartpapier oder Styroflexfolie als Dielektrikum. Kleine Drehkondensatoren, **Trimmer**, haben meist Keramikisolierung.

62/1 Elektrolytkondensatoren und Schaltzeichen



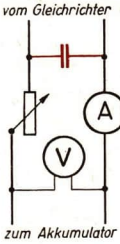
62/2 Drehkondensator und Schaltzeichen

2.5.5. Anwendungen von Kondensatoren

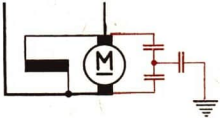
Die Kondensatoren erfüllen in der Elektrotechnik eine Reihe verschiedenartiger Aufgaben. Hier können vorläufig nur einige Einsatzmöglichkeiten angedeutet werden, die später im Physikunterricht genauer betrachtet werden.

Die Kondensatoren haben besondere Bedeutung in Gleichstromkreisen mit Spannungs- und Stromstärkeschwankungen und in Wechselstromkreisen. Hier wird ihre Fähigkeit ausgenutzt, Energie zu speichern.

Durch Gleichrichten von Wechselspannungen erhält man Gleichspannungen von wechselnder Größe. Mit Hilfe eines Glättungskondensators kann man aus dieser pulsierenden Gleichspannung einen angenähert konstanten Gleichstrom erzeugen. Während der Spannungsmaxima nimmt der Glättungskondensator Ladungen auf, die er während der Spannungsminima in den Stromkreis abgibt. Hierzu werden häufig Elektrolytkondensatoren eingesetzt.



63/1 Schaltung eines Glättungskondensators
63/2 Entstörungskondensatoren an einem Elektromotor



Auch für die Funkenlöschung an Schaltern und Motoren kann man Kondensatoren einsetzen. Sie nehmen die sonst im Funken überspringenden Ladungen auf. So werden Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs vermieden.

Im Wechselstromkreis behindert ein Kondensator den Stromfluß, aber er unterbricht ihn nicht, obwohl der Stromkreis nicht geschlossen ist. Die Elektronen können hin- und herpendeln. Die Kondensatorbeläge erhalten abwechselnd aus beiden Richtungen eine Ladung zugeführt. In einer Zusammenschaltung mit Spulen bilden Kondensatoren elektrische Schwingungskreise, die in der Funk- und Fernsehtechnik eine außerordentliche Bedeutung haben. Eine weitere technische Anwendung findet der Kondensator in den Rauchgasfernmeldern und den Rauchgasprüfgeräten für die Kesselanlagen.

Das zwischen die beiden Platten eines Luftkondensators tretende Kohlendioxid verändert die Kapazität des Kondensators. Die meßbare Veränderung löst entweder eine Alarmanlage aus oder ein Zeigerwerk gibt die der Kapazität entsprechende Rauchgaszusammensetzung an.

Ähnlich arbeiten Kapazitivgeber in Regelanlagen automatisierter Produktionsanlagen. Bei der Herstellung von Platten aus Plasten kann man diese nach dem Austritt aus den Walzen zwischen zwei Kondensatorplatten hindurchlaufen lassen. Veränderungen der Dicke der Platten verursachen eine Kapazitätsänderung des Kondensators. Es fließen dadurch sehr kleine Ströme, die eine entsprechende Änderung der Ladung bewirken. In einer Verstärkeranlage werden diese Ströme benutzt, um den Walzendruck so einzuregeln, daß eine Plattendicke beibehalten wird.

● *Überlegen Sie, wie sich die Kapazität bei größerer oder kleinerer Plattendicke ändert!*

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Unter welchen Bedingungen spricht man von einem selbständigen elektrischen Feld?
2. In einem Plattenkondensator (Plattenabstand 8 cm) wird mit Hilfe eines Bandgenerators ein selbständiges elektrisches Feld aufgebaut. Die Spannung zwischen den Platten wird mit einem Elektrometer gemessen.
   Vergrößern und verkleinern Sie den Plattenabstand des selbständigen elektrischen Feldes! Erklären Sie die Veränderungen der Spannung, die dabei auftreten!
3. Berechnen Sie die Kapazität eines Plattenkondensators (Plattenfläche $A = 400\ \text{cm}^2$, Plattenabstand $s = 5$ cm, Dielektrikum Luft)!
4. Erzeugen Sie in einem Plattenkondensator bei kleinem Plattenabstand ein selbständiges elektrisches Feld! Beobachten Sie die Spannung zwischen beiden Platten an einem

Elektroskop, wenn Sie eine Glasplatte, eine Platte aus Plast, eine Gummiplatte oder ein trockenes Brett zwischen die Platten bringen!

5. Was würde sich ergeben, wenn man im vorhergehenden Versuch ein unselbständiges Feld benutzt, indem man die Verbindung mit einer Hochspannungsquelle bestehen läßt?

6. Wie groß muß die Fläche der Metallfolien eines Wickelkondensators sein, der eine Kapazität von 4 μF hat? Als Dielektrikum dient Paraffinpapier (Dicke 0,03 mm).

7. In welcher Stellung hat ein Drehkondensator seine kleinste bzw. größte Kapazität?

Zusammenfassung

1. **Körper können elektrisch positiv oder negativ geladen sein.**

   Was unterscheidet einen geladenen von einem ungeladenen Körper?

2. **Die Maßeinheit der Ladung ist das Coulomb.**

   Wie mißt und berechnet man Ladungen?

3. **Ladungen üben Kräfte auf Körper aller Art aus.**

   Wie wirken sie auf geladene und ungeladene Metallkörper und auf Körper aus Isolierstoffen?

4. **Um einen elektrisch geladenen Körper erfüllt ein elektrisches Feld den Raum.**

   Wie kann man elektrische Felder nachweisen?

5. **Die Kräfte im homogenen elektrischen Feld sind abhängig von der Spannung, vom Plattenabstand und der Ladung eines Probekörpers.**

   Welche Abhängigkeit besteht zwischen diesen Größen?
   Wie ist die elektrische Feldstärke definiert?

6. **Jedes elektrische Feld enthält Energie.**

   Wie kann man diese Energie aus mechanischer Energie gewinnen?
   Wie kann sie in andere Energieformen überführt werden?

7. **Die Feldkräfte können in der Technik ausgenutzt werden.**

   Welche Möglichkeiten kennen Sie dafür?

8. **Im Gewitter entstehen weiträumige elektrische Felder.**

   Woher erhalten sie ihre Energie?
   Welche Energieumwandlungen erfolgen beim Blitzüberschlag?

9. **Im Kondensator kann elektrische Energie aufgespeichert werden.**

   Welche Beziehung besteht zwischen Ladung und Spannung?
   Wie ist die Maßeinheit der Kapazität definiert?
   Welche Maßnahmen muß man in der Technik ergreifen, um Kondensatoren mit möglichst großer Kapazität herzustellen?

10. **Kondensatoren werden in der Elektrotechnik vielfältig eingesetzt.**

    Beschreiben Sie verschiedene Typen von Kondensatoren!
    Bei welchen Anwendungen wird die Speicherfähigkeit der Kondensatoren und bei welchen die Kapazitätsänderungen ausgenutzt?

3. Die elektrische Energie

VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht“:
Im Karbidofen wird bei der hohen Temperatur des elektrischen Lichtbogens aus Kalk und Kohle Kalziumkarbid erzeugt. Dieses ist ein wichtiger Rohstoff für die Dünger- und Plasterzeugung. Da die chemische Industrie einer der bedeutsamsten Zweige unserer Volkswirtschaft ist, muß mit der Steigerung der chemischen Produktion auch die Erzeugung von Elektroenergie vorangetrieben werden. Zu diesem Zwecke sind ein langfristiges Chemieprogramm und ein Energieprogramm aufgestellt worden.

3.1. Arbeit und Leistung im Gleichstromkreis

3.1.1. Die elektrische Arbeit

Schon in der Klasse 8 wurde an Wärmegeräten untersucht, wie die elektrische Arbeit von Spannung, Stromstärke und Zeit abhängt. Die dort erläuterten Gesetzmäßigkeiten gelten unabhängig von der Art der Elektrogeräte in jedem Gleichstromkreis. Wir können sie aus der Bewegung von Ladungen im elektrischen Feld ableiten.

Das Produkt aus Spannung und bewegter Ladung ist die elektrische Arbeit.

$$W = U \cdot I \cdot \Delta t$$

Das bezieht sich auf das einmalige Bewegen einer Ladung im elektrischen Feld während der Zeit Δt. Da im geschlossenen Gleichstromkreis fortwährend Ladungen in Bewegung sind, läßt sich die elektrische Arbeit berechnen, indem man die Spannung mit der transportierten Elektrizitätsmenge multipliziert.

$$W = U \cdot Q$$

$$Q = I \cdot t.$$

Arbeit = Spannung · Stromstärke · Zeit	$W = U \cdot I \cdot t$	(16)

Als *Maßeinheiten* für die elektrische Arbeit ergeben sich die **Wattsekunde (Ws)** und die **Kilowattstunde (kWh)**.
Zu Ehren des englischen Physikers J. P. JOULE wird eine Wattsekunde auch als ein **Joule (J)** bezeichnet:

$$1\,\mathrm{V} \cdot 1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{s} = 1\,\mathrm{VAs} = 1\,\mathrm{Ws} = 1\,\mathrm{J}.$$

Wenn man die Spannung bzw. die Stromstärke nach dem Ohmschen Gesetz ausdrückt, läßt sich die elektrische Arbeit auch mit folgenden Formeln berechnen:

$$W = I^2 \cdot R \cdot t \tag{16.1}$$

$$W = \frac{U^2}{R} \cdot t. \tag{16.2}$$

● *Überlegen Sie, wann es sinnvoll ist, diese Formeln zu verwenden!*

3.1.2. Die elektrische Leistung

Die Umsetzung einer bestimmten elektrischen Arbeit kann in verschiedenen Elektrogeräten schneller oder langsamer erfolgen. Die Geräte haben eine unterschiedliche **elektrische Leistung**. Um diese auszudrücken, muß man die aufgewendete Arbeit in Beziehung zur Zeit setzen.

Leistung ist der Quotient aus Arbeit und Zeit. $P = \frac{W}{t}$.

Für die elektrische Leistung ergibt sich daraus:

$$P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t}.$$

Leistung = Spannung · Stromstärke	$P = U \cdot I$

(17)

Die elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke.

Die *Maßeinheiten* der Leistung sind **Watt (W)**, **Kilowatt (kW)** und **Megawatt (MW)**.
Die elektrische Leistung läßt sich auch folgendermaßen ausdrücken:

$$P = I^2 \cdot R \tag{17.1}$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \tag{17.2}$$

Die Einheit der Leistung, das Watt, ist aus den Grundgrößen der Mechanik (Meter, Kilogramm, Sekunde) abgeleitet (vgl. S. 228). Die Einheit der Spannung, das Volt, ist aus Gleichung (17) definiert.

$$U = \frac{P}{I}, \qquad 1\,V = \frac{1\,W}{1\,A}.$$

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. An Elektrizitätszählern ist die Zahl der Umdrehung n des Ankers der elektrischen Arbeit proportional. Man findet auf dem Zähler z. B. die Angabe 1200 U/kWh. Schalten Sie ein Elektrogerät in den Stromkreis ein! Zählen Sie die Ankerumdrehungen, messen Sie die Zeit und berechnen Sie die elektrische Arbeit, die ein Elektrogerät während der Betriebsdauer aufgenommen hat, und seine Leistung!
2. Lesen Sie an einem Ferientag halbstündlich den Stand des Elektrizitätszählers in Ihrer Wohnung ab! Stellen Sie den Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dar!
3. Berechnen Sie die Betriebsstromstärke der Glühlampen für die Netzspannung von 220 V mit den Leistungen 15 W, 25 W, 40 W, 75 W und 100 W!
4. Eine Schmelzsicherung für 220 V schmilzt bei einer Stromstärke von 6 A durch. Mit welcher Leistung kann man den Stromkreis belasten?

3.2. Das elektrische Wärmeäquivalent

3.2.1. Das Joulesche Gesetz

Es ist eine uns vertraute Tatsache, daß durch den elektrischen Strom eine Erwärmung der Leitungen eintritt. In den dünnen Drähten der Glühlampe führt sie bis zur Weißglut. Wie kommt diese Erwärmung zustande?
In einem Leiter bewegen sich die freien Elektronen durch das Gitter der positiven Metallionen. Die Elektronen treten dabei in Wechselwirkung mit den Metallionen und geben ihre Bewegungsenergie teilweise an diese ab. Dadurch geraten die Metallionen in größere Wärmeschwingungen, und die Temperatur des Leiters steigt. Elektrische Energie wird dabei in Wärmeenergie umgewandelt. Man kann sich modellmäßig vorstellen, daß ein mechanischer Zusammenstoß zwischen den Elektronen und den Ionen erfolgt; die Vorgänge im atomaren Bereich sind aber viel komplizierter, da die bewegten Elektronen und Ionen über ihre elektrischen und magnetischen Felder in Wechselwirkung zueinander treten. Dadurch werden die Elektronen in ihrer fortschreitenden Bewegung behindert, und so wird der elektrische Widerstand des Leiters bedingt.

● *Vergegenwärtigen Sie sich noch einmal, in welcher Weise der elektrische Widerstand der Metalle und Halbleiter von der Temperatur abhängt!*

Wenn in einem Stromkreis keine anderen Energieumwandlungen auftreten, dann wird die gesamte elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Das Umrechnungsverhältnis wurde von dem englischen Physiker James Prescott Joule im Jahre 1841 durch genaue Messungen gefunden. Er untersuchte die von einem elektrisch erwärmten Heizkörper in Wärme umgesetzte elektrische Energie und formulierte daraufhin das nach ihm benannte **Joulesche Gesetz**. Seine besondere Leistung besteht darin, daß er als erster einen zuverlässigen Zahlenwert für das elektrische Wärmeäquivalent auf experimentellem Wege ermittelte und so dazu beitrug, den Satz von der Erhaltung der Energie beweisen zu können.

Die von einem elektrischen Strom erzeugte Wärmemenge entspricht der elektrischen Arbeit.

$$\boxed{W = K \cdot U \cdot I \cdot t} \tag{18.1}$$

W	K	U	I	t
cal	$\frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$	V	A	s

Der Umrechnungsfaktor wird als **elektrisches Wärmeäquivalent** bezeichnet und besitzt den Wert $K = 0{,}239$ cal/Ws. Damit erhält das Gesetz dann seine endgültige Form.

$$\boxed{W = 0{,}239\ \text{cal/Ws} \cdot U \cdot I \cdot t} \tag{18.2}$$

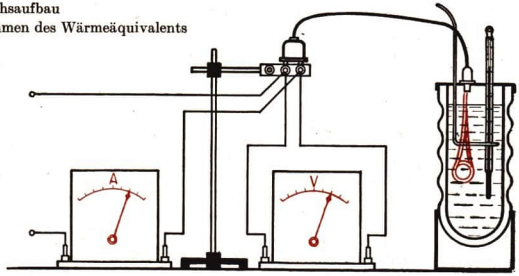
Zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents muß man einerseits die elektrische Arbeit ermitteln, die ein Elektrogerät in Wärme umsetzt. Andererseits muß die im Wärmegerät umgesetzte Wärmemenge festgestellt werden. Die Berechnungsgrundlage ist dann

$$K = \frac{m \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{U \cdot I \cdot t}.$$

In einem Versuch wollen wir nun das Wärmeäquivalent bestimmen. Dabei treten einige Schwierigkeiten auf, weil meist ein Teil der entwickelten Wärmemenge in unerwünschter Weise aus dem Kalorimeter abgeleitet oder abgestrahlt wird.

Um Ableitung und Abstrahlung der Wärme in ihrer Wirkung aufzuheben, nehmen wir Wasser, dessen Temperatur niedriger als die Lufttemperatur ist. Beim Versuch wird die Erwärmung dann abgebrochen, wenn die Temperatur so viel über die Lufttemperatur angestiegen ist als sie vorher darunter lag. Bei einem Versuch wurden ermittelt:

68/1 Versuchsaufbau
zum Bestimmen des Wärmeäquivalents



Gemessen:

Anfangstemperatur	$\vartheta_1 = 14\ °C$
Lufttemperatur	$\vartheta_0 = 20\ °C$
Endtemperatur	$\vartheta_2 = 26\ °C$
Masse	$m = 431\ g$
Spannung	$U = 218\ V$
Stromstärke	$I = 1{,}36\ A$
Zeit	$t = 73\ s$

Gesucht:

Elektrisches Wärmeäquivalent $K \left(\text{in } \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}\right)$

Lösung:

$$K = \frac{m \cdot c(\vartheta_2 - \vartheta_1)}{U \cdot I \cdot t}$$

$$K = \frac{431 \cdot 1 \cdot 12}{218 \cdot 1{,}36 \cdot 73} \ \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$$

$$K \approx \frac{5{,}2 \cdot 10^3}{2{,}16 \cdot 10^4} \ \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$$

$$K \approx 0{,}24 \ \frac{\text{cal}}{\text{Ws}}$$

3.2.2. Der Wirkungsgrad elektrischer Wärmegeräte

Im Versuch zum Bestimmen des elektrischen Wärmeäquivalents wurden die Wärmeverluste sehr klein gehalten. Benutzt man einen Tauchsieder im Haushalt zum Erwärmen einer Flüssigkeit in einem offenen Gefäß, so treten erheblich größere Wärmeverluste auf. Bei anderen elektrischen Wärmegeräten sind die Verluste noch größer.

Bei den elektrischen Wärmegeräten kann nur ein Teil der entwickelten Wärme ausgenutzt werden.

Um die Wärmeausnutzung verschiedener Wärmegeräte zu vergleichen, berechnet man ihren **Wirkungsgrad.**

Der Wirkungsgrad eines Wärmegerätes ist das Verhältnis von ausgenutzter Wärmemenge zur zugeführten Wärmemenge.

$$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}}$$

$$\eta = \frac{c \cdot m \cdot \Delta\vartheta}{K \cdot U \cdot I \cdot t}.$$

Die zugeführte Wärmemenge W_{zu} bestimmt man aus der elektrischen Arbeit und dem elektrischen Wärmeäquivalent. Die nutzbringend abgeführte Wärmemenge W_{ab} errechnet man aus der Masse der erwärmten Stoffmenge, ihrer spezifischen Wärme und der Temperaturerhöhung.

Beispiel

Berechne die Anschlußleistung einer Heizplatte, die bei einem Wirkungsgrad von 0,8 einen Liter Wasser in 7 Minuten um 80 grd erwärmt.

Gegeben:

$m = 1\ \text{kg} = 1000\ \text{g}$

$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 80\ \text{grd}$

$t = 7\ \text{min} = 420\ \text{s}$

$\eta = 0{,}8$

$c_w = 1\ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grd}}$

Gesucht:

P_{zu} (in kW)

Lösung:

$$P_{zu} = \frac{A_{zu}}{t}$$

(Für die Arbeit wird hier das Formelzeichen A verwendet.)

$$A_{zu} = \frac{W_{zu}}{K}$$

$$P_{zu} = \frac{W_{zu}}{K \cdot t}$$

$$W_{zu} = \frac{W_{ab}}{\eta}$$

$$P_{zu} = \frac{W_{ab}}{K \cdot t \cdot \eta}$$

$$W_{ab} = c_w \cdot m \cdot \Delta\vartheta$$

$$P_{zu} = \frac{c_w \cdot m \cdot \Delta\vartheta}{K \cdot t \cdot \eta}$$

$$P_{zu} = \frac{1\ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grd}} \cdot 1000\ \text{g} \cdot 80\ \text{grd}}{0{,}239\ \frac{\text{cal}}{\text{Ws}} \cdot 420\ \text{s} \cdot 0{,}8}$$

$$P_{zu} = \frac{1 \cdot 1000 \cdot 80}{0{,}239 \cdot 420 \cdot 0{,}8}\ \frac{\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grd}} \cdot \text{g} \cdot \text{grd}}{\frac{\text{cal}}{\text{Ws}} \cdot \text{s}}$$

$$\underline{\underline{P_{zu} = 1000\ \text{W} = 1\ \text{kW}}}$$

Die Heizplatte hat eine Anschlußleistung von 1 kW.

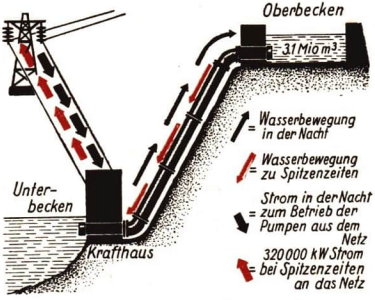
Beispiele

Geräte, bei denen die elektrische Wärmequelle und das Gefäß fest miteinander verbunden sind, haben einen konstanten Wirkungsgrad: zum Beispiel der elektrische Schnellkochtopf, der Futterdämpfer. Für Kochplatten und Tauchsieder kann man keinen bestimmten Wirkungsgrad angeben, weil die Art des verwendeten Gefäßes bedeutungsvoll ist. Der Tauchsieder befindet sich in der Flüssigkeit und gibt fast die gesamte Wärme an die Flüssigkeit ab. Zu seiner Eigenerwärmung ist nur eine kleine Wärmemenge notwendig. Von einer elektrischen Kochplatte wird die Wärme erst über das Gefäß in die Flüssigkeit weitergeleitet. Die Platte gibt außerdem auch nach unten und zur Seite Wärme an die Umgebung ab. Eine Kochplatte wird am besten ausgenutzt mit einem Topf, der einen ebenen Boden hat. Sein Durchmesser soll mit der Platte übereinstimmen. Für den Betrieb einer Kochplatte ist noch folgendes zu beachten: Beim Anheizen der kalten Platte nimmt diese eine verhältnismäßig große Wärmemenge auf. Einen Teil dieser Wärmemenge kann man ausnutzen, indem man die Platte schon ausschaltet, bevor

70/1 Wärmeabgabe an einem Tauchsieder und an einer Kochplatte.

der Kochvorgang beendet ist. Diese Maßnahme hat zweierlei Bedeutung. Die Einsparung kommt der Volkswirtschaft zugute, da die eingesparte elektrische Energie an anderen wichtigen Stellen in der Industrie, im Verkehr oder im Gesundheitswesen zur Verfügung steht. Außerdem spart man dadurch auch im persönlichen Haushalt.

Sparsamkeit bei der Verwendung von Elektroenergie ist auch das Prinzip, von dem sich der Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe leiten ließ, als das Projekt der Energieversorgung durch ein alle sozialistischen Staaten umfassendes Verbundnetz ausgearbeitet wurde. Über 400-kV-Leitungen wird die in den sozialistischen Staaten zu bestimmten Tages- und Nachtzeiten vorhandene und nicht genutzte freie Energie-



71/1 Pumpspeicherwerk Hohenwarte am Oberlauf der Saale. Mit einer Leistung von 320000 kW kann es nach der Fertigstellung während der Spitzenbelastungszeiten an das Netz angeschlossen werden.
Während der Nachtstunden fördern elektrisch angetriebene Pumpen das Wasser in ein hochgelegenes Speicherbecken. Von dort gelangt es während der Spitzenbelastungszeit wieder über die anzutreibenden Turbinen in das untere Staubecken

kapazität den Staaten zur Verfügung gestellt, in denen auf Grund der Spitzenbelastungszeit ein erhöhter Energiebedarf vorliegt. Die Spitzenbelastungszeiten treten morgens und abends in zeitlicher Aufeinanderfolge in den einzelnen sozialistischen Ländern auf. Dadurch ist ein gegenseitiger Energieaustausch möglich. Innerhalb der Deutschen Demokratischen Republik hat man dazu noch Möglichkeiten der Energiespeicherung durch den Ausbau und Neubau von Pumpspeicherwerken geschaffen. Solche Maßnahmen dienen dazu, die Energieversorgung zu sichern. Durch die Kraftwerke der Deutschen Demokratischen Republik wird heute bereits mehr Elektroenergie zur Verfügung gestellt als Dänemark, Finnland, Griechenland, Holland, Luxemburg, Portugal und Spanien zusammen aufbringen können. Die Pro-Kopf-Produktion an Elektroenergie liegt in der Deutschen Demokratischen Republik höher als in Frankreich, England und in Westdeutschland. Da aber der Verbrauch der chemischen Industrie bei uns sehr hoch ist, ist es notwendig, mit der verfügbaren Elektroenergie so ökonomisch wie möglich umzugehen, das heißt sie besonders dort einzusetzen, wo der größte Nutzen für uns entsteht.
Durch alle diese Maßnahmen ist es möglich, mit einer kleineren Kraftwerksleistung unsere Industrie und Bevölkerung so mit elektrischer Energie zu versorgen, wie es sonst nur mit einer erheblich größeren Kraftwerksleistung möglich wäre.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Ein Tauchsieder mit einer Leistungsaufnahme von 600 W erhitzt 0,75 l Wasser von 14 °C bis zum Sieden (100 °C). In welcher Zeit nach dem Einschalten beginnt das Wasser zu sieden?

2. Vergleichen Sie eine Ofenheizung mit Briketts und die Heizung mit einem elektrischen Heizgerät! Es werden an einem Tag 6 kg Briketts mit einem Heizwert von 4200 kcal/kg verbrannt. Der Wirkungsgrad des Kachelofens ist 0,56. Der Preis der Briketts beträgt mit Anfuhr 7,40 DM je dt.
   2.1. Welche elektrische Arbeit entspricht der vom Kachelofen abgegebenen Wärmemenge?
   2.2. Wie groß muß die Leistung des elektrischen Heizgerätes sein, wenn die gleiche Wärmemenge, über 12 Stunden verteilt, entwickelt werden soll?
   2.3. Welche Heizungsart ist billiger (1 kWh kostet 0,08 DM)?

3. Stellen Sie in Ihrem Betrieb fest, welche elektrischen Wärmegeräte dort eingesetzt werden. Welche Leistung haben sie?

4. Wie wird in Ihrem Betrieb Elektroenergie eingespart?

5. Welche Elektrogeräte soll man in der Spitzenbelastungszeit im Haushalt nicht verwenden?

Zusammenfassung

1. **In allen Elektrogeräten wird elektrische Energie in andere Energieformen umgesetzt.**

   Wie berechnet man die elektrische Arbeit?

2. **Jedes Elektrogerät hat eine bestimmte Leistung.**

   Welche Beziehung besteht zwischen elektrischer Arbeit und Leistung?

3. **Zwischen elektrischer Arbeit und der entwickelten Wärmemenge besteht immer ein bestimmtes Verhältnis.**

   Welches Gesetz bringt das zum Ausdruck?

4. **In jedem elektrischen Wärmegerät kann die entstehende Wärme für den vorgesehenen Zweck nur bis zu einem bestimmten Umfang nutzbar gemacht werden.**

   Vergleichen Sie den Wirkungsgrad eines elektrischen Futterdämpfers mit dem einer Kochplatte im Haushalt!

5. **Sparsamkeit ist keine Notmaßnahme, sondern sozialistisches Lebensprinzip.**

   Erläutern Sie das am Beispiel der Energieversorgung!

4. Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes

Über die Straßen unserer Republik rollen die Kleintransportfahrzeuge aus den volkseigenen Barkas-Werken. Die formschöne Gestaltung des Barkas 1000 wird durch die verchromten, blitzenden Teile unterstrichen. Diese Chromüberzüge werden auf elektrochemischem Wege hergestellt. Sie schützen den darunterliegenden Stahl vor der Korrosion.

4.1. Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten

Aus dem Chemieunterricht sind die Grundlagen der Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten schon bekannt. Dort wurde auch erklärt, wie man sie technisch ausnutzen kann, um Grundstoffe wie Aluminium, Natrium, Kalium und Reinkupfer zu gewinnen. Die technische Bedeutung der elektrochemischen Vorgänge reicht aber noch weiter. Die Oberflächen von Werkstücken können veredelt werden. In „Batterien" und Akkumulatoren entstehen durch chemische Umsetzungen elektrische Spannungen. So werden elektrochemische Vorgänge in fast allen Zweigen der Produktion angewendet. Wir wollen einige hier genauer kennenlernen; zunächst fassen wir jedoch noch einmal die Grundtatsachen zusammen.

4.1.1. Die Dissoziation

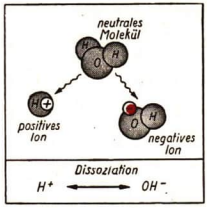
Säuren, Basen und Salze, die in wäßriger Lösung oder als Schmelze den elektrischen Strom leiten, nennt man Elektrolyte.

Andere Flüssigkeiten, insbesondere Öle und auch reines Wasser, leiten den Strom sehr wenig.
Die Leitfähigkeit der Elektrolyte beruht auf der *Dissoziation.*

Die Dissoziation ist eine Aufspaltung von Molekülen in Ionen.

Kochsalz dissoziiert (spaltet sich) in negativ geladene Chlorid-Ionen (Cl^-) und positiv geladene Natrium-Ionen (Na^+). Die elekrische Ladung der Ionen entsteht im Kristallgefüge dadurch, daß das Natriumion eine Elementarladung (Elektron) an das Chlorion abgibt.

Wassermoleküle dissoziieren in Wasserstoff-Ionen (H^+) und Hydroxyl-Ionen (OH^-). Von 750 Millionen Wassermolekülen ist nur eines dissoziiert.
In wäßrigen Lösungen von Säuren, Basen und Salzen ist die Zahl der dissoziierten Moleküle erheblich größer. Sie können beinahe vollständig dissoziiert sein. So leiten diese Flüssigkeiten den elektrischen Strom besser als reines Wasser. Sie erreichen aber bei weitem nicht die Leitfähigkeit von Metallen.
Die Ionen sind Träger einer ihrer Wertigkeit entsprechenden Zahl von Elementarladungen.
Der Vorgang des Aufspaltens neutraler Moleküle in Ionen sei an einigen Beispielen gezeigt:



74/1 Dissoziation eines Wassermoleküls zu H^+ und OH^-

Beispiele

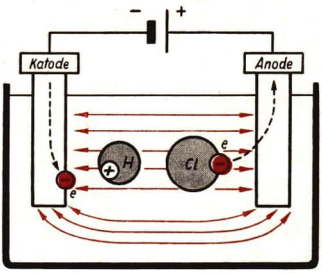
Molekül	Ionen	Beispiel
Säure	Wasserstoff und Säurerest	$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{--}$
Salz	Metall und Säurerest	$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$
Base	Metall und Hydroxylgruppe	$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{++} + 2(OH)^-$

4.1.2. Der Ionenstrom

Bringt man in eine elektrolytische Flüssigkeit zwei Elektroden, die an eine Spannungsquelle angeschlossen sind, dann geraten die Ionen durch die Kraftwirkung im elektrischen Feld zwischen den beiden Elektroden in Bewegung.
Die positiven Ionen wandern zur Katode, die negativen zur Anode. Sie heißen darum *Kationen* beziehungsweise *Anionen*.

In einer Elektrolytlösung bewegen sich zwischen den Elektroden in beiden Richtungen Ionen.

74/2 Ionenstrom in Elektrolytlösung innerhalb eines elektrischen Feldes (Ionenleitung in Salzsäure)

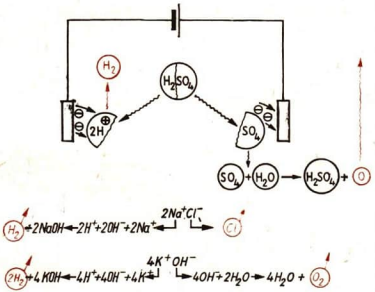


Die Ionen werden an den Elektroden zu Atomen. Jedes Kation nimmt an der Katode Elektronen auf und geht in atomaren Zustand über. Von der Spannungsquelle strömen immer wieder neue Elektronen nach. Die Anionen geben an der Anode Elektronen ab, die zur Spannungsquelle weiterfließen. In der Elektrolytlösung erfolgt die Dissoziation ständig, so daß die Leitfähigkeit erhalten bleibt.

4.1.3. Die Elektrolyse

Bei den Leitungsvorgängen in Flüssigkeiten wirken mehrere physikalische Gesetzmäßigkeiten zusammen.

Die Moleküle und Ionen sind in einer Flüssigkeit leicht beweglich.
Die Ionen unterliegen der Kraftwirkung eines elektrischen Feldes.
Wasserstoff- und Metallionen sind elektrisch positiv, Säurerest- und Hydroxyl-Ionen elektrisch negativ geladen.



75/1 Elektrolyse, Zusammenstellung verschiedener Beispiele

Daraus ergibt sich schließlich, daß die Bestandteile einer chemischen Verbindung getrennt werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Elektrolyse**.

Die Atome verhalten sich an den Elektroden entsprechend ihrer chemischen Eigenschaften.

Metallatome oder *Wasserstoffmoleküle* werden an der Katode abgeschieden. In wäßrigen Lösungen treten bei einigen Metallen, zum Beispiel bei Natrium, Kalium und Kalzium, an der Katode andere Vorgänge auf. Die Wasserstoffionen aus dem dissoziierten Wasser entladen sich leichter als die Metallionen. Es wird also Wasserstoff frei. Dadurch bleiben die Metallionen in der Lösung und bilden zum Teil mit den **OH-**Ionen Hydroxide.

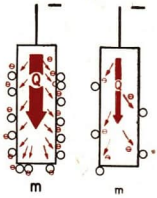
Säurerest- und *Hydroxylgruppen* gehen an der Anode Verbindungen mit dem Wasserstoff des Wassers ein; dadurch wird an der Anode Sauerstoff frei. In manchen Fällen tritt dadurch eine Oxydation des Anodenmaterials ein.

Einige Säurereste reagieren nicht mit dem Wasser. Sie werden selber frei, zum Beispiel Chlor.

4.1.4. Die Faradayschen Gesetze der Elektrolyse

Für die technische Anwendung der Elektrolyse kann man sich nicht damit begnügen, nur die Vorgänge zu kennen. Man muß wissen, mit welcher Stromstärke in einer bestimmten Zeit eine Stoffmenge abgeschieden wird. Durch diese Kenntnisse der

mathematischen Zusammenhänge kann man Anlagen für elektrolytische Verfahren konstruieren und ihre Leistungsfähigkeit berechnen. Bei der Bedienung der Anlagen können die Arbeiter nur dann maximale Leistungen erzielen und fehlerfrei arbeiten, wenn sie auch genau mit den physikalischen Gesetzen vertraut sind.



76/1 Proportionalität zwischen abgeschiedener Stoffmenge und Elektrizitätsmenge

Aus der Betrachtung der Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten ergibt sich, daß jedes Ion eine bestimmte Ladung transportiert. So muß die an einer Elektrode abgeschiedene Masse m der transportierten elektrischen Ladung Q proportional sein:

$$m \sim Q.$$

Die Ladung ist das Produkt aus Stromstärke und Zeit. Also gilt:

$$m \sim I \cdot t.$$

Der Proportionalitätsfaktor kann für jeden Stoff experimentell bestimmt werden. Man bezeichnet ihn als das *elektrochemische Äquivalent* eines Stoffes (Formelzeichen: $\ddot{A}$).

$$m = \ddot{A} \cdot Q$$

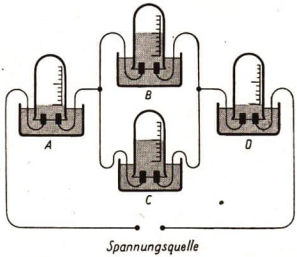
abgeschiedene Masse	=	**elektrochemisches Äquivalent**	**· Stromstärke · Zeit**	$m = \ddot{A} \cdot I \cdot t$

(19)

m	$\ddot{A}$	I	t
mg	$\frac{\text{mg}}{\text{As}}$	A	s

Der Zahlenwert des elektrochemischen Äquivalents ist gleich der Masse eines Stoffes, die durch den Ladungstransport in einer Amperesekunde abgeschieden wird (Logarithmentafel, VWV 00915 S. 49).

Diese Zusammenhänge wurden von dem englischen Physiker MICHAEL FARADAY entdeckt. Mit der Versuchsanordnung nach Bild 76/2 untersuchte er den Zusammenhang zwischen abgeschiedener Stoffmenge und der transportierten elektrischen Ladung.



76/2 FARADAYS Versuchsanordnung zur Untersuchung elektrolytischer Vorgänge

Das nach seinem Entdecker benannte **1. Faradaysche Gesetz** lautet:

Die bei einer Elektrolyse abgeschiedene Masse ist der Stromstärke und der Zeit proportional.

Beispiel

Bestimmung des elektrochemischen Äquivalents von Silber. Es wird die Ladungsmenge und die von ihr abgeschiedene Masse des Silbers gemessen. Der Quotient aus beiden Größen ergibt das elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A} = \frac{m}{I \cdot t}.$$

In eine wäßrige Silbernitratlösung taucht man zwei Elektroden. Die Katode wird zuvor gewogen, dann läßt man einen Strom durch den Elektrolyten fließen und mißt Zeitdauer des Stromflusses und Stromstärke. Aus beiden Meßwerten errechnet man die transportierte Ladung:

$$Q = I \cdot t.$$

Man nimmt die Katode aus der Lösung und wägt sie wieder. Die Massenzunahme ist die abgeschiedene Silbermenge m.

Bei sorgfältiger Versuchsdurchführung findet man als Mittelwert aus mehreren Versuchen:

$$\ddot{A}_{Ag} = 1{,}118 \frac{\text{mg}}{\text{As}}.$$

Diesen Wert hat man früher zur Definition der Stromstärkeeinheit benutzt.
Es heißt: 1 Ampere ist die Stromstärke, durch die aus einer wäßrigen Silbernitratlösung in einer Sekunde eine Masse von 1,118 mg Silber ausgeschieden wird.
Mit der Einführung der Tafel der gesetzlichen Einheiten wurde die Größe eines Amperes nicht verändert, zu seiner Festlegung wird jetzt aber eine elektromagnetische Kraftwirkung benutzt (vergleiche S. 12 und Anhang S. 240 f.).

Tabelle 3. Elektrochemische Äquivalente

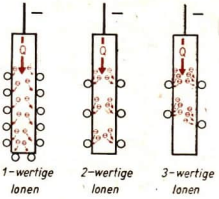
Stoff	elektrochemisches Äquivalent $\left(\text{in } \frac{\text{mg}}{\text{As}}\right)$	Stoff	elektrochemisches Äquivalent $\left(\text{in } \frac{\text{mg}}{\text{As}}\right)$
Aluminium	0,093	Nickel	0,304
Blei	1,074	Quecksilber	2,079
Chlor	0,367	Sauerstoff	0,083
Eisen	0,193	Silber	1,118
Gold	0,681	Wasserstoff	0,010
Kalium	0,405	Zink	0,339
Kupfer	0,329	Zinn	0,308

Die Werte der elektrochemischen Äquivalente lassen sich auch auf anderem Wege bestimmen. Das elektrochemische Äquivalent ist gleich dem Produkt aus der Zahl der Ionen Z, die eine Ladung von einer Amperesekunde transportieren, und der Masse eines Ions a:

$$\ddot{A} = Z \cdot a.$$

Jedes Ion transportiert im Stromkreis so viele Elementarladungen, wie seiner Wertigkeit n entspricht. Eine Amperesekunde besteht aus rund $6{,}25 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen. Diese Zahl von Ionen eines einwertigen Stoffes ist für den Transport einer Ladung von 1 As notwendig.

● *Überlegen Sie, wie viele Ionen eines zwei- oder eines dreiwertigen Stoffes zum Transport der gleichen Ladungsmenge benötigt werden!*



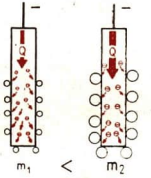
78/1 Abhängigkeit der abgeschiedenen Stoffmenge vom Atomgewicht

Die Zahl der Atome, die beim Transport von 1 As abgeschieden werden, ist gleich der Ionenzahl:

$$Z = \frac{6{,}25 \cdot 10^{18}}{n}.$$

Die Masse eines Atoms in mg ist aus dem Atomgewicht zu berechnen. Dem Atomgewicht 1 entspricht eine Masse der Atome von rund $\frac{1{,}66}{10^{21}}$ mg. So ergibt sich die Masse eines Atoms, indem man das Atomgewicht (A) mit $\frac{1{,}66}{10^{21}}$ multipliziert:

$$a = \frac{A \cdot 1{,}66}{10^{21}}\,\text{mg}.$$



78/2 Abhängigkeit der abgeschiedenen Stoffmenge von der Ladung der Ionen

Der Wert des elektrochemischen Äquivalents ist also:

$$\ddot{A} = Z \cdot a$$

$$\ddot{A} = \frac{6{,}25 \cdot 10^{18}}{n} \cdot \frac{A \cdot 1{,}66}{10^{21}} \quad \frac{\text{mg}}{\text{As}}$$

$$\ddot{A} = \frac{A \cdot 1{,}037}{n \cdot 10^2} \quad \frac{\text{mg}}{\text{As}}.$$

$$\boxed{\ddot{A} = \frac{1}{96{,}494} \cdot \frac{A}{n}} \quad \frac{\text{mg}}{\text{As}} \qquad (20)$$

Setzt man die elektrochemischen Äquivalente zweier Stoffe zueinander ins Verhältnis, so ergibt sich das

2. Faradaysche Gesetz:

$$\boxed{\ddot{A}_1 : \ddot{A}_2 = \frac{A_1}{n_1} : \frac{A_2}{n_2}} \qquad (21)$$

Die elektrochemischen Äquivalente verhalten sich wie die Quotienten aus Atomgewicht und Wertigkeit.

(In der Chemie werden die Quotienten aus Atomgewicht und Wertigkeit als Äquivalentgewichte bezeichnet.)

Diese Gesetzmäßigkeiten wurden von FARADAY aus vielen einzelnen Versuchen und Messungen gefunden. Er berechnete auch den Zahlenwert 96,494. Als *Faradaysche Zahl* wird der tausendfache Wert 96494 bezeichnet.

Beispiel

Berechnung von elektrochemischen Äquivalenten

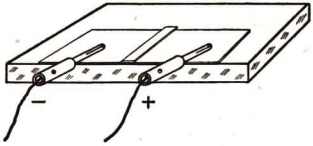
Stoff	Atomgewicht	Wertigkeit	elektrochemisches Äquivalent $\left(\text{in } \frac{\text{mg}}{\text{As}}\right)$
Chlor	35,457	1	$\frac{35{,}457}{1 \cdot 96{,}494} = 0{,}368$
Sauerstoff	16	2	$\frac{16}{2 \cdot 96{,}494} = 0{,}083$
Aluminium	26,98	3	$\frac{26{,}98}{3 \cdot 96{,}494} = 0{,}093$

4.1.5. MICHAEL FARADAY

MICHAEL FARADAY gehört zu den bedeutenden Wissenschaftlern aller Zeiten. Er wurde 1791 in einem Ort bei London geboren. Während seiner neunjährigen Tätigkeit als Buchbinder las er viele wissenschaftliche Bücher, die er einzubinden hatte. So begann er sich eingehend mit physikalischen und chemischen Fragen im Selbststudium zu beschäftigen. Er bewarb sich später als Gehilfe in einem chemischen Laboratorium. FARADAY lernte mit unermüdlichem Fleiß und eignete sich umfassende Kenntnisse auf dem Gebiet der Physik und Chemie an. Schließlich wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Sir H. DAVY und 1827 Professor an der Royal Institution in London. Zwei wissenschaftliche Entdeckungen FARADAYS waren für die weitere Entwicklung der Technik bedeutungsvoll.
1833 veröffentlichte er die Ergebnisse seiner Arbeiten über die Elektrolyse. FARADAY bewies die Gültigkeit des 1. Gesetzes mit einem „Voltameter". Das ist ein Wasserzersetzungsapparat, bei dem die entwickelten Gase aufgefangen und gemessen werden. Das 2. Gesetz wurde von ihm bei der Zersetzung von Zinn- und Bleiverbindungen erkannt und bewiesen.
Von größter Bedeutung ist die durch FARADAY begründete Lehre von den elektrischen und den magnetischen Feldern. Seine Entdeckung der elektromagnetischen Induktion bildete schließlich die Grundlage für die Entwicklung der Starkstromindustrie. Daneben hat FARADAY noch auf vielen anderen Gebieten der Physik und der Chemie gearbeitet und eine Reihe von wichtigen Beiträgen für die Forschung geleistet. Besonders hervorzuheben ist seine exakte, gründliche Arbeitsweise bei allen Versuchen und Überlegungen. So fanden seine wissenschaftlichen Veröffentlichungen bei seinen Fachkollegen schon zu seinen Lebzeiten in allen Ländern volle Anerkennung und Bewunderung.

Versuche, Fragen, Aufgaben

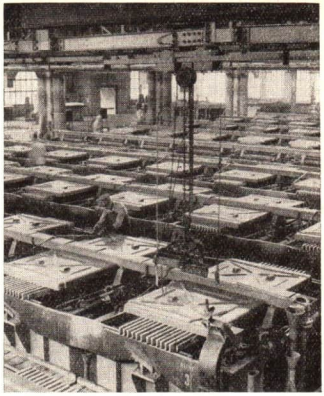
1. Füllen Sie ein Becherglas mit Wasser und hängen Sie zwei Kohlestifte aus einer alten Taschenlampenbatterie hinein! Schließen Sie die Stifte an eine Gleichspannungsquelle von 4,5 V (Taschenlampenbatterie) an und schalten Sie einen Strommesser oder eine Glühlampe in den Stromkreis! Setzen Sie langsam immer mehr von einer konzentrierten Säure, Lauge oder Salzlösung zu! (Vorsicht bei Schwefelsäure!)
   Beobachten Sie die Änderung der Stromstärke! Erklären Sie diese! Verändern Sie den Abstand der Kohlestifte voneinander!
   Nach welchem Gesetz ist die dabei auftretende Stromstärkeänderung zu erklären?
2. Vergleichen Sie die Leitfähigkeit von Metallen mit der Leitfähigkeit eines Elektrolyten! Legen Sie dazu zwischen zwei Holtzschen Fußklemmen einen Kupferdraht, einen Konstantandraht und einen mit Kochsalzlösung getränkten Bindfaden in einen Gleichstromkreis! Verwenden Sie dabei eine Gleichspannungsquelle von 4,5 V und zur Stromanzeige eine Glühlampe für 4 V! Zeichnen Sie ein Schaltbild des Versuchsaufbaus!
   Was müssen Sie verändern, wenn beim Einschalten des Stromkreises mit dem Bindfaden die Glühlampe nicht leuchtet?
3. Überlegen Sie, welche Gefahren für den Menschen aus der Leitfähigkeit des Wassers erwachsen können! Welche Schäden können in elektrischen Anlagen durch die Einwirkung des Wassers auftreten?
4. Wie dissoziieren folgende Verbindungen?
   HCl; H_2SO_4; $NaOH$; NH_4OH; $CaSO_4$; $AgNO_3$?
5. Tränken Sie einen weißen Fließpapierstreifen (20 mm · 50 mm) mit einer schwachen Kaliumpermanganatlösung und legen Sie diesen an den Rand einer Glasplatte! In der Mitte legen Sie quer darüber einen Fließpapierstreifen (5 mm · 25 mm), der mit einer starken Lösung von Kaliumpermanganat getränkt wurde! Zwei Verbindungsleitungen werden an eine Gleichspannungsquelle von 20 bis 40 V angeschlossen. Die freien Bananenstecker drücken Sie flach auf den Fließpapierstreifen im Abstand von etwa 10 mm vom Mittelstreifen!
   Beobachten Sie die Wanderung der $KMnO_4$-Ionen! Vertauschen Sie die Bananenstecker nach einiger Zeit!



4.2. Technische Anwendung der Elektrolyse

4.2.1. Elektrolytische Verfahren in der chemischen Industrie

Da eine elektrolytische Zersetzung in allen wäßrigen Lösungen von Säuren, Laugen und Salzen sowie in Schmelzen von Salzen und Hydroxiden auftritt, kann man sehr viele Stoffe im technischen Großverfahren aus ihren Verbindungen gewinnen. So werden Aluminium, Natrium und Kalium elektrolytisch gewonnen. Kupfer mit einem besonders hohen Reinheitsgrad von 99,97% Cu wird elektrolytisch hergestellt. Einzelheiten über diese und weitere Verfahren werden im Chemieunterricht betrachtet.

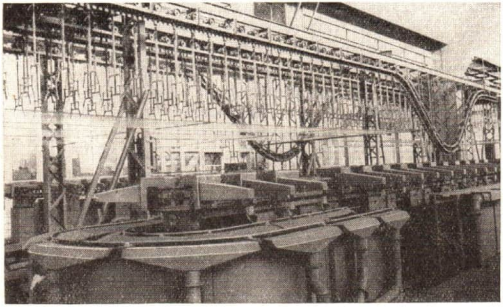


81/1 Elektrolytische Gewinnung von Blei

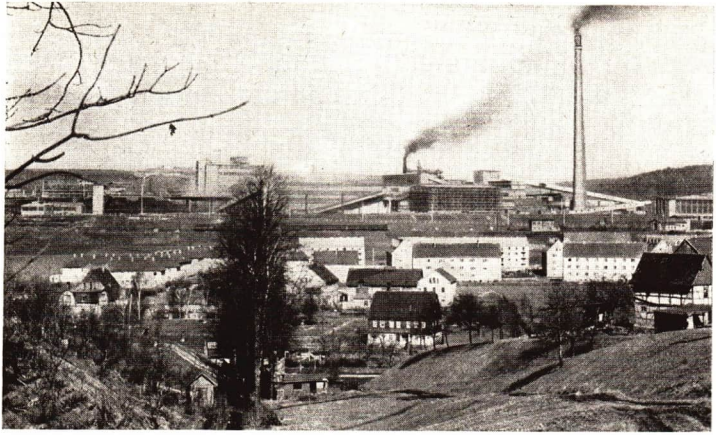
Für die Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik ist die chemische Industrie und ihr weiterer Ausbau nach dem Chemieprogramm besonders bedeutungsvoll. Wie hoch der Energiebedarf dieses Industriezweiges ist, das spiegelt sich in dem Anteil der chemischen Industrie am Gesamtverbrauch der Elektroenergie wider. Er beträgt etwa 31% und ist damit genauso groß wie der Bedarf der gesamten übrigen Industrie. Die metallverarbeitende Industrie benötigt nur 5,3% der erzeugten elektrischen Energie. Der Verbrauch in den Haushalten macht etwa 7% aus. Ein Teil der Energie wird in der chemischen Industrie allerdings nicht für die Elektrolyse, sondern für den Betrieb von Schmelzöfen (Kalziumkarbid) benötigt.

4.2.2. Galvanotechnik

Eine weitere technische Bedeutung hat die Elektrolyse für die Herstellung metallischer Überzüge zum Schutz leicht oxydierender Metalle. Das Vernickeln, Verchromen, Versilbern von Stahl und anderen Metallen wird elektrolytisch ausgeführt. Die Herstellung eines solchen Überzuges nennt man *Galvanostegie*.
In einem Behälter aus chemisch beständigem Material befindet sich die Lösung eines Salzes des Metalls, aus dem der Überzug hergestellt werden soll. Als Anoden werden Platten aus diesem Metall eingehängt. Als Katoden dienen die Werkstücke selber. Beim Einschalten des Stromes beginnt an den Werkstücken das Abscheiden des



81/2
Galvanisches Bad zum Verchromen von Kfz-Teilen



82/1 Nickelhütte St. Egidien

Metalls. Das aus der Lösung niedergeschlagene Metall wird ersetzt, indem von der Anodenplatte neues Metall in Lösung geht.
Die so erzeugten Überzüge können wesentlich dünner, gleichmäßiger und in beliebiger Schichtdicke aufgetragen werden als mit anderen Verfahren. Damit sie fest auf den Werkstücken haften, müssen diese sehr sorgfältig gereinigt und entfettet werden. Häufig werden mehrere Schichten verschiedener Metalle übereinander aufgebracht, zum Beispiel auf Stahl legt man eine Kupfer-, eine Nickel- und eine Chromschicht übereinander. Das Nickel hat nicht nur für die Galvanostegie, sondern auch für andere Metallveredelungsverfahren eine große Bedeutung.
Auf dem Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik befinden sich bei St. Egidien im Bezirk Karl-Marx-Stadt die größten Nickelerzlagerstätten Mittel- und Westeuropas. In den Jahren wirtschaftlicher Anstrengungen um eine störfreie Industrie wurde hier eine Nickelhütte aufgebaut, die jetzt einen wesentlichen Teil des Nickels für den Bedarf der sozialistischen Länder produziert (Bild 82/1).
Galvanoplastiken sind elektrolytisch hergestellte Abbildungen von Gegenständen. Das technologische Verfahren ähnelt der Galvanostegie. Nichtleitende Formstücke werden mit einer dünnen Graphitschicht überzogen, damit sie eine leitende Oberfläche bekommen. Die metallischen Überzüge im elektrolytischen Bad werden so dick ausgeführt, daß man sie von der Form abheben kann. Sie werden zur Verfestigung mit Blei hintergossen.
Das Verfahren der Galvanoplastik wird in der Druckereitechnik angewendet. Man fertigt von den gesetzten Druckstöcken zunächst Matrizen an. Das sind in Plast-

83/1 Herausnehmen einer Matrize mit Galvano aus dem Bad

platten geprägte Abdrücke des Druckstocks. Von diesen werden galvanoplastische Abzüge, *Galvanos*, hergestellt. Diese werden zum Drucken benutzt. Auch dieses Lehrbuch ist mit Galvanos gedruckt. Man kann von einem Druckstock mehrere Galvanos herstellen. Sie sind haltbarer als die verhältnismäßig weichen Bleiplatten und lassen sich für den Nachdruck eines Buches besser aufbewahren.

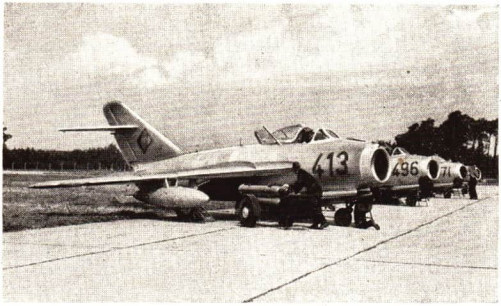
Zum Pressen von Schallplatten werden galvanoplastisch hergestellte Prägestempel benutzt.

Zur Oberflächenveredlung des Aluminiums ist das *Aloxyd-Verfahren* entwickelt worden (elektrochemisch oxydiertes Aluminium).

Man hängt die Werkstücke aus Aluminium als Anode in ein Säurebad.

Bei der Elektrolyse bildet sich auf der Oberfläche des Aluminiums eine dünne Oxidschicht, die fest mit dem Metall verbunden ist. Dadurch wird die Oberfläche gegen chemische Einwirkungen beständig. Da Aluminiumoxid ein sehr schlechter elektrischer Leiter ist, können Aluminiumdrähte durch das Verfahren mit einer Isolierschicht versehen werden.

Ein großer Vorteil des Aluminiums als Werkstoff ist seine geringe Dichte. Es wird durch Witterungseinflüsse aber stark zersetzt. Zum vollwertigen Werkstoff wird es erst durch Legieren oder durch den Aloxydoberflächenschutz. Tür- und Fensterbeschläge, Treppengeländer und Schaufensterfassungen werden aus solchem Aluminium gefertigt. Die Aloxydschicht kann gefärbt werden. Für den Flugzeugbau hat das elektrochemisch oxydierte Aluminium eine große Bedeutung erlangt.



83/2 Die Außenhaut moderner Flugzeuge besteht aus eloxierten Aluminiumblechen

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Wie kann man einen Kohlestab verkupfern? Führen Sie einen Versuch mit Hilfe einer Taschenlampenbatterie aus!
2. Im elektrischen Versorgungsnetz wird mit Wechselspannung gearbeitet. Warum kann man mit Wechselstrom keine Elektrolyse durchführen?
3. Bei der elektrolytischen Kupfergewinnung tritt als Nebenvorgang ein Zersetzen von Wasser in Knallgas auf.
   Bei einer Stromstärke von 50 A werden während einer Stunde 56 g Kupfer abgeschieden. Wieviel Prozent der Stromstärke dienen der Kupferabscheidung?
4. Wie groß ist der Energieaufwand für die Gewinnung von 1 kg Aluminium (Betriebsspannung 7 V, Stromausbeute 80%)?
   Wie groß ist die Jahresproduktion eines Aluminiumwerkes bei Dauerbetrieb mit einer Leistung von 3000 kW?
5. Wie lange dauert das Abscheiden von 1 g Silber aus einer Silbernitratlösung bei einer Stromstärke von 200 mA? Welche Elektrizitätsmenge wird dabei transportiert?
6. Erklären Sie Faradays Versuchsanordnung (Bild 76/2) und das zu erwartende Ergebnis!
7. Suchen Sie nach Bauteilen aus eloxiertem Aluminium!

Zusammenfassung

1. **In wäßrigen Lösungen von Säuren, Hydroxiden und Salzen treten durch Dissoziation Ionen auf.**

   Welche Ladungen tragen die verschiedenen Ionen?

2. **Durch die Kraftwirkungen im elektrischen Feld entsteht in einem Elektrolyten ein Ionenstrom in beiden Richtungen.**

   Wie erfolgt die Bewegung der Elektronen in einem Stromkreis, in dem sich eine elektrolytische Zelle befindet?

3. **Als Folge der Wanderung und der Entladung der Ionen tritt ein Zersetzen der Stoffe im Elektrolyten ein.**

   Welche Stoffe werden bei der Elektrolyse an der Katode beziehungsweise der Anode abgeschieden?
   Welche Gesetze gelten für die Elektrolyse?

4. **Die Elektrolyse ist technisch bedeutungsvoll für die Gewinnung von Metallen und chemischen Grundstoffen, für die Galvanostegie und die Galvanoplastik.**

   Stellen Sie die Ihnen bekannten technologischen Verfahren in einer Übersicht zusammen!

5. Die chemischen Spannungsquellen

Der VEB Berliner Akkumulatoren- und Elementefabrik ist der größte Betrieb unserer Republik für die Herstellung von elektrischen Batterien. Es werden hier Batterien für verschiedene Taschenlampen, für Koffer-Rundfunkempfänger und andere Zwecke produziert.
Die Gitterplatten als Hauptbestandteil dieser Batterien und Akkumulatoren werden in einer Gießmaschine geformt. Daran anschließend werden die Platten mit einer Bleisulfatmasse gefüllt.

5.1. Galvanische Elemente

5.1.1. Die Entdeckung des galvanischen Elementes

Zwei Forschern, den italienischen Wissenschaftlern Luigi Galvani (1737 bis 1798) und Alessandro Volta (1745 bis 1827), gelangen die ersten bahnbrechenden Entdeckungen auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre.
Galvani beobachtete bei wissenschaftlichen Studien, daß die Muskeln von Froschschenkeln zuckten, wenn sie ein Eisengitter berührten, an dem er sie mit Kupfer-

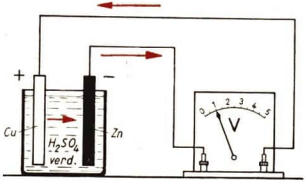
85/1 (links)
Luigi Galvani
85/2 (rechts)
Alessandro Volta

drähten aufgehängt hatte. Er nahm zunächst an, daß den tierischen Körpern eine besondere tierische Elektrizität innewohne, die durch Metalle abgeleitet würde. VOLTA wiederholte diese Versuche und stellte erstmals fest, daß die Elektrizität zwischen zwei Metallen entsteht, mit denen man die Froschschenkel gleichzeitig berührt. Auf Grund dieser Erkenntnis konstruierte VOLTA die ersten brauchbaren Spannungsquellen. Man konnte ihnen jederzeit eine elektrische Energie entnehmen, um so die elektrischen Vorgänge weiter zu erforschen. In der *Voltaschen Säule* sind Kupfer- und Zinkplatten übereinandergeschichtet, zwischen denen Pappscheiben liegen, die mit einem Elektrolyten getränkt sind. Alle Spannungsquellen, in denen durch chemische Vorgänge eine Spannung entsteht, nennt man *galvanische Elemente*.

5.1.2. Das Zink-Kupfer-Element

Folgender Versuch zeigt die Wirkungsweise der Voltaschen Säule im Prinzip.

Taucht man eine Zink- und eine Kupferplatte in verdünnte Schwefelsäure, so besteht zwischen den beiden Platten eine Spannung von etwa 1 V. Diese Spannung verursacht in einem Stromkreis einen Gleichstrom. Die Zinkplatte bildet den Minuspol, die Kupferplatte den Pluspol des Zink-Kupfer-Elementes.



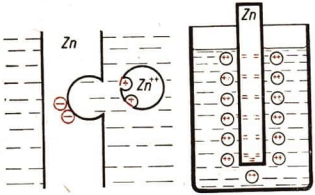
86/1 Zink-Kupfer-Element

Auch zwischen anderen verschiedenen Metallen oder anderen leitenden Stoffen bestehen in einem Elektrolyten elektrische Spannungen.

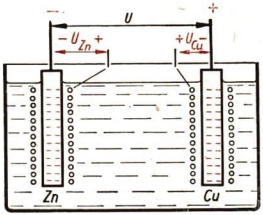
Galvanische Elemente sind chemische Spannungsquellen. Sie bestehen aus zwei verschiedenartigen, leitenden Stoffen und einem Elektrolyten.

5.1.3. Entstehen der Spannung im galvanischen Element

Der deutsche Physiker WALTER NERNST (1864 bis 1941) hat die Ursache für das Entstehen der Spannung im galvanischen Element genauer untersucht.
Taucht man eine Platte aus chemisch reinem Zink in verdünnte Schwefelsäure, so gehen aus dem Zink positive Zinkionen in Lösung. Die Elektronen dieser Zinkionen bleiben auf der Zinkplatte und laden sie negativ. Zwischen der negativen Zinkplatte und den positiven Zinkionen bestehen elektrostatische Anziehungskräfte. Diese wirken den Lösungsvorgängen entgegen und führen dazu, daß sich die Ionen nur bis zu einem bestimmten Abstand von der Platte entfernen können. So entsteht zwischen der Zinkplatte und den Zinkionen eine *elektrische Doppelschicht*. Zwischen der Zinkplatte und der Ionenschicht besteht eine bestimmte elektrische Spannung. In entsprechender Weise bilden sich immer Doppelschichten, wenn eine Metallplatte in einen Elektrolyten eintaucht. Die Spannungen der Doppelschichten sind bei den verschiedenen Metallen unterschiedlich. Man kann die Spannung einer



87/1 Schematische Darstellung der Entstehung einer elektrischen Doppelschicht beim Eintauchen von Zink in verdünnte Schwefelsäure. Es bilden sich positive Zink-Ionen.



87/2 Beim Eintauchen von zwei verschiedenen Metallplatten besteht zwischen ihnen die Differenz der Spannungen an den Doppelschichten $U = U_{Zn} - U_{Cu}$

Doppelschicht nicht direkt messen, weil dazu eine zweite Elektrode in den Elektrolyten getaucht werden müßte, an der auch eine Doppelschicht entsteht. Ist diese zweite Platte aus dem gleichen Metall, so sind die Spannungen der beiden Doppelschichten entgegengesetzt gleich groß und heben sich auf. Benutzt man für die zweite Platte ein anderes Material, dann mißt man mit dem Spannungsmesser die Differenz der beiden Spannungen an den Doppelschichten.

5.1.4. Die galvanische Spannungsreihe

Um Vergleichsmöglichkeiten zu haben, ist es üblich, als zweite Elektrode die **Wasserstoffnormalelektrode** zu verwenden. Sie besteht aus Platinblech, das in einer Säure mit bestimmter Konzentration von Wasserstoff umspült wird.

—	K	Na	Al	Zn	Fe	Pb	H	Cu	Ag	Hg	Cl	Au	Pt	+
	2,92	2,71	1,69	0,76	0,44	0,13	0,0	0,34	0,81	0,86	1,36	1,38	1,6	

87/3 Galvanische Spannungsreihe mit Angabe der Spannung gegenüber der Wasserstoffnormalelektrode

Im Bild 87/3 sind die Spannungen zusammengestellt, die zwischen einigen Elektroden und der Wasserstoffnormalelektrode bestehen. Sie ergeben sich als Differenz der Spannung U_H an der Doppelschicht der Wasserstoffnormalelektrode und der Spannung U_M an der Doppelschicht der Elektrode aus einem anderen leitenden Material:

$$U = U_H - U_M .$$

Bei negativem Vorzeichen der Spannung ist $U_M > U_H$, bei positivem Vorzeichen ist $U_M < U_H$. So gibt das Vorzeichen die Polarität der verschiedenen Elektroden gegenüber der Wasserstoffnormalelektrode an.

Die Ordnung der Stoffe nach ihrer Spannung gegenüber der Wasserstoffnormalelektrode bezeichnet man als **elektrochemische** oder **galvanische Spannungsreihe.** Stellt man ein galvanisches Element aus zwei verschiedenen Elektroden zusammen, so ergibt sich die Spannung aus der Differenz der beiden Spannungen gegenüber der Wasserstoffnormalelektrode. Der in der Spannungsreihe weiter links stehende Stoff ergibt den Minuspol, der andere Stoff den Pluspol des Elementes. Die berechneten Spannungen gelten in einer bestimmten Säurelösung, bei anderen Elektrolyten in anderer Konzentration weichen sie von diesen Werten ab.

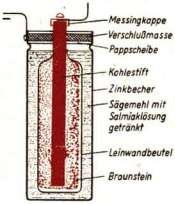
Beispiele

Stoffe des Elementes und Polarität		Spannung (in Volt)
Pb(+)	Zn(−)	(−0,13) − (−0,76) = 0,63
Cu(+)	Zn(−)	(+0,34) − (−0,76) = 1,1
Ag(+)	Cu(−)	(+0,81) − (+0,34) = 0,47

Es ist also möglich, daß derselbe Stoff, zum Beispiel Kupfer, einmal den Pluspol und in einer anderen Zusammenstellung den Minuspol des Elementes bildet. Die Eigenschaft, Minuspol oder Pluspol in einem Element zu sein, hängt nicht allein von der einen Elektrode ab. Man muß stets den Zusammenhang beachten, der zwischen dieser Elektrode und der Gegenelektrode besteht. Der Zusammenhang zwischen einem Ding und seiner Umwelt ist von entscheidender Bedeutung. Das ist ein allgemein gültiger Grundsatz.

5.1.5. Das Zink-Kohle-Element

Unter den vielen möglichen galvanischen Elementen aus verschiedenen Stoffen wird in der Praxis am häufigsten das Zink-Kohle-Element verwendet.



88/1 Schnittzeichnung eines Elementes einer Taschenlampenbatterie

Die meisten Taschenlampenbatterien enthalten Zink-Kohle-Elemente.

Im Bild 88/1 ist der Aufbau eines solchen Elementes im Schnitt gezeigt. Die Spannung beträgt etwa 1,5 V. Da der Elektrolyt eingedickt ist, spricht man von Trockenelementen.

Bei einer Stromentnahme entsteht durch elektrolytische Vorgänge Wasserstoff, der sich entsprechend der Stromrichtung im Inneren des Elementes am Kohlestab abscheidet. So würde der Zinkelektrode eine Wasserstoffelektrode gegenüberstehen. Die Spannung wäre kleiner, und der Widerstand würde durch den Wasserstoff erheblich steigen. Durch eine Braunsteinumhüllung wird diese störende Einwirkung des Wasserstoffs verhindert. Braunstein gibt Stauerstoff ab, der sich mit dem Wasserstoff zu Wasser verbindet. Dadurch wird

gleichzeitig die Feuchtigkeit in dem Element erhalten. Während des Stromflusses geht der Zinkbecher allmählich in Lösung, bis er porös wird. Unter dem Einfluß der dann eindringenden Luft verdunstet das Lösungsmittel, und das Element wird unbrauchbar.

5.1.6. Die elektrolytische Korrosion

In der Technik kann es an vielen Stellen zu einer unerwünschten Bildung von galvanischen Elementen kommen. Diese Materialzerstörung bezeichnet man als *elektrolytische Korrosion.*
Das tritt immer ein, wenn Bauteile aus verschiedenen Metallen miteinander verbunden werden und dem Einfluß eines Elektrolyten ausgesetzt sind.

Beispiel

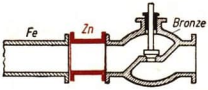
Wenn in ein stählernes Wasserleitungsrohr ein Messinghahn eingesetzt wird, entsteht ein galvanisches Element. Zwischen dem gußeisernen Zylinderblock und der stählernen Zylinderbuchse eines wassergekühlten Motors bildet sich unter dem Einfluß des Kühlwassers ebenfalls ein galvanisches Element. Durch die Berührung der Metalle sind diese Elemente kurzgeschlossen. Das Material des Minuspols löst sich daher allmählich auf. Das sind nach der galvanischen Spannungsreihe der Stahl der Wasserleitung und der Zylinderbuchse. Besonders auf Schiffen, wo das salzhaltige Seewasser zu Kühlzwecken benutzt wird, können schon nach kurzer Zeit erhebliche Schäden eintreten. Auch der stählerne Schiffsrumpf und eine Schiffsschraube aus Bronze bilden ein galvanisches Element. Welcher Teil wird dabei durch die Korrosion angegriffen?

● *Überlegen Sie, wie es sich auswirken würde, wenn man eine Aluminiumkonstruktion durch Stahlniete verbindet!*

Am Beispiel des Zink-Kohle-Elementes wurde gezeigt, wie man die Gesetzmäßigkeiten der galvanischen Spannungsreihe technisch sinnvoll zum Vorteil der Menschen ausnutzen kann. Die elektrolytische Korrosion erfolgt nach den gleichen Naturgesetzen. Hier muß man sich aber Gedanken darüber machen, wie man ihren störenden Einfluß beseitigen kann.

Beispiel

Um die Korrosion zu verhindern, werden die Wandungen der Rohre und Kühlräume mit einem Ölschutzfilm überzogen. Außerdem setzt man an den gefährdeten Stellen Zinkschutzstücke ein. Dann bilden sich galvanische Elemente zwischen dem Zink und den anderen Metallen. Dabei wird zuerst das Zink aufgelöst. Die Zinkstücke müssen häufig ersetzt werden. Diese Methode wird auch zum Schutz der Dampfkessel und der Armaturen angewendet.

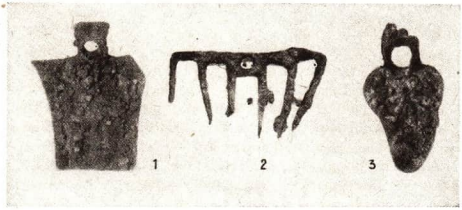


89/1 Zinkschutzstück in einer Seewasserleitung

Die elektrolytische Korrosion kann aber noch in einer anderen Form auftreten. Im Kristallgefüge des Stahls und der Metallegierungen liegen Kristallkomplexe aus unterschiedlichen Stoffen dicht nebeneinander. Mit einem Elektrolyten bilden sich hier winzig kleine *Lokalelemente.*

Beispiel

Derartige Vorgänge treten leicht in legierten Stählen auf. Durch die elektrolytische Korrosion in den Lokalelementen gehen hier Eisenionen in Lösung. Das kann bei Dampfkesseln unter Betriebsbedingungen zur Zerstörung der Kesselwandung führen. Als Schutzmaßnahme setzt man dem Kesselspeisewasser Trinatriumphosphat zu. Dadurch überzieht sich das Kesselinnere mit einer dichten Schicht von schwarzem Eisenphosphat. So wird die Bildung von Lokalelementen verhindert.
Auch an Metallegierungen, die der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind, tritt eine Korrosion durch Lokalelemente ein. Man verhindert sie durch Farbanstriche oder eine andere Oberflächenbehandlung.



90/1 Korrodierte Feldbaugeräte, die bei Ausgrabungen in Pompeji gefunden wurden (1 Spaten, 2 Rechen, 3 Hacke).

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Stellen Sie in einer stark verdünnten Schwefelsäure verschiedene galvanische Elemente zusammen, prüfen Sie die Polarität und messen Sie die Spannungen! Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der elektrochemischen Spannungsreihe!
2. Führen Sie einen Versuch durch, wonach sie das Aluminium in die elektrochemische Spannungsreihe einreihen können!
3. Schrauben Sie auf zwei Stahlschrauben je eine Messingmutter! Legen Sie diese Schrauben in zwei Gefäße mit Kochsalzlösung! In das eine Gefäß legen Sie unter den Schraubenkopf ein Stückchen Zinkblech aus einer alten Taschenlampenbatterie. Beobachten Sie die Veränderungen etwa 14 Tage lang und erklären Sie diese!
4. Zerlegen Sie verschiedene Batterien (Taschenlampenbatterie, IKA-Klein-Akku, Sternchenbatterie 9 V oder Batterie für Schwerhörigenapparate)! Skizzieren Sie ihren Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise!

5.2. Der Akkumulator

5.2.1. Elektrochemische Energieumwandlung

Aus dem Chemieunterricht ist bekannt, daß chemisch gebundene (latente) Energie frei werden kann, wenn sich Stoffe miteinander verbinden. Das ist bei allen Oxydationen der Fall. Die Energie wird in Form von Wärme- oder Lichtenergie frei. Das tritt bei der Verbrennung besonders deutlich in Erscheinung.

Ein ähnlicher Vorgang spielt sich im galvanischen Element ab.

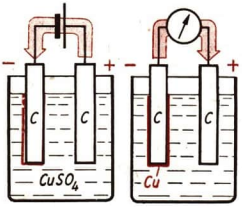
In galvanischen Elementen wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Das Metall der negativen Elektrode geht in Lösung und bildet mit dem Elektrolyten eine chemische Verbindung. Im Zink-Kohle-Element bildet sich zum Beispiel Zinkchlorid. Durch diese Vorgänge wird elektrische Energie frei.
Bei der Elektrolyse läuft die Energieumwandlung in entgegengesetzter Richtung ab. Es werden chemische Verbindungen im Elektrolyten zerlegt. Dabei geht elektrische Energie in chemische Energie über.

Bei der Elektrolyse wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt.

Ein Versuch zeigt die wechselseitige Umwandlung von elektrischer und chemischer Energie:

In einer Kupfersulfatlösung mit zwei Kohlestiften als Elektroden erfolgt eine Elektrolyse. Die Katode überzieht sich mit einer Kupferschicht. Beim Zerlegen der Verbindung $CuSO_4$ wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt.
Die Spannungsquelle wird abgeklemmt. In dem Elektrolyten Kupfersulfat besteht jetzt zwischen dem reinen und dem kupferüberzogenen Kohlestift eine Spannung.
Das Kupfer bildet den Minuspol. Schließt man über ein Strommeßgerät den Stromkreis, so fließt ein Strom. Die latente chemische Energie wird in elektrische Energie zurückverwandelt. Dabei geht das Kupfer wieder in die Verbindung (Kupfersulfat) über.



91/1
a) Umwandlung elektrischer Energie bei der Elektrolyse von Kupfersulfat
b) Rückgewinnung der elektrischen Energie in dem entstandenen Kupfer-Kohle-Element

Demnach kann festgestellt werden:

Bei allen elektrochemischen Vorgängen gilt der Satz von der Erhaltung der Energie.

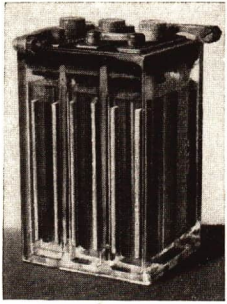
5.2.2. Der Bleiakkumulator

Die wechselseitige Umwandlung von elektrischer und chemischer Energie wird in *Akkumulatoren* technisch ausgewertet.

Akkumulatoren sind galvanische Elemente, in denen elektrische Energie durch Umwandlung in chemische Energie gespeichert wird.

In der Technik haben sich Akkumulatoren besonders bewährt, in denen die elektrochemischen Vorgänge zwischen Blei, Bleiverbindungen und Schwefelsäure ablaufen. Bleiakkumulatoren bestehen aus einem säurefesten Glas- oder Plastgefäß, in dem

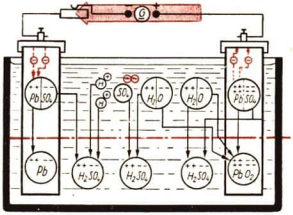
sich verdünnte Schwefelsäure befindet. In die Säure sind zwei Plattengruppen eingetaucht.
Da die chemische Reaktion an der Oberfläche der Elektrode stattfindet und die umgesetzte Elektrizitätsmenge von der Masse der Elektrode abhängt, wählt man für die Platten eine Gitterform. In den Bleigittern befindet sich im entladenen Zustand eine Bleisulfatmasse. Diese Masse ist sehr porös und vergrößert somit ebenfalls die wirksame Oberfläche der Elektrode.



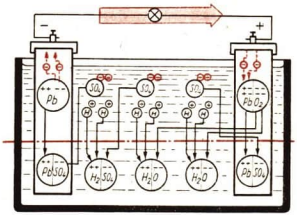
92/1 Bleiakkumulator

5.2.3. Laden und Entladen

Zum *Laden* wird der Akkumulator an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Die positiven Platten müssen dabei am Pluspol und die negativen Platten am Minuspol der Spannungsquelle liegen. Die Ladestromstärke wird mit einem Strommesser überwacht. Sie ist für jeden Akkumulator der Plattengröße entsprechend festgelegt und beträgt 1 bis 2 A. Die Spannung einer Akkumulatorenzelle beträgt im frisch geladenen Zustand etwa 2,4 V.
Beim *Entladen* hält die Zelle längere Zeit eine Spannung von etwa 2 V. Dann beginnt die Spannung merklich abzufallen. Ist sie auf 1,8 V gesunken, so muß der Akkumulator neu geladen werden.



92/2 Schematische Darstellung der Vorgänge im Bleiakkumulator bei der Ladung
Die negative Platte geht von Bleisulfat in reines Blei über. An der positiven Platte bildet sich aus Bleisulfat Bleioxid. Der Säurerest des Bleisulfats verbindet sich mit Wasserstoff aus dem Wasser zu Schwefelsäure. Bei der Ladung steigt die Konzentration der Säure



92/3 Schematische Darstellung der Vorgänge im Bleiakkumulator bei der Entladung
Das Blei der negativen Platte und das Bleioxid der positiven Platte gehen wieder eine Verbindung mit dem Säurerest der Schwefelsäure zu Bleisulfat ein. Außerdem entsteht dabei Wasser. Die Konzentration der Säure nimmt bei der Entladung ab

5.2.4. Wartung von Akkumulatoren

Alle Akkumulatoren müssen sorgfältig gepflegt werden, damit sie lange gebrauchsfähig bleiben. Zu starke Lade- und Entladeströme beschädigen die Platten, weil sich die poröse Masse aus dem Gitter herauslöst. Es bildet sich Bodenschlamm, der die Platten schließlich berührt und kurzschließt. Das führt zur Entladung des Akkumulators.
Infolge der Verdunstung nimmt der Wassergehalt der verdünnten Schwefelsäure allmählich ab. Das Wasser darf nur durch destilliertes Wasser ersetzt werden. Aus Leitungswasser würden sich Salze auf den Platten ablagern und die chemischen Vorgänge behindern. Aus dem gleichen Grunde darf nur chemisch reine Schwefelsäure verwendet werden.
Die Dichte der Säure gibt Aufschluß über den Ladungszustand des Akkumulators. Sie wird in einem Säureprüfer mit einem kleinen Aräometer gemessen.

Dichte der Säure im geladenen Akkumulator:
1,24 bis 1,25 g/cm³.
Dichte der Säure im entladenen Akkumulator:
1,17 bis 1,18 g/cm³.

Gegen Ende des Ladevorganges setzt eine starke Entwicklung von Wasserstoff und Sauerstoff an den Platten des Akkumulators ein. Deshalb besteht in Ladestationen Explosionsgefahr. Der Umgang mit offener Flamme ist hier verboten. Unbenutzte Bleiakkumulatoren müssen etwa monatlich nachgeladen werden.

5.2.5. Kapazität und Wirkungsgrad von Akkumulatoren

Das Produkt aus durchschnittlicher Ladestromstärke und Ladezeit ergibt die aufgenommene Elektrizitätsmenge. Man mißt die Elektrizitätsmenge in Amperestunden (Ah) und bezeichnet sie als die Kapazität[1] des Akkumulators. Die vom Akkumulator bei der Entladung abgegebene Elektrizitätsmenge ergibt sich entsprechend als Produkt aus Entladestromstärke und Entladungszeit. Die abgegebene Elektrizitätsmenge ist immer kleiner als die aufgenommene Elektrizitätsmenge, da ein Teil der chemischen Zersetzungsprodukte, Wasserstoff und Sauerstoff, bei der Ladung aus dem Akkumulator entweicht.
Das Verhältnis der abgegebenen Elektrizitätsmenge zu aufgenommener Elektrizitätsmenge bezeichnet man als **Ah-Wirkungsgrad.**

$$\boxed{\eta_{Ah} = \frac{\textbf{beim Entladen entnommene Elektrizitätsmenge}}{\textbf{beim Laden zugeführte Elektrizitätsmenge}}} \qquad (22.1)$$

In ähnlicher Weise kann man auch die aufgenommene und die abgegebene elektrische Energie in Wattstunden (Wh) berechnen. Die Elektrizitätsmengen sind mit der Spannung während der Ladung und der Entladung zu multiplizieren.

[1] Die Kapazität des Akkumulators ist nicht die Kapazität des Kondensators

Das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Energie bezeichnet man als **Wh-Wirkungsgrad.**

$$\eta_{Wh} = \frac{\text{beim Entladen entnommene Energie}}{\text{beim Laden zugeführte Energie}} \tag{22.2}$$

Die Energieverluste im Akkumulator sind größer als die Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener Elektrizitätsmenge. Bei der Ladung und der Entladung verwandelt sich ein Teil der Bewegungsenergie der Elektronen in Wärmeenergie des Elektrolyten.

5.2.6. Elektrische Batterien

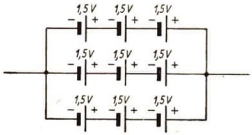
Die chemischen Spannungsquellen, Akkumulatoren und galvanische Elemente, liefern niedrige Gleichspannungen von 1 bis 2 V. Um höhere Spannungen zu erhalten, werden mehrere Akkumulatorzellen oder Elemente zu einer Batterie zusammengeschaltet.

Beispiel

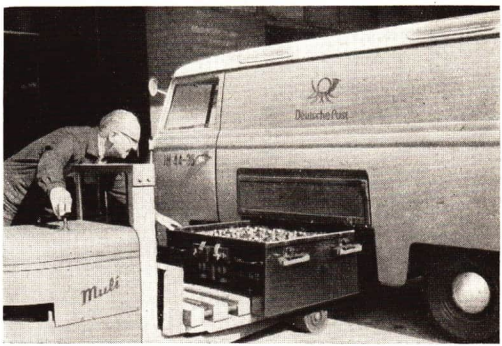
In den flachen *Taschenlampenbatterien* sind drei Elemente in Reihe geschaltet. Die Spannungen der einzelnen Elemente addieren sich zu der Gesamtspannung der Batterie von 4,5 V.
In einer *Akkumulatorenbatterie* sind die Zellen durch Bleibrücken hintereinander geschaltet. Diese liegen über der Vergußmasse und verbinden immer den Pluspol der einen Zelle mit dem Minuspol der folgenden Zelle. Die Reihenschaltung von sechs Akkumulatorenzellen liefert eine Spannung von etwa 12 V.
Man kann auch mehrere Elemente oder Akkumulatorenzellen parallelschalten. Eine solche Batterie hat die gleiche Spannung wie ein Einzelelement. Man kann ihr aber eine größere Stromstärke als dem Einzelelement entnehmen, da sich die Gesamtstromstärke des angeschlossenen Stromkreises auf die parallelgeschalteten Spannungsquellen verteilt. In größeren Batterien sind mehrere Gruppen von hintereinandergeschalteten Elementen oder Zellen parallelgeschaltet.
In dieser *Gruppenschaltung* erhält man höhere Spannungen und Stromstärken, als das Einzelelement sie liefert.

94/1 12-V-Akkumulatorenbatterie für Kraftfahrzeuge

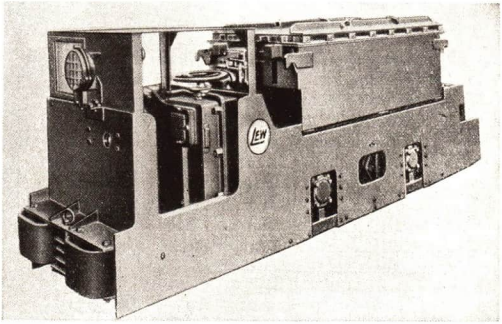
94/2 Gruppenschaltung von Elementen



95/1 Auswechseln der Batterie an einem Paketwagen der Deutschen Post

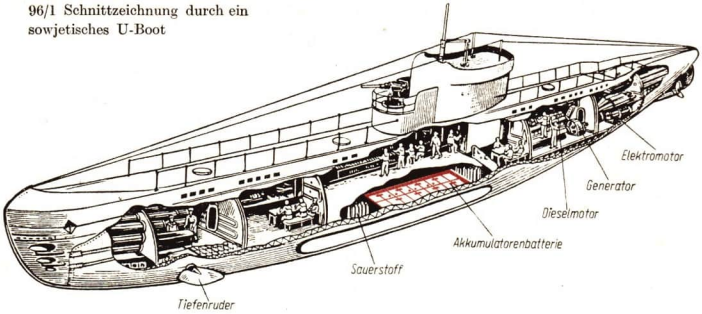


Akkumulatorenbatterien werden vielseitig verwendet. Sie werden überall dort eingesetzt, wo bei einem Ausfall im öffentlichen Elektrizitätsnetz keine Unterbrechung der Energieversorgung eintreten darf. In Krankenhäusern, Kinos, Theatern übernehmen leistungsfähige Akkumulatorenbatterien die Notversorgung. In vielen Fällen sind automatische Schalter eingebaut, die den Notstrom sofort einschalten, wenn die Netzspannung ausfällt. Für Fernsprech- und Uhrenanlagen wird die Betriebsspannung meist Akkumulatorenbatterien entnommen. Diese sind über Gleichrichter an das Netz angeschlossen und werden automatisch immer wieder aufgeladen.
Für viele Fahrzeuge liefern Akkumulatorenbatterien die Energie zum Antrieb. Auf großen Bahnhöfen werden Pakete und Gepäckstücke mit Elektrokarren befördert. Auch Grubenlokomotiven und Paketwagen der Deutschen Post sind mit Akkumulatorenbatterien ausgerüstet. Diese Fahrzeuge haben entweder auswechselbare Batterien, von denen sich eine immer in der Ladestation befindet, oder ihre Batterien werden nachts bei Betriebsruhe geladen.
Moderne Unterseebote mit weitreichendem Aktionsradius werden während der Über- und Unterwasserfahrt von Dampfturbinen angetrieben. Die Energie des Dampfes wird aus Atomreaktoren gewonnen. Kleinere U-Boote sind auch heute noch mit dem herkömmlichen dieselelektrischen

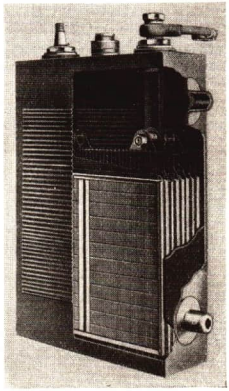


95/2- Elektrische Grubenlok

96/1 Schnittzeichnung durch ein sowjetisches U-Boot



Antrieb ausgerüstet. Dieselmotoren treiben das Boot bei Überwasserfahrt an. Sie können auch noch laufen, wenn das Boot dicht unter der Wasseroberfläche fährt. Die Frischluft wird durch ein langes ausfahrbares Rohr von der Wasseroberfläche angesaugt und die Auspuffgase werden durch ein zweites Rohr dorthin geleitet. Die Dieselmotoren können während der Fahrt große Gleichstromgeneratoren antreiben. Mit dem erzeugten Gleichstrom werden die Zellen einer sehr leistungsfähigen Batterie von Bleiakkumulatoren aufgeladen. Zur Unterwasserfahrt werden die Generatoren zu Elektromotoren umgeschaltet und entnehmen die Antriebsenergie der Batterie. Neben modernsten Atom-U-Booten unterhalten die sowjetischen Seestreitkräfte eine große Zahl dieselelektrisch angetriebener U-Boote. Sie geben im Verein mit den übrigen Streitkräften der Sowjetarmee die beste Gewähr für die Sicherung des Friedens. Die Sowjetunion hat vor kurzem erstmalig in der Geschichte der internationalen Seefahrt ein Unterseeboot mit dieselelektrischem Antrieb für rein friedliche Forschungszwecke gebaut. Es soll besonders der Forschung für die Hochseefischerei dienen.



96/2 Stahlakkumulator

5.2.7. Stahlakkumulatoren

Neben den Bleiakkumulatoren gibt es noch eine zweite Gruppe von Akkumulatoren. Bei ihnen läuft die chemische Umsetzung zwischen Nickel- und Kadmiumverbindungen oder zwischen Nickel- und Eisenverbindungen ab. Das Gehäuse beider Akkumulatoren besteht aus Stahlblech. Als Elektrolyt dient Kalilauge. Das Gehäuse und die Plattengerüste, die mit den aktiven Verbindungen gefüllt sind, werden aus Stahlblech hergestellt. Stahlakkumulatoren sind gegenüber mechanischen und

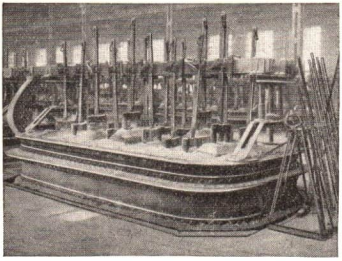
elektrischen Beanspruchungen unempfindlicher als Bleiakkumulatoren. Die Höchstspannung liegt mit 1,25 V niedriger als beim Bleiakkumulator.

Stahlakkumulatoren dürfen keinesfalls mit Schwefelsäure gefüllt werden.

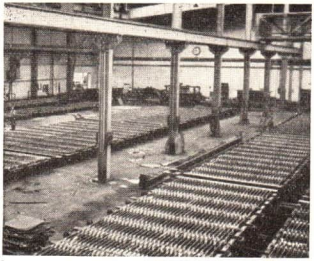
Bleisammler	Nickel-Kadmium-Sammler
1. Vorteile: Billig in der Herstellung, höhere Zellenspannung, höherer Wirkungsgrad.	1. Vorteile: Hohe Lebensdauer, kann trocken aufbewahrt werden, kann überlastet werden, kann überladen werden, ist unempfindlich gegen mechanische Beanspruchung, niedriges Gewicht je Zelle, kann entladen aufbewahrt werden.
2. Nachteile: Geringere Lebensdauer, stoß- und schlagempfindlich, darf nicht überlastet werden, darf nicht trocken stehen, muß ständig geladen sein, großes Gewicht je Zelle.	2. Nachteile: Teuer in der Herstellung, niedrigere Zellenspannung, niedrigerer Wirkungsgrad.
Füllung: $H_2SO_4 + H_2O$ $\eta_{Ah} \approx 0{,}95$ bis $0{,}98$ $\eta_{Wh} \approx 0{,}79$ bis $0{,}81$	Füllung: $KOH + H_2O$ $\eta_{Ah} \approx 0{,}75$ $\eta_{Wh} \approx 0{,}56$

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Hängen Sie in ein Becherglas mit verdünnter Schwefelsäure zwei Streifen Bleiblech! Schließen Sie diese Platten an eine Gleichspannungsquelle an! Beobachten Sie die Vorgänge und die Veränderungen der Platten! Nach etwa 5 Minuten klemmen Sie die Spannungsquelle ab und schließen Sie an die Platten einen Spannungsmesser oder eine Kleinspannungsglühlampe an! Erklären Sie die Vorgänge!
2. Erklären Sie, wie sich die Konzentration der Säure beim Laden und Entladen eines Akkumulators ändert!
3. Suchen Sie eine Akku-Ladestation auf! Untersuchen Sie hier:
   3.1. Wie ist festzustellen, daß ein Akkumulator geladen werden muß?
   3.2. Wie wird festgestellt, daß ein Akkumulator geladen ist?
   3.3. Warum ist der Umgang mit offenem Feuer und das Rauchen in einer Akku-Ladestation verboten?
   3.4. Wie wird die Säuredichte bestimmt?
   3.5. Was gehört alles zu einer sorgfältigen Wartung eines Akkumulators?
   3.6. Welche Mängel treten an Akkumulatoren auf, und wie erkennt man deren Ursachen?



1



2

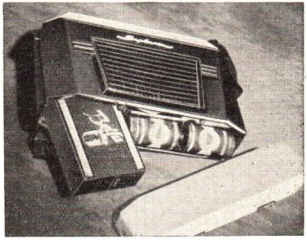
4. Geben Sie mit Hilfe der Bilder eine Übersicht über die technische Bedeutung der elektrochemischen Vorgänge!

Rohstoffgewinnung	98/1 Schmelzflußelektrolyse des Aluminiums 98/2 Gewinnung von Elektrolytkupfer
Galvanostegie und Galvanoplastik	98/3 Anlage zum Verchromen von Schrauben und Muttern
Galvanische Elemente	98/4 Trockenrasierapparat mit Monozelle als Energiequelle 98/5 Batterie in einem Kofferradio

3

4

5



5. Ein Akkumulator hat eine Ladekapazität von 27 Ah.
5.1. Wie lange muß er geladen werden, wenn ein durchschnittlicher Ladestrom von 1,2 A fließt?
5.2. Wie lange kann der geladene Akkumulator einen Strom mit einer Stromstärke von 0,4 A liefern, wenn sein Ah-Wirkungsgrad 0,89 beträgt?

6. Welche elektrische Energie mußte einem Akkumulator zugeführt werden, wenn er bei 1,6 V Entladespannung 14 Stunden lang eine Stromstärke von 3,5 A abgibt (Wh-Wirkungsgrad 0,7)?

7. Vergleichen Sie die Kapazität des Akkumulators mit der Kapazität des Kondensators!

8. Erläutern Sie, welche Schäden und Unfälle durch das Ablegen von Werkzeugen auf Akkumulatoren entstehen können. (Bild 99/1)!

99/1

Zusammenfassung

1. Galvanische Elemente sind chemische Spannungsquellen.

Aus welchen Teilen ist jedes galvanische Element zusammengesetzt?

2. In der galvanischen Spannungsreihe sind die Stoffe entsprechend ihren elektrochemischen Eigenschaften zusammengestellt.

Erläutern Sie den Aufbau dieser Reihe!

3. Nur wenige galvanische Elemente haben in der Technik Bedeutung erlangt.

Fertigen Sie eine tabellarische Übersicht dieser Elemente an, in der Sie die Stoffe zusammenstellen, die jeweils den Plus- oder Minuspol bilden!

4. Die elektrolytische Korrosion kann für die Volkswirtschaft zu großem Schaden führen.

Welche Formen der elektrolytischen Korrosion müssen in der Technik beachtet werden? Welche Schutzmaßnahmen kann man dagegen ergreifen?

5. In Akkumulatoren kann elektrische Energie gespeichert werden.

Beschreiben Sie einen Grundversuch, der das Prinzip des Akkumulators zeigt! Erläutern Sie die Energieumwandlungen! Welche Maßnahmen ergreift man in der Technik, um die Kapazität der Akkumulatoren möglichst groß zu machen?

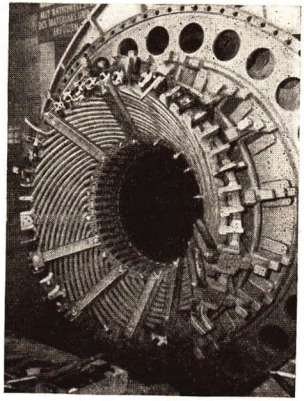
6. Bleiakkumulatoren müssen besonders gut gepflegt werden.

Geben Sie die wichtigsten Grundregeln für die Wartung an!

7. Die Einsatzmöglichkeiten von Akkumulatoren sind außerordentlich vielseitig.

Suchen Sie nach anderen Beispielen, als sie hier im Buch angegeben sind!
Worin liegen die technischen Vorteile und Nachteile der Energieversorgung einer technischen Einrichtung durch Akkumulatoren?

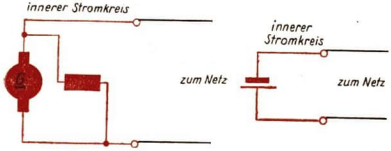
6. Spannungsquellen im Stromkreis



Montage eines Großgenerators im VEB Bergmann-Borsig.
Auf dem Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik gab es vor 1945 keinen Betrieb mit Erfahrungen im Turbinen- und Generatorenbau.
Heute liefern die Energiemaschinen aus unseren volkseigenen Betrieben die Elektroenergie, die zur Deckung des ständig wachsenden Bedarfs der Industrie und der Bevölkerung benötigt wird.

6.1. Der innere Stromkreis

Der Elektronenstrom eines Stromkreises hat seinen Ursprung in einer Spannungsquelle. Von dort aus durchfließt er eine Leitungsbahn, die wieder in die Spannungsquelle zurückführt. Die Elektronen durchströmen aber auch die Spannungsquelle. Man bezeichnet diesen Teil der Bahn als *inneren Stromkreis*.



100/1 Der innere Stromkreis eines galvanischen Elements und eines Generators

6.1.1. Der Innenwiderstand der Spannungsquellen

Die Grundgesetze des Gleichstromkreises haben wir bisher nur auf den *äußeren* Stromkreis, d. h. auf die Leitungen und die eingeschalteten Geräte, bezogen. Nachdem nun etwas über den Aufbau der chemischen Spannungsquellen bekannt ist, sollen die Verhältnisse im Inneren der Spannungsquellen betrachtet werden.
Jeder Elektrolyt setzt dem Strom einen elektrischen Widerstand entgegen. Die Ionen werden durch ihre eigenen Wärmebewegungen und durch die Wärmebewegungen der

nichtdissoziierten Moleküle auf ihrem Wege zwischen den Elektroden behindert. Es treten also ähnliche Vorgänge auf, wie bei der Bewegung der Elektronen in metallischen Leitern.

In den galvanischen Elementen besteht ein elektrischer Widerstand.

Mit Hilfe von Generatoren erzeugt man auf elektromagnetischem Wege Spannungen. Diese Maschinen enthalten Spulen mit vielen Windungen aus Kupfer- oder Aluminiumdrähten, durch die der Strom fließt. Im Einleitungsbild auf Seite 100 sind die Enden dieser Wicklungen an einem Generator zu sehen. In ihnen tritt ebenfalls ein elektrischer Widerstand auf.

Alle Spannungsquellen haben einen Innenwiderstand R_i.

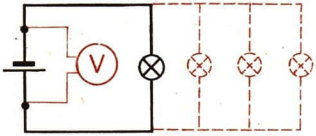
6.1.2. Der innere Spannungsabfall

Der Innenwiderstand der Spannungsquellen bewirkt, daß bei einem Stromfluß im Inneren der Spannungsquelle ein Spannungsabfall U_i auftritt. Er ist wie jeder Spannungsabfall nach dem Ohmschen Gesetz zu berechnen:

$$U_i = I \cdot R_i.$$

Der innere Spannungsabfall wächst mit zunehmender Stromstärke. Das zeigt ein Versuch:

An einer Taschenlampenbatterie wird die Spannung an den beiden Klemmen gemessen. Die Stromstärke wird stufenweise vergrößert, indem man eine, zwei, drei und vier Glühlampen parallel anschließt. Die Klemmenspannung wird dadurch immer kleiner, denn der innere Spannungsabfall wird größer. Die Glühlampen leuchten bei jeder Stufe des Versuchs schwächer.

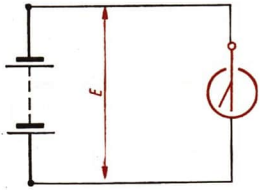


101/1 Versuchsanordnung zum Nachweis des inneren Spannungsabfalls

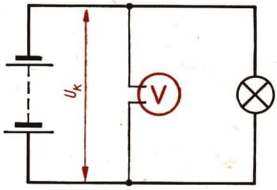
- *Unter welchen Bedingungen beobachten Sie etwas Ähnliches in Ihrer Wohnung?*

Mißt man die Spannung an einer Spannungsquelle mit einem elektrostatischen Spannungsmesser, so zeigt das Gerät die Spannung an, die im Inneren der Spannungsquelle aus der Energieumwandlung entsteht. Es fließt kein Strom, und es tritt kein innerer Spannungsabfall ein. Man bezeichnet diese Spannung im Inneren der Spannungsquelle, die auch zwischen den Klemmen einer stromlosen Spannungsquelle besteht, als **Urspannung** E, U_e oder elektromotorische „Kraft" EMK. Sobald ein Strom fließt, ist die Urspannung nicht mehr meßbar. Die Klemmenspannung ist um den Betrag des inneren Spannungsabfalls kleiner als die Urspannung.

Schließt man an eine Spannungsquelle nur einen Spannungsmesser mit sehr großem Innenwiderstand an, so ist der innere Spannungsabfall so klein, daß man die gemessene Klemmenspannung praktisch als gleich mit der Urspannung betrachten kann.



102/1 Die Urspannung kann an den Klemmen der Spannungsquelle mit einem elektrostatischen Spannungsmesser gemessen werden



102/2 Sobald ein Strom durch die Spannungsquelle fließt, mißt man an den Klemmen der Spannungsquellen die Klemmenspannung. Sie ist kleiner als die Urspannung

Die Urspannung ist die Ursache für den elektrischen Strom. Die Klemmenspannung an einer Spannungsquelle ist die Differenz aus Urspannung und innerem Spannungsabfall.

$U_k = U_e - U_i.$

$$\boxed{U_k = U_e - I \cdot R_i} \qquad (23)$$

Es besteht aber auch die Möglichkeit, die Urspannung an einer belasteten Spannungsquelle aus mehreren Messungen zu berechnen.

6.1.3. Berechnen des Innenwiderstandes und der Urspannung

In der Gleichung $U_k = U_e - I \cdot R_i$ treten die Größen U_e und R_i auf, die man nicht direkt in einer Versuchsanordnung messen kann. Diese beiden Größen sind aus einem System von zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten zu bestimmen. Die beiden Gleichungen gewinnt man aus den Meßergebnissen nach einer Schaltung wie Bild 102/3 zeigt.
Mit Hilfe des veränderlichen Widerstandes werden zwei verschiedene Stromstärken I_1 und I_2 eingestellt. Dazu werden jeweils die Klemmenspannungen U_{k_1} und U_{k_2} gemessen. Es ergibt sich:

$U_{k_1} = U_e - I_1 \cdot R_i$

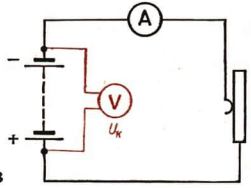
$U_{k_2} = U_e - I_2 \cdot R_i$

$U_{k_1} - U_{k_2} = I_2 \cdot R_i - I_1 \cdot R_i$

$U_{k_1} - U_{k_2} = (I_2 - I_1) \cdot R_i$

$R_i = \dfrac{U_{k_1} - U_{k_2}}{I_2 - I_1}$

$U_e = U_{k_1} + I_1 \cdot R_i.$



102/3

Beispiel

Bestimmen der Urspannung und des Innenwiderstandes einer Taschenlampenbatterie!

Meßwerte:

$U_{k_1} = 3{,}8\ \text{V}$ $\qquad I_1 = 0{,}1\ \text{A}$

$U_{k_2} = 3{,}5\ \text{V}$ $\qquad I_2 = 0{,}2\ \text{A}$

$$R_i = \frac{3{,}8 - 3{,}5}{0{,}2 - 0{,}1}\ \Omega$$

$$R_i = \frac{0{,}3}{0{,}1}\ \Omega$$

$$\underline{\underline{R_i = 3\ \Omega}}$$ *Der Innenwiderstand der Taschenlampenbatterie beträgt 3 Ω.*

$$U_e = 3{,}8\ \text{V} + 0{,}1 \cdot 3\ \text{V}$$

$$U_e = 3{,}8\ \text{V} + 0{,}3\ \text{V}$$

$$\underline{\underline{U_e = 4{,}1\ \text{V}}}$$ *Die Urspannung der Taschenlampenbatterie beträgt 4,1 V.*

Bei dem Versuch ist darauf zu achten, daß die beiden Stromstärken nicht zu unterschiedlich gewählt werden. Der Innenwiderstand ändert sich mit der Stromstärke durch die Temperaturänderung und durch chemische Vorgänge.

6.2. Zusammenschaltung von Spannungsquellen

Schon bei der Betrachtung der Batterien wurde auf die Möglichkeit der Reihenschaltung von elektrolytischen Spannungsquellen hingewiesen. In der Elektrotechnik werden andere Spannungsquellen kaum in Reihe geschaltet. Die Zusammenschaltung von Elementen zu Batterien ist sehr oft notwendig, da die einzelnen Elemente nur eine kleine Spannung haben.

6.2.1. Reihenschaltung von Spannungsquellen

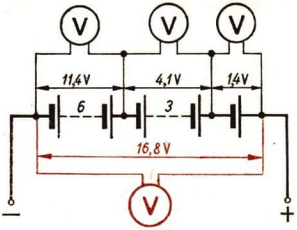
In einer Reihenschaltung wird der Minuspol der einen Spannungsquelle immer mit dem Pluspol der folgenden verbunden. Ein Versuch zeigt, daß sich die Klemmenspannungen der Spannungsquellen addieren.

Beispiel

Klemmenspannung eines Akkumulators	$U_{k_1} = 11{,}4\ \text{V}$
Klemmenspannung einer Flachbatterie	$U_{k_2} = 4{,}1\ \text{V}$
Klemmenspannung einer Monozelle	$U_{k_3} = 1{,}4\ \text{V}$
Summe der Klemmenspannungen	$\Sigma U_{k_n} = 16{,}9\ \text{V}$
Gemessene Gesamtspannung	$U_g = 16{,}8\ \text{V}$ (Bild 104/1)

Die Abweichung des Meßergebnisses von der Rechnung beruht auf der Meßungenauigkeit der Spannungsmesser.
Auf die inneren Spannungsabfälle und Innenwiderstände können wir das Kirchhoffsche Spannungsverteilungsgesetz anwenden (s. S. 20). Nach diesem addieren sich auch die inneren Spannungsabfälle beziehungsweise die Innenwiderstände der einzelnen Spannungsquellen:

$$U_{i_g} = U_{i_1} + U_{i_2} + U_{i_3} + \cdots + U_{i_n}$$
$$R_{i_g} = R_{i_1} + R_{i_2} + R_{i_3} + \cdots + R_{i_n}.$$



104/1
Reihenschaltung von Spannungsquellen

Die Urspannung der Spannungsquellen in Reihenschaltung ist ebenfalls gleich der Summe der Urspannungen der einzelnen Spannungsquellen:

$$U_{e_g} = U_{e_1} + U_{e_2} + U_{e_3} + \cdots + U_{e_n}.$$

Bei einer Reihenschaltung von Spannungsquellen addieren sich

1. die Urspannungen U_e,
2. die Klemmenspannungen U_k,
3. die inneren Spannungsabfälle U_i,
4. die inneren Widerstände R_i.

Wird eine Spannungsquelle in entgegengesetzter Polung mit anderen in Reihe geschaltet, dann müssen ihre Klemmenspannung und ihre Urspannung mit negativem Vorzeichen in die Summen eingesetzt werden. Der innere Spannungsabfall und der Innenwiderstand behalten ihr positives Vorzeichen.

6.2.2. Die Grundgesetze des vollständigen Gleichstromkreises

Die Kirchhoffschen Gesetze und das Ohmsche Gesetz wurden so eingeführt, daß sie nur im äußeren Stromkreis und für Teile des äußeren Stromkreises gelten. Man spricht vom vollständigen Stromkreis, wenn man den inneren Stromkreis mitbetrachtet. Für einen unverzweigten Stromkreis mit mehreren Widerständen und Spannungsquellen in Reihenschaltung lautet die allgemeine Form des

Kirchhoffschen Spannungsverteilungsgesetzes:

Die Summe der Spannungsabfälle in den äußeren und inneren Widerständen ist gleich der Summe der Urspannungen.

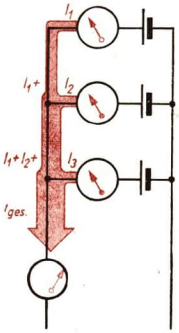
$$\boxed{(U_1 + U_2 + \cdots + U_n) + (U_{i_1} + U_{i_2} + \cdots + U_{i_n}) = U_{e_1} + U_{e_2} + \cdots + U_{e_n}} \quad (24.1)$$

Der Gesamtwiderstand des vollständigen Stromkreises ist gleich der Summe aller Teilwiderstände einschließlich des Innenwiderstandes der Spannungsquellen.

$$R_g = (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) + (R_{i_1} + R_{i_2} + \cdots + R_{i_n}) \qquad (24.2)$$

Die Beziehungen des **Ohmschen Gesetzes** bestehen im vollständigen Stromkreis zwischen der Urspannung, der Stromstärke und dem Gesamtwiderstand in folgender Form:

$$I = \frac{U_e}{R_g}.$$



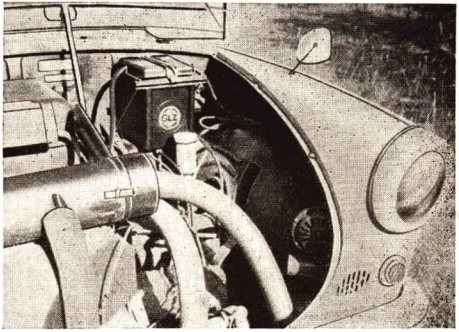
105/1 Parallelschaltung von Spannungsquellen

6.2.3. Die Parallelschaltung von Spannungsquellen

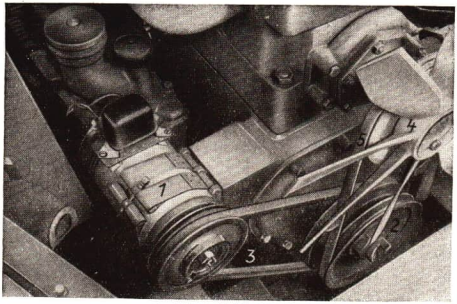
Sind an einem Stromkreis mehrere gleichartige Spannungsquellen parallelgeschaltet, so entspricht die Gesamtstromstärke im äußeren Stromkreis der Summe der Teilstromstärken. Zwischen den Verzweigungspunkten besteht die Spannung, die auch jede einzelne Spannungsquelle hat. Dieser Idealfall, daß mehrere Spannungsquellen die gleiche Urspannung und den gleichen Innenwiderstand haben, tritt praktisch kaum auf. Am nächsten kommt ihm die Parallelschaltung mehrerer gleicher galvanischer Elemente oder **Akkumulatoren.**

6.2.4. Stromversorgungsanlage im Kraftfahrzeug

Kraftfahrzeuge sind meist mit zwei Spannungsquellen ausgerüstet. Die zahlreichen elektrischen Einrichtungen des Fahrzeuges werden bei laufendem Motor von einem kleinen Gleichstromgenerator, der *Lichtmaschine,* versorgt. Ein *Akkumulator* über-



105/2 Akkumulator in einem Personenkraftwagen „Trabant"



106/1 Lichtmaschine in einem Lastkraftwagen „Sachsenring H 3 A“

1 Lichtmaschine
2 Riemenscheibe
3 Riementrieb
4 Ventilator

5 Riementrieb

nimmt diese Aufgaben bei Stillstand des Motors. Reglerschalter sorgen dafür, daß zu einem bestimmten Zeitpunkt während des Betriebes die Lichtmaschine mit dem Akkumulator verbunden wird und auch Spannung und Strom der Lichtmaschine geregelt werden. Wenn die Spannung der Lichtmaschine unter die der Batterie absinkt, muß die Lichtmaschine wieder vom Stromkreis getrennt werden.
In den Reglerschaltern befinden sich Elektromagnete mit verschiedenen Wicklungen, die an die Batterie und an die Lichtmaschine angeschlossen sind. Sie lösen die notwendigen Schaltvorgänge automatisch aus.
An das Versorgungsnetz des Fahrzeuges sind die elektrischen Geräte angeschlossen. Sie sind parallelgeschaltet. Eine Leitung wird dadurch eingespart, daß man den Strom über das Metallgestell des Fahrzeuges leitet.
Die Betriebsspannungen für die Fahrzeugarten sind genormt und betragen für:

Motorräder und kleine PKW:	6 V,
große PKW, kleine LKW und Traktoren:	12 V,
große LKW:	24 V.

Ähnlich wie bei Kraftfahrzeugen wird das Lichtnetz der Personenwagen der Deutschen Reichsbahn von Akkumulatoren und einer Lichtmaschine versorgt.

106/2 Stark vereinfachte Übersicht über das elektrische Versorgungsnetz eines Kraftfahrzeuges

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Bestimmen Sie den Innenwiderstand und die Urspannung einer Akkumulatorzelle!

2. Wieviel Elemente sind in Belfa-Batterien für Kofferrundfunkgeräte mit 9 V oder 22,5 V in Reihe geschaltet?

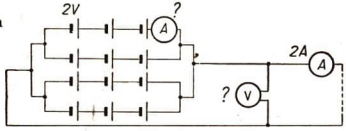
3. Für einen Rundfunkempfänger wird eine Anodenspannung von 90 V benötigt. Wie viele Zink-Kohle-Elemente sind in der Anodenbatterie in Reihe geschaltet?

4. Bild 107/1 stellt eine Gruppenschaltung dar.

   4.1. Ermitteln Sie die Gesamtspannung der Batterie!

   4.2. Wie groß ist die Stromstärke in jeder Zelle der Batterie?
   Zellenspannung 2 V, Gesamtstromstärke 2 A.

107/1 Gruppenschaltung von Elementen



5. Eine Akkumulatorenbatterie hat 12 Zellen in Reihenschaltung. Sie wird von einem Generator aufgeladen. Die Urspannung einer Zelle beträgt 2,2 V, der Innenwiderstand jeder Zelle 0,1 Ω und die Ladestromstärke 0,85 A. Die Verbindungsleitung zwischen Akkumulator und Generator hat einen Widerstand von 0,5 Ω. Der Innenwiderstand des Generators beträgt 0,75 Ω.

   5.1. Zeichnen Sie ein Schaltbild!

   5.2. Berechnen Sie die Spannungsabfälle in allen Stromkreisteilen, die Urspannungen und die Klemmenspannungen der Batterie und des Generators!

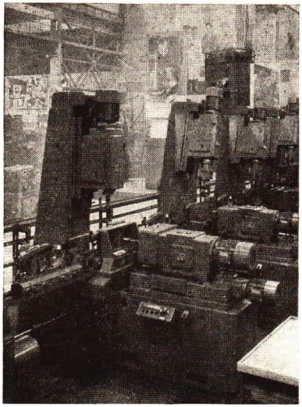
Zusammenfassung

1. **Jede Spannungsquelle hat einen Innenwiderstand.**
   Welche Ursachen liegen dem Innenwiderstand zugrunde?
   In welcher Weise beeinflußt er die Klemmenspannung?

2. **In einem Stromkreis können Spannungsquellen parallel oder in Reihe geschaltet werden.**
   Durch welche der beiden Schaltungen erhält man eine höhere Spannung?

3. **In Kraftfahrzeugen ist eine Batterie mit einer Lichtmaschine parallelgeschaltet.**
   Warum muß zwischen beiden ein Reglerschalter liegen?

7. Das magnetische Feld



Zahlreiche Elektromotoren treiben die Sondermaschinen in dieser Taktstraße. Automatisch wird das Werkstück auf der Taktstraße transportiert, und automatisch verrichten die Maschinen ihre Arbeit. Elektrische Anlagen steuern den gesamten Ablauf.
Nicht nur in den Elektromotoren, sondern auch in den Schalt- und Steuerungsgeräten dieser modernen Industrieanlagen werden die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes ausgenutzt.

7.1. Das Magnetfeld stromdurchflossener Leiter

Der Zustand eines Raumes, in dem sich stromdurchflossene Körper oder Dauermagnete befinden und in dessen Bereich für jeden Ort Kraftwirkungen nachgewiesen werden können, heißt magnetisches Feld. Das magnetische Feld ist eine Form der Materie.

7.1.1. Ursache und Richtung des Magnetfeldes

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben. An einem geraden Leiter ist die Richtung der Feldlinien mit Hilfe der *Rechten-Faust-Regel* zu bestimmen. Bei der Aufstellung der Merkregeln für die Richtung der Magnetfelder ist es heute noch allgemein üblich, die *elektrische Stromrichtung* zu benutzen (s. S. 11). Man sagt, sie verläuft im äußeren Stromkreis vom Pluspol zum Minuspol, also dem Elektronenstrom entgegen (Bild 109/1).

Umschließt man einen Leiter mit der rechten Faust so, daß der abgespreizte Daumen in elektrischer Stromrichtung (dem Elektronenstrom entgegen) zeigt, dann zeigen die Fingerspitzen die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

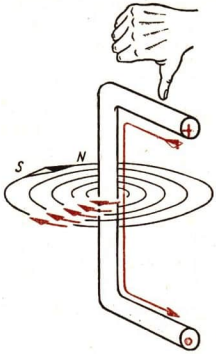
In einer stromdurchflossenen Spule überlagern sich die Magnetfelder der einzelnen Windungen zu einem Gesamtfeld. Aus dem Bild 109/2 ist zu ersehen, daß man für das Magnetfeld einer Spule auch eine Rechte-Faust-Regel aufstellen kann.

Hält man an einer Spule die gekrümmten Finger der rechten Faust in elektrischer Stromrichtung (dem Elektronenstrom entgegen), so zeigt der abgespreizte Daumen die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

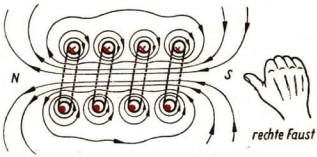
Die magnetischen Feldlinien verlaufen außerhalb der Spule vom Nordpol zum Südpol. Demzufolge zeigt der Daumen der rechten Faust gleichzeitig den Nordpol einer stromdurchflossenen Spule an.

7.1.2. Kraftwirkungen am stromdurchflossenen Leiter

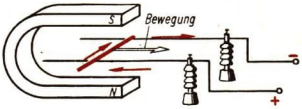
Bei einem Versuch nach Bild 109/3 befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld. Durch die Wechselwirkung der Magnetfelder des Hufeisenmagneten und des Leiters bewegt sich der Leiter in der eingezeichneten Richtung, sobald der Strom eingeschaltet wird.
Die beiden Magnetfelder überlagern sich so, daß auf der einen Seite des Leiters ein stärkeres Magnetfeld auftritt als auf der anderen. Dadurch wird eine Kraft auf den Leiter ausgeübt, und er gerät in Bewegung.



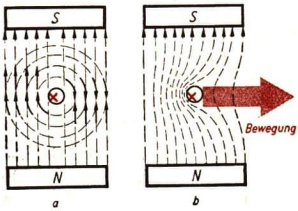
109/1



109/2



109/3



109/4

109/1 Rechte-Faust-Regel für den geraden stromdurchflossenen Leiter. Der Daumen zeigt in elektrischer Stromrichtung dem Elektronenstrom entgegen

109/2 Rechte-Faust-Regel an einer stromdurchflossenen Spule. Die Finger der rechten Hand zeigen in elektrischer Stromrichtung, der Daumen zeigt in Richtung des Nordpols der Spule

109/3 Versuchsanordnung zur Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld

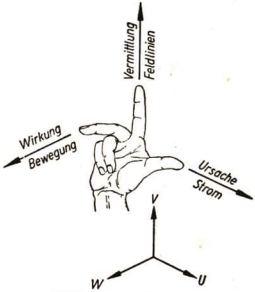
109/4 Feldlinienverlauf am stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

Diese Vorgänge lassen sich durch eine Regel wiedergeben:

Man stellt Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger der rechten Hand senkrecht zueinander. Bringt man den Daumen in die elektrische Stromrichtung, den Zeigefinger in die Richtung der Feldlinien, so zeigt der Mittelfinger die Bewegungsrichtung des Leiters an.

Diese Regel heißt kurz die UVW-Regel:

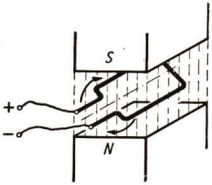
U — Ursache — elektrische Stromrichtung,
V — Vermittlung — Feldlinienrichtung,
W — Wirkung — Bewegungsrichtung.



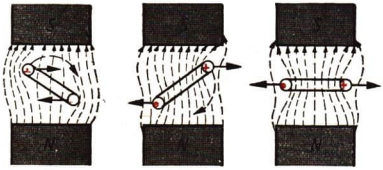
110/1 UVW-Regel für die Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld. Die Fingerspitzen zeigen in elektrischer Stromrichtung

7.1.3. Kraftwirkungen auf eine Spule

Im Bild 110/2 ist eine stromdurchflossene Spule in einem homogenen Magnetfeld gezeigt. Auf die Leiter dieser Spule werden im Magnetfeld Kraftwirkungen ausgeübt, so daß sie gedreht wird. Der Feldlinienverlauf, der zu der Drehung führt, ist im Bild 110/3 dargestellt. Die Drehbewegung wird beendet, wenn die Spule senkrecht zum Magnetfeld steht. Dann wirken die Kräfte nicht mehr drehend auf die Spule.
Diese Kraftwirkungen und Bewegungen an stromdurchflossenen Leitern zeigen im Prinzip, wie es möglich ist, aus elektrischer Energie mechanische Energie zu gewinnen.



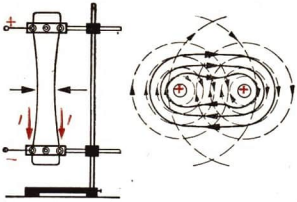
110/2 Drehbare Spule im Magnetfeld



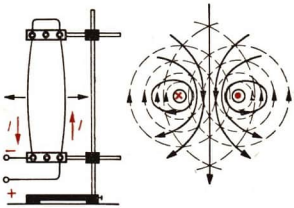
110/3 Feldlinienverlauf an einer stromdurchflossenen drehbaren Spule im Magnetfeld

7.1.4. Kraftwirkungen zwischen parallelen Leitern

Zwei Lamettafäden werden senkrecht parallel zueinander gespannt. Sie werden einmal in gleicher Richtung von einem Strom durchflossen und einmal in entgegengesetzter Richtung. Durch die Magnetfelder, die sie umgeben, treten anziehende oder abstoßende Kräfte auf.



111/1 Kraftwirkung zwischen parallelen Leitern mit gleicher Stromrichtung



111/2 Kraftwirkung zwischen parallelen Leitern mit entgegengesetzter Stromrichtung

Der Feldlinienverlauf, durch den diese Kraftwirkungen bedingt sind, ist in den Bildern eingezeichnet. Die Kraftwirkung zwischen zwei parallelen Leitern ist zur gesetzlichen Festlegung der Maßeinheit für die Stromstärke benutzt worden.
(In der „Tafel der gesetzlichen Einheiten" ist die magnetische Eigenschaft durch die relative Permeabilität 1 ausgedrückt und die Kraft mit $2 \cdot 10^{-7}$ N angegeben.)
Die Kraftwirkungen zwischen parallelen Leitern sind in der Elektrotechnik bedeutungsvoll.

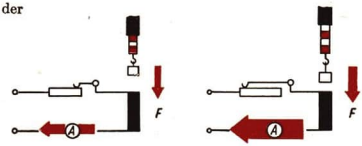
Beispiel

In den Starkstromkabeln treten erhebliche, abstoßende Kräfte zwischen den Adern auf, die durch die Umwehrung des Kabels aufgenommen werden müssen. An Schalttafeln müssen parallellaufende Stromschienen sehr gut befestigt sein.

7.2. Die Wirkung der Magnetfelder in Stoffen

Elektromagnete haben in der Elektrotechnik eine außerordentliche Bedeutung. Dafür sind uns schon mehrere Anwendungsmöglichkeiten bekannt, wie zum Beispiel Morsetelegraf, Klingel, Kopfhörer und Relais. In den Elektromotoren und Generatoren werden ebenfalls Magnetfelder erzeugt, mit deren Hilfe die Magnetfelder drehbarer Spulen beeinflußt werden. Aus all diesen Gründen müssen die Bedingungen untersucht werden, unter denen die genannten Erscheinungen zustande kommen.

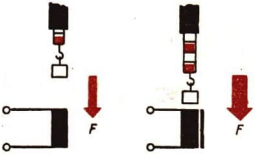
111/3 Das Magnetfeld einer Spule ist von der Stärke des fließenden Stromes abhängig



7.2.1. Stromstärke und Magnetfeld

Mit dem einfachen Versuch nach Bild 111/3 kann man nachweisen, daß die Kraftwirkung einer Spule auf einen Eisenkern mit der Stromstärke verändert werden kann. Der vorgeschaltete Widerstand dient zum Verändern der Stromstärke.
Die Ursache dieser Wirkung ist elektromagnetischer Art. Je größer der Stromfluß in einer Spule ist, um so stärker ist das erzeugte Magnetfeld und um so größer ist auch die Anziehungskraft.

7.2.2. Stoffe im Magnetfeld



112/1 Einfluß eines Eisenkerns auf die Kraftwirkung im Magnetfeld

Bringt man einen Eisenkern in das Magnetfeld einer Spule, so wird die Kraftwirkung erheblich verstärkt (Bild 112/1).
Die gleichen magnetischen Eigenschaften wie Eisen, nur in schwächerem Maße, zeigen die anderen beiden Metalle der Eisengruppe, Nickel und Kobalt. Der Magnetismus der Eisenmetalle wird nach ihrem wichtigsten Vertreter *Ferromagnetismus* genannt. Aber auch die magnetischen Eigenschaften der einzelnen Eisenmetallsorten sind verschieden. Dies beweist folgender Versuch:

> In eine stromdurchflossene Spule werden zwei Stahlstäbe von gleicher Länge und von gleichem Querschnitt gebracht. Der eine Stab besteht aus geglühtem Stahl, der andere aus gehärtetem Stahl. Durch das Magnetfeld der Stromspule werden beide Stäbe magnetisiert. Beide Stäbe werden dann aus der Spule herausgenommen und in Stahlfeilspäne getaucht. Durch die Menge der festgehaltenen Feilspäne wird die Stärke des zurückgebliebenen Magnetismus veranschaulicht. Es erweist sich, daß an dem gehärteten Stahlstab eine weit größere Menge von Spänen haftenbleibt als an dem geglühten Stahlstab.

Man nennt Stoffe (wie geglühten Stahl), die in einem Magnetfeld leicht magnetisiert werden, ihren Magnetismus aber außerhalb dieses Magnetfeldes wieder verlieren, *magnetisch weich.*
Solche Stoffe, die wie gehärteter Stahl ihren Magnetismus außerhalb des erregenden Magnetfeldes beibehalten, nennt man *magnetisch hart.* Der nach der Magnetisierung zurückgebliebene Magnetismus wird *remanenter*[1] *Magnetismus* genannt. Da magnetisch harte Stoffe einen starken remanenten Magnetismus nach dem Aufhören des erregenden Magnetfeldes behalten, heißen sie auch *permanent*[2] *magnetisch.*

> **Beispiel**
>
> Magnetisch weiches Eisen ist das Carbonyleisen. Es wird aus Eisenpentacarbonyl ($Fe(CO)_5$) als reinstes Eisen in Pulverform mit einer Korngröße von einigen tausendstel Millimetern gewonnen. Für die Eisenkerne der in der Fernmeldetechnik verwendeten Spulen wird das Carbonyleisenpulver mit einem isolierenden Kunststoff zu festen Körpern zusammengekittet. Auch zur Herstellung der Elektromotoren und Generatoren werden magnetisch

[1] remanere (lat.): zurückbleiben. [2] permanere (lat.): dauernd bleiben.

weiche Stoffe gebraucht, die schon bei schwachen erregenden Strömen stark magnetisiert werden.
Magnetisch weich sind insbesondere verschiedene Eisen-Silizium-Legierungen mit einem Siliziumgehalt von 1 bis 4,5% und einem sehr geringen Kohlenstoffgehalt. Weichmagnetische Werkstoffe sind auch die Eisen-Nickel-Legierungen, von denen das besonders wirksame Permalloy neben dem Eisen etwa 78% Nickel enthält.

Für viele Meßinstrumente und für Lautsprecher sind magnetisch harte Stoffe erforderlich, die ihren Magnetismus jahrelang unverändert beibehalten.

Beispiel

Ein solcher Stoff ist zum Beispiel Stahl. Stahlmagnete werden daher auch Dauermagnete genannt. Als magnetisch besonders hart hat sich der gehärtete Wolframstahl erwiesen. Er enthält vor allem Eisen, außerdem Wolfram und Kohlenstoff. Ein anderer hartmagnetischer Werkstoff ist Alnico, eine Legierung aus Eisen, Aluminium, Nickel und Kobalt. Es gibt sogar Legierungen, die hartmagnetisch sind, ohne daß ihnen ferromagnetische Stoffe beigemengt sind. Es sind dies die Heuslerschen Legierungen. Sie enthalten vorwiegend Mangan und Kupfer mit einem Zusatz eines der Metalle Aluminium, Zinn, Antimon und Wismut.

Eine viel verwendete Art ferromagnetischer Stoffe sind die *Ferrite*. Der bekannte Magneteisenstein (Magnetit Fe_3O_4) ist ein natürliches Ferrit. Ferrite bestehen aus Eisenoxid und einem oder mehreren Oxiden zweiwertiger Metalle, zum Beispiel $BaO \cdot 6Fe_2O_3$. Man kann Magnete, die aus Ferriten bestehen, künstlich herstellen, und zwar nach Verfahren der keramischen Industrie.

Beispiel

Die magnetisch weichen Ferrite nennt man Manifer, die magnetisch harten Maniperm. Die hartmagnetischen Ferrite werden nach ihrer Sinterung durch ein starkes Magnetfeld magnetisiert. Es entstehen auf diese Weise sehr starke Dauermagnete.
Sowohl die weichmagnetischen wie die hartmagnetischen Ferrite werden in steigendem Maße auf fast allen Gebieten der Nachrichtentechnik, insbesondere der Rundfunk- und Fernsehtechnik und in Rechenautomaten als Magnete verwendet.

7.2.3. Paramagnetische und diamagnetische Stoffe

Mit Hilfe starker Elektromagnete ist nachgewiesen worden, daß auch alle nicht ferromagnetischen Stoffe in geringem Maße magnetischen Einflüssen unterliegen. Man unterscheidet dabei *paramagnetische* und *diamagnetische* Stoffe. Bringt man einen paramagnetischen Stoff in ein Magnetfeld, so wird das Magnetfeld etwas verstärkt, während ein diamagnetischer Stoff das Magnetfeld etwas abschwächt.

Tabelle 3. Magnetische Eigenschaften einiger Stoffe

Eigenschaften	ferromagnetisch	paramagnetisch	diamagnetisch
Stoff	Eisen, Nickel, Kobalt	Platin, Aluminium, Hartgummi	Wismut, Kupfer, Glas

7.2.4. Die Elementarmagnete

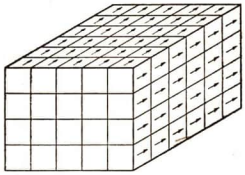
Es hat sich gezeigt, daß der Magnetismus des Eisens und einiger anderer Stoffe mit ihrem Kristallaufbau zusammenhängt. Wie die meisten festen Stoffe kristallisieren auch die Metalle in bestimmten Formen, das Eisen beispielsweise würfelförmig. Man hat erkannt, daß die kleinsten Eisenkristallwürfel, die die Bauelemente größerer Eisenkristalle bilden, wie die Ziegel einer Mauer zu quaderförmigen Gebilden zusammengesetzt sind. Diese Quader umfassen etwa 10^5 Atome und haben Kantenlängen in der Größenordnung von etwa 10^{-3} mm.

Auf Grund umfangreicher Forschungen, an denen insbesondere der Physiker P. Weiss beteiligt war, wurde festgestellt, daß die kleinsten Eisenkristallwürfel stets magnetisch sind, und daß ihre Feldrichtung mit einer Kantenrichtung der Quader übereinstimmt. Der Magnetismus der kleinsten Eisenkristalle beruht auf der Anordnung der Bewegungen der Elektronen im Kristallgefüge. Innerhalb etwas größerer Eisenquader sind alle kleinsten Eisenwürfel gleichsinnig magnetisch (Bild 114/1).

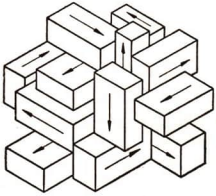
Diese magnetischen Eisenquader bezeichnet man als die *Weißschen Bezirke*. Sie sind die Elementarmagnete. In den verschiedenen Weißschen Bezirken sind die Feldrichtungen entsprechend den sechs räumlichen Kantenrichtungen angeordnet.

Da im unmagnetischen Eisen die möglichen Feldrichtungen alle in annähernd gleicher Zahl auftreten, hebt sich die magnetische Wirkung der Weißschen Bezirke nach außen hin auf (Bild 114/2).

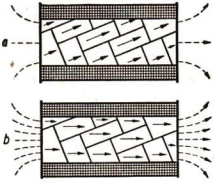
Befindet sich das Eisen als Kern in einer stromdurchflossenen Spule und wird die Stromstärke gesteigert, so ändern sich die Feldrichtungen der Weißschen Bezirke infolge der Wirkung des äußeren Magnetfeldes der Spule nach und nach in die Kantenrichtung um, die mit der Richtung des äußeren Magnetfeldes den kleinsten spitzen Winkel einschließt (Bild 114/3a).



114/1 Weißscher Bezirk. Er besteht aus einer großen Zahl kleinster magnetischer Eisenkristalle mit gleicher Feldrichtung



114/2 Räumliche Anordnung einiger Weißscher Bezirke mit verschiedenen Feldrichtungen im unmagnetischen Eisen

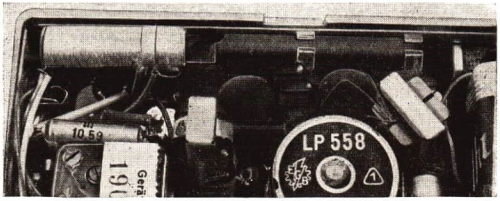


114/3 Anpassen der Feldrichtungen der Weißschen Bezirke in die Richtung des äußeren Feldes (stark schematisiert).
a) Spitzer Winkel bei schwacher Magnetisierung
b) Zusammenfallen mit der äußeren Feldrichtung bei magnetischer Sättigung

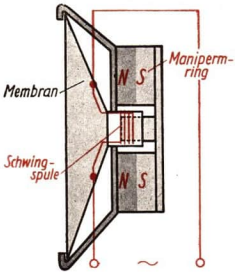
Bei weiterem Vergrößern der Stromstärke wird schließlich eine Parallelstellung der Feldrichtungen sämtlicher Weißscher Bezirke zur Richtung des äußeren Magnetfeldes der Spule erreicht (Bild 114/3 b).

7.3. Die technische Bedeutung des Magnetfeldes

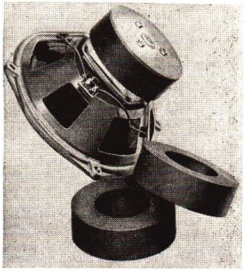
Bringt man magnetisch weiche Stoffe in das magnetische Wechselfeld einer Spule, die von niederfrequentem Wechselstrom durchflossen ist, so können sie dem Polwechsel folgen und werden dauernd ummagnetisiert. Die Eisenteile in Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren werden deshalb aus magnetisch weichem Material gefertigt. In diesen Geräten treten magnetische Wechselfelder auf, und die Energieverluste durch das Ummagnetisieren der Eisenteile müssen möglichst klein gehalten werden.
Ferritmaterial kann sogar so weich hergestellt werden, daß es dem sehr schnellen Polwechsel folgen kann, der in den Schwingungen auftritt, die von Funkwellen ausgelöst werden. In den Antennenspulen von Rundfunkgeräten befinden sich Ferritstäbe zur Verstärkung der magnetischen Wechselfelder (Bild 115/1).
In modernen Lautsprechern sind ringförmige Manipermmagnete eingebaut. An der Membrane des Lautsprechers ist eine Schwingspule befestigt, in der durch die Sprechwechselströme ein magnetisches Wechselfeld entsteht. Die Schwingspule liegt im Feld des Manipermringes. Zwischen den beiden Magnetfeldern treten Kraftwirkungen auf, so daß die Spule und die Membrane in Schwingungen geraten und Schallwellen erzeugt werden.



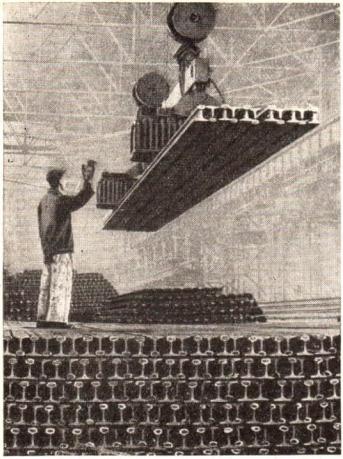
115/1 Ferritantenne im Rundfunktaschenempfänger „Sternchen"



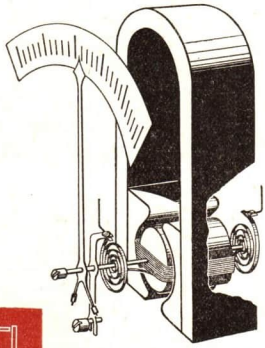
115/2 Schaltbild eines permanentdynamischen Lautsprechers



115/3 Permanentdynamischer Lautsprecher mit Manipermringen



116/1 Lasthebemagnet an einem Kran. Die Polschuhe der Lasthebemagneten sind aus Weicheisen gefertigt, damit die Last beim Ausschalten des Stromes abfällt



116/2 Drehspulmeßwerk und Symbol

In Drehspulmeßwerken werden Dauermagnete von besonders hoher Qualität benötigt. Ihr Magnetismus muß über Jahre konstant bleiben.

7.3.1. Drehspulmeßwerke

Elektrische Anlagen werden ständig überwacht, ihre Betriebssicherheit überprüft und eventuell auftretende Störungen festgestellt. Schaltungen in Versuchsanordnungen werden in der gleichen Weise behandelt. Dazu dienen verschiedene Meßgeräte, deren Wirkungsweise zum Teil auf den bereits bekannten Gesetzmäßigkeiten von der Bewegung stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld beruht.

In einem Drehspulmeßwerk befindet sich eine Spule auf einem leitenden, drehbaren Aluminiumrahmen im Magnetfeld eines Dauermagneten. Sie wird von zwei Spiralfedern, die gleichzeitig der Stromzuführung dienen, in der Ruhelage gehalten. Fließt durch die Spule ein Gleichstrom, so tritt eine Kraftwirkung auf die Spule ein, wie in 7.1.3. erklärt ist. Die Spule wird so weit gedreht, bis die Spannkraft der Federn den drehenden Kräften das Gleichgewicht hält. Diese Kräfte sind von der Größe der Stromstärke abhängig. So entsteht ein Zeigerausschlag, der von der Stromstärke bestimmt ist (Bild 116/2).

Die Meßwerke sind so konstruiert, daß die Spulen einen kleinen Widerstand haben und daß der maximale Zeigerausschlag bei Stromstärken von wenigen Milliampere eintritt. Durch Vorwiderstände oder Shunts können die Drehspulmeßgeräte als Spannungs- oder Strommesser eingesetzt werden.

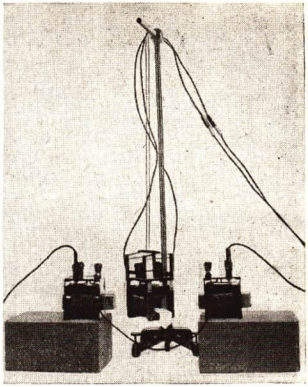
Bei Änderung der Stromrichtung erfolgt die Drehung der Spule und damit der Zeigerausschlag in entgegengesetzter Richtung. Darum muß man an Drehspulmeß-

geräten auf den richtigen Anschluß achten. Durch Wechselstrom müßte die Drehspule dauernd hin- und hergedreht werden. Auf Grund ihrer Trägheit kann sie aber dem schnellen Wechsel der Stromrichtung nicht folgen und bleibt in Ruhe.

Drehspulmeßgeräte eignen sich nur für Gleichstrom- und Gleichspannungsmessungen.

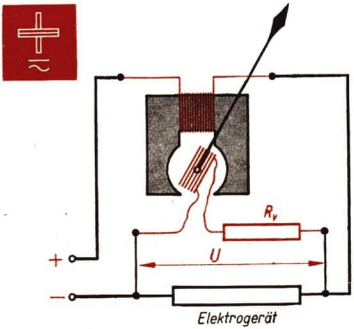
Um Wechselstrom und Wechselspannungen mit ihnen zu messen, muß ein Meßgleichrichter eingebaut sein, der den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt. Meßgleichrichter sind in den Vielfachmeßgeräten eingesetzt.

Soll ein Meßgerät eine *elektrische Leistung messen*, so muß der Zeigerausschlag von der Spannung und der Stromstärke abhängig sein. Das kann man ebenfalls mit einem Drehspulmeßwerk erreichen. Man ersetzt den permanenten Magneten durch einen Elektromagneten. Seine Wicklung besteht aus wenigen Windungen dicken Drahtes. Diese wird wie ein Strommesser in den Stromkreis geschaltet, so daß der gesamte Strom hindurchgeleitet wird. Die Anschlüsse der Drehspule werden mit einem Vorwiderstand wie ein Spannungsmesser angeschlossen. Durch diesen Aufbau wird die Kraftwirkung auf die Spule, und damit der Zeigerausschlag, von dem Produkt aus Spannung und Stromstärke abhängig. Das Gerät ist ein **Leistungsmesser**. Die Skale ist in Watt oder Kilowatt geeicht (Bilder 117/2, 117/3).

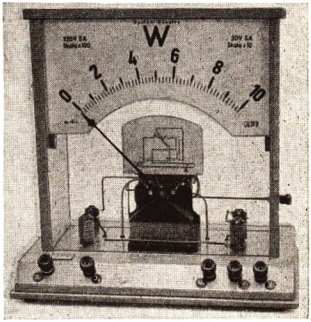


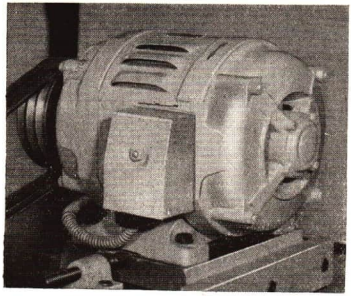
117/1 Modellversuch zum Leistungsmesser Die Drehspule wird vom Gerätestrom durchflossen, die seitlichen Spulen liegen parallel zur Spannungsquelle

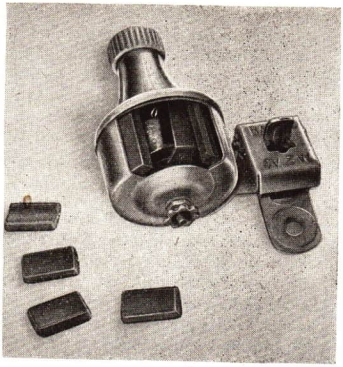
117/2 Prinzipschaltbild und Symbol eines Leistungsmessers



117/3 Leistungsmesser für Unterrichtszwecke







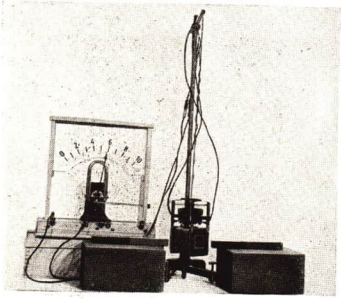
118/1 Elektromotor
118/2 Fahrraddynamo, geöffnet

7.3.2. Elektromotoren und Generatoren

An der Drehbewegung einer Spule im Magnetfeld kann man das Prinzip der Wirkungsweise der Elektromotoren erkennen. Man muß im Elektromotor durch eine Umpolung der Stromzuführung dafür sorgen, daß die Drehbewegung nicht bei einer bestimmten Stellung der Spule aufhört, sondern fortgesetzt wird.

In Elektromotoren wird elektrische Energie durch die Wechselwirkung magnetischer Felder in mechanische Energie umgewandelt.

Es liegt die Vermutung nahe, daß diese Vorgänge auch umgekehrt ablaufen können. Das bestätigt folgender Versuch.



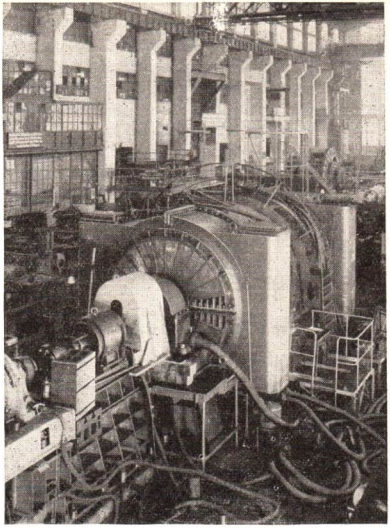
Man dreht eine Spule in einem Magnetfeld. Dadurch ändert sich dauernd der von der Spule umschlossene Teil des Magnetfeldes. Während einer langsamen Drehung der Spule zeigt ein angeschlossener Spannungsmesser mit Nullpunktsmittellage einen hin- und hergehenden Zeigerausschlag.

118/3 Versuchsanordnung zum Nachweis der Erzeugung einer Wechselspannung

Durch die Drehung einer Spule in einem Magnetfeld entsteht in der Spule eine Wechselspannung.
Nach diesem Prinzip arbeiten der Fahrraddynamo und auch die großen Maschinen in den Kraftwerken, die Generatoren.

In Generatoren wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Die Erfindung der Generatoren und der Elektromotoren in der Mitte des 19. Jahrhunderts ist nicht nur für die Elektrotechnik, sondern auch für die gesellschaftliche Entwicklung der Menschheit von weittragender Bedeutung.
In den Großkraftwerken kann elektrische Energie aus der Wärmeenergie von Brennstoffen, aus Atomenergie und aus der Energie des angestauten Wassers (Bilder 119/1, 119/2) umgewandelt werden. Die elektrische Energie wird über Fernleitungen in Produktionsbetriebe und Wohnstätten geleitet. Sie kann hier in die verschiedenen anderen Energieformen überführt werden. Elektromotoren treiben mit ihrer mechanischen Energie fast alle Maschinen und viele Fahrzeuge an. Elektrische Energie liefert den Menschen Wärme und



119/1 Generator während der Montage im Prüffeld des VEB Bergmann-Borsig. Der Generator hat eine Leistung von 100000 kW und wird mit Wasserstoff gekühlt.
119/2 Blick in die 700 m lange Maschinenhalle des Wolga-Wasserkraftwerkes „XXII. Parteitag der KPdSU.“ Die Generatoren werden von 21 Turbinen mit je 115000 kW Leistung angetrieben.

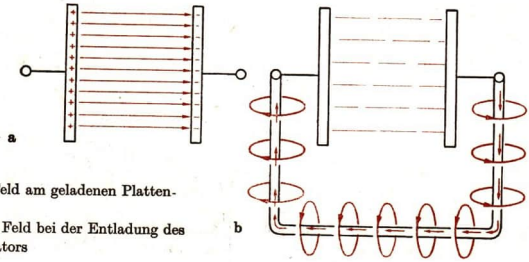
Licht. Mit ihr werden in der chemischen Industrie Rohstoffe gewonnen. Funk und Fernsehen arbeiten mit elektrischer Energie, und auch in der Medizin findet sie mannigfache Anwendung. So können durch die elektrische Energie die Produktion und der Wohlstand der Menschen gesteigert werden. Das ist aber nur in der sozialistischen Gesellschaftsordnung zum Nutzen aller möglich. Hier werden alle technischen Mittel planvoll eingesetzt und weiterentwickelt, weil sie Volkseigentum sind.
Von der Notwendigkeit der Elektrifizierung des Landes überzeugte LENIN bereits in den ersten Jahren der Sowjetrepublik die werktätigen Menschen. Seine Losung:

„Kommunismus ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung"

wurde zum geflügelten Wort, und die stürmische Entwicklung der sowjetischen Industrie und heute des gesamten sozialistischen Weltlagers beweist, daß LENINS Losung heute wie vor vierzig Jahren gilt.

7.3.3. Magnetisches und elektrisches Feld

Am Beispiel des elektrischen Feldes haben wir erkannt, daß die Materie in Form von Feldern auftritt (s. S. 44). Das magnetische Feld ist ebenfalls eine Zustandsform der Materie. Das erkennt man auch aus übereinstimmenden und ähnlichen Eigenschaften der beiden Felder. Beide Felder erfüllen den Raum und in ihnen treten Anziehungs- und Abstoßungskräfte auf. Sie besitzen Energie. Die Kraftrichtungen lassen sich durch Feldlinien veranschaulichen.
Es bestehen aber zwischen den beiden Feldern doch einige Unterschiede:
Die *elektrischen Felder* treten zwischen elektrischen Ladungen auf. Ihre Feldlinien haben in den Ladungen Anfang und Ende. Durch die Kräfte im elektrischen Feld können Ladungen bewegt werden.
Die *magnetischen Felder* treten in Zusammenhang mit Ladungsbewegungen auf, sei es am stromdurchflossenen Leiter oder als Folge von Elektronenbewegungen im Kristallgefüge magnetischer Stoffe. Ihre Feldlinien sind in sich geschlossen, ohne Anfang und Ende. Neben diesen unterschiedlichen Eigenschaften kann man aber den Zusammenhang zwischen den beiden Feldern nicht übersehen. Ein Versuch soll uns das deutlich machen:

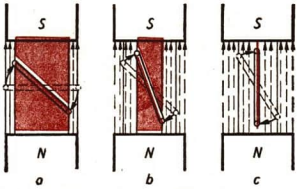


120/1
a) elektrisches Feld am geladenen Plattenkondensator
b) magnetisches Feld bei der Entladung des Plattenkondensators

In einem geladenen Plattenkondensator ist elektrische Energie gespeichert. Es besteht ein elektrisches Feld. Der Kondensator wird entladen. Die bis dahin aufgespeicherte Energie geht in Bewegungsenergie der Elektronen über. Die Elektronenbewegung ist von einem Magnetfeld begleitet.

Durch Veränderung eines elektrischen Feldes entsteht ein magnetisches Feld.

In dem Grundversuch zur Erzeugung einer Spannung in einer Spule, die man in einem Magnetfeld dreht, wird die Umkehrbarkeit dieses Satzes deutlich. Im Bild 121/1 wird gezeigt, daß sich bei der Drehung der Spule dauernd die Zahl der magnetischen Feldlinien ändert, die von den Leiterteilen der Spule umschlossen werden. Als Folge entsteht in der Spule ein elektrisches Feld, das sich durch die Spannung an den Spulenenden nachweisen läßt.



121/1 Änderung der von einer Spule umschlossenen Zahl magnetischer Feldlinien

Durch Veränderung eines magnetischen Feldes entsteht ein elektrisches Feld.

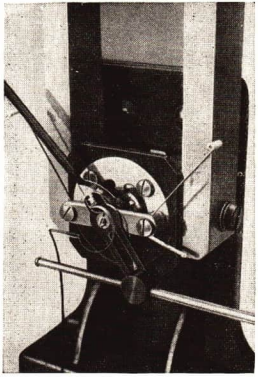
Beispiel

Die Wechselbeziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Feldern finden wir in Natur und Technik in den verschiedensten Formen. Sie werden nicht nur in vielen Geräten der Elektrotechnik wie in Generatoren, Motoren und Transformatoren ausgenutzt, sondern auch Licht-, Wärme- und Röntgenstrahlen und Funkwellen beruhen auf der Wirkung elektromagnetischer Wechselfelder.

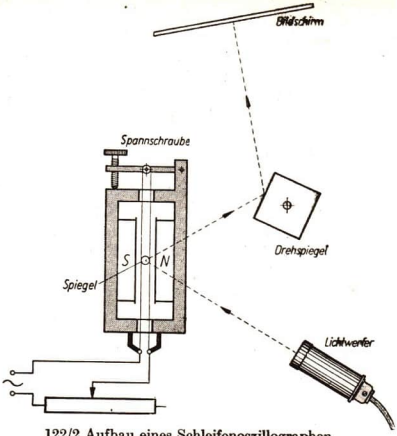
Hier konnten wir zunächst nur die einfachsten Grundlagen der Lehre von den elektrischen und magnetischen Feldern kennenlernen. So haben wir aber die Fähigkeit gewonnen, in den kommenden Schuljahren weiter in dieses Wissensgebiet einzudringen.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Legen Sie einen Stabmagneten auf den Tisch, und stellen Sie etwa 20 cm von einem seiner Pole entfernt eine Kompaßnadel auf. Bringen Sie zwischen den Magnetpol und die Kompaßnadel einen großen Nagel. Erklären Sie das Verhalten der Nadel!
2. Legen Sie einen unmagnetischen Nagel und eine unmagnetische Stahlstecknadel in Nord-Süd-Richtung, so daß sich die beiden Spitzen berühren. Nach zwei bis drei Tagen ist festzustellen, daß die beiden Körper schwach magnetisiert sind. Erklären Sie die Ursachen dafür!



122/1 Drehspulmeßwerk



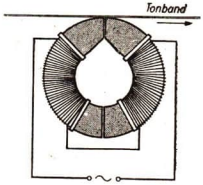
122/2 Aufbau eines Schleifenoszillographen (schematisch)

3. Bild 122/1 zeigt das Meßwerk eines Drehspulmeßinstrumentes. Erläutern Sie seine Wirkungsweise!
4. Ähnlich wie ein Spiegelgalvanometer arbeitet ein Schleifenoszillograph. Erklären Sie an Hand der schematischen Darstellung in Bild 122/2 seine Wirkungsweise!
5. Halten Sie eine unmagnetische Stativstange in Nord-Süd-Richtung, mit dem Nordende schräg nach unten. Schlagen Sie auf das Südende einige Male kräftig mit dem Hammer. Mit Eisenfeilspänen läßt sich nachweisen, daß der Stab magnetisch geworden ist. Erklären Sie die Ursachen dafür und überlegen Sie, wie Sie den magnetischen Zustand des Stabes beseitigen können!
6. Zeichnen Sie das Schaltbild eines Gleichstromkreises aus einer Akkumulatorenbatterie, drei parallelgeschalteten Glühlampen und einem Gleichstrommotor. Es ist ein Leistungsmesser anzuschließen, der die Leistung mißt, die von der Batterie abgegeben wird.
7. Ein Tonband enthält feine Eisenteilchen. Es wird bespielt, indem es an einem Spalt im Eisenkern eines Elektromagneten vorbeiläuft, in dem der Mikrofonwechselstrom fließt.

   7.1. Welche magnetischen Eigenschaften muß das Tonband besitzen?

   7.2. Bei der Wiedergabe läuft das Tonband wieder an einem Spalt eines Eisenkernes vorbei, auf dem eine Spule montiert ist. Die magnetischen Wechselfelder des Bandes rufen in der Spule Wechselspannungen hervor.
   Worin liegt die Übereinstimmung dieses Vorganges mit der Wirkungsweise eines Fahrraddynamos?

   7.3. Überlegen Sie, wodurch man die Tonbandaufzeichnungen löschen kann!



122/3 Aufnahme- und Wiedergabekopf eines Tonbandgerätes mit vorbeilaufendem Tonband

Zusammenfassung

1. **Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben.**

   Wo liegt an einer Spule der Nordpol?
   Wie kann man ihn experimentell finden?

2. **Aus der Überlagerung von Magnetfeldern entstehen Kräfte und Bewegungen.**

   Wie kann man erreichen, daß bei der Drehung einer Spule eine möglichst große Kraft entsteht?

3. **Die ferromagnetischen Stoffe zeigen besondere Eigenschaften im Magnetfeld.**

   Worin liegt die gemeinsame Ursache für den Magnetismus eines permanenten Stabmagneten und eines Elektromagneten?
   Wie unterscheidet sich das Material eines permanenten Magneten von dem Kern eines Elektromagneten?

4. **Die Drehung einer stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld kann man für Meßzwecke einsetzen.**

   Wodurch unterscheiden sich die Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser, die nach diesem Prinzip gebaut sind?

5. **In Elektromotoren wird mit Hilfe von Elektromagneten elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt.**

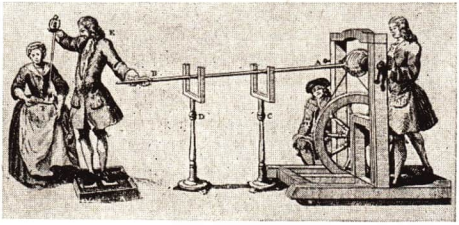
   Worin liegt die große Bedeutung der Elektroenergie für die Produktion und die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft?

6. **In der Wechselwirkung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern ist die Möglichkeit der wechselseitigen Umwandlung elektrischer und mechanischer Energie begründet.**

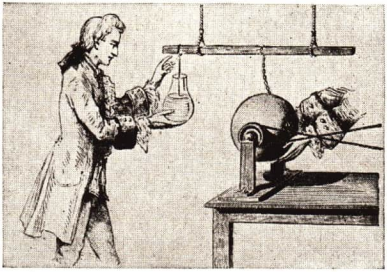
   Warum sind beide Felder Zustandsformen der Materie?

8. Die Entwicklung der Elektrizitätslehre

Obwohl die Anziehungskraft des Bernsteins bereits im Altertum bekannt war, beschäftigte man sich mit elektrischen Experimenten im größeren Umfange erst wieder im 18. Jahrhundert. Um 1730 entdeckte der Engländer STEPHAN GRAY den Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren. Die Erfindung der Reibungs-Elektrizitätsmaschine ermöglichte neue Versuche und Beobachtungen (Bild 124/1). 1745 erfand der deutsche Geistliche E. v. KLEIST die Verstärkerflasche, die Urform des Kondensators. Wahrscheinlich unabhängig davon wurde in der holländischen Universitätsstadt Leiden kurze Zeit später die gleiche Erfindung gemacht (Bild 124/2). Anfangs bestand die Verstärkerflasche nur aus einem mit Wasser gefüllten Glaskolben, in den ein Draht tauchte. Zum Draht überspringende Funken luden die Flasche auf. Später erhielten die „Leidener Flaschen" innen und außen einen Metallbelag, so daß auf



124/1 Elektrostatische Versuche
Die Person links steht isoliert und wird durch AB aufgeladen. Mit dem Degen werden Papierschnitzel angezogen.

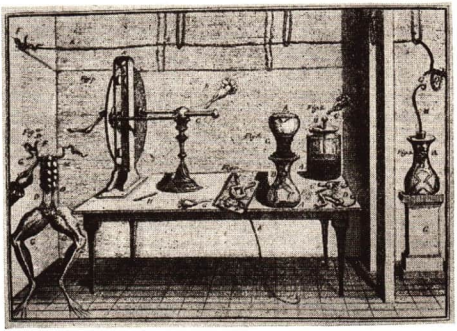


124/2 Versuch mit Leidener Flasche
Die Glaskugel wird in Drehung versetzt. Als Reibzeug dient die Hand. Welche Aufgaben haben die Kette und der an Seidenschnüren befestigte Metallstab?

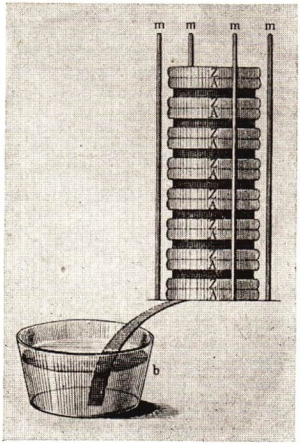
das Wasser verzichtet werden konnte. „Durch diese curiösen Entdeckungen ward eine so allgemeine Aufmerksamkeit auf die Electricität rege gemacht, daß in Teutschland und Holland elektrische Versuche, wie ein Schauspiel, für Geld aufgeführt . . . wurden", schrieb damals ein Physiker. Es gehörte bald zum guten Ton, sich mit elektrischen Experimenten zu beschäftigen, die aber mehr elektrostatische Spielereien darstellen. So ließ zum Beispiel ein französischer König zu seiner Belustigung die Gardesoldaten durch Entladungen einer Batterie Leidener Flaschen elektrisieren. Selbstverständlich wurden in der Folgezeit von wissenschaftlich arbeitenden Forschern auch bereits viele wichtige Beobachtungen gemacht, aber die Gesetzmäßigkeiten ließen sich erst erfassen, als der französische Gelehrte Charles Augustin de Coulomb 1785 die Drehwaage erfand.

Diese Erfindung erfolgte beim Untersuchen der Torsionsgesetze durch Coulomb. Sie wurde zu diesem Zeitpunkt möglich, da sich überall die Wissenschaftler mit der Mechanik beschäftigten. Anregend und auftraggebend wirkte hierbei der sich entwickelnde Kapitalismus mit seiner aufblühenden mechanischen Produktion.

Eine unerwartete Entdeckung leitete einen neuen Abschnitt der Elektrizitätslehre ein. Der italienische Professor Luigi Galvani bemerkte 1780, daß präparierte Froschschenkel zusammenzuckten, wenn in der Nähe ein elektrischer Funke übersprang (Bild 125/1). Die gleiche Beobachtung machte er, wenn Nerv und Muskel gleichzeitig durch einen Draht berührt wurden. Die Wirkung war besonders stark, wenn die Verbindung aus zwei verschiedenen Metallen bestand. Während Galvani die Ursache für alle diese Erscheinungen in einer tierischen Elektrizität vermutete, konnte der italienische Universitätsprofessor Alessandro Volta einige Jahre später nachweisen, daß die Berührung der beiden verschiedenen Metalle die Ursache für das Auftreten der elektrischen Ströme war. Die Froschschenkel stellten nur ein sehr empfindliches Elektrometer dar. Volta konstruierte 1800 die nach ihm benannte



125/1
Galvanis Arbeitsplatz
Links im Bild ein präparierter Froschschenkel (vergrößert), in der Mitte eine Scheiben-Elektrizitätsmaschine, auf dem Tisch verschiedene Versuchsanordnungen.



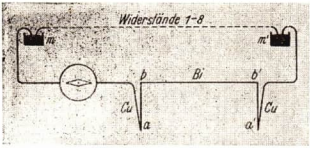
126/1 Voltasche Säule

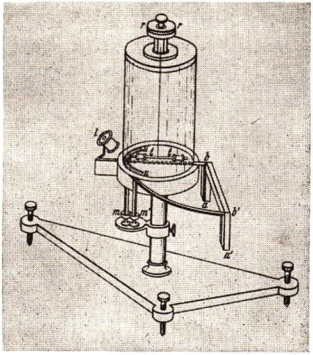
Voltasche Säule (Bild 126/1) und die Zink-Kupfer-Zelle. Damit stand eine Spannungsquelle zur Verfügung, mit deren Hilfe die wesentlichsten Gesetze der Elektrizität entdeckt wurden.

Der dänische Professor HANS CHRISTIAN OERSTED stellte 1820 fest, daß eine Magnetnadel durch den elektrischen Strom abgelenkt wird. Damit war der Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus hergestellt worden. Mit dieser Entdeckung begann ein neuer Abschnitt, der schließlich mit der Konstruktion elektrischer Generatoren und Motoren endete. Neben AMPÈRE, der unter anderem die Richtung des elektrischen Stroms bestimmte, ist in der Folgezeit vor allem Professor GEORG SIMON OHM zu erwähnen. Er stammte aus einer Schlosserfamilie und wurde 1787 in Erlangen geboren. Nach dem Studium der Mathematik und Physik wurde er Gymnasiallehrer, später Direktor einer Ingenieurschule und schließlich 1849 Professor an der Universität München. Das nach ihm benannte Gesetz veröffentlichte OHM 1827. Als Spannungsquelle benutzte er bei seinen Versuchen ein Thermoelement. Die Ergebnisse verallgemeinerte OHM in der Formel $X = \frac{a}{b+x}$, wobei X die Stärke der magnetischen Wirkung am Meßgerät ist (entspricht der Stromstärke), während a die angelegte konstante Spannung des Thermoelements bedeutet. Mit b wird der Innenwiderstand, mit x der Außenwiderstand des Schließungskreises bezeichnet (Bild 127/1).

Der Student GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF veröffentlichte 1845 die von ihm entdeckten Sätze über die Stromverzweigung und erweiterte dadurch das Ohmsche Gesetz. KIRCHHOFF wurde später besonders bekannt durch die Entdeckung der Spektralanalyse, die ihm zusammen mit ROBERT WILHELM BUNSEN gelang.

Die Zusammenhänge zwischen Wärme und Elektrizität wurden ebenfalls durch einen sehr jungen Gelehrten, den damals 22jährigen Engländer JAMES PRESCOTT JOULE, entdeckt. Er verwendete als Wärmequelle einen stromdurchflossenen Kupferdraht, der auf ein Glasrohr gewickelt war. Die Anordnung kam in ein einfaches Kalorimeter. Die an das Wasser abgegebene Wärmemenge wurde gemessen, und JOULE stellte die bekannte Abhängigkeit zwischen Wärmemenge, Stromstärke und Widerstand fest. Ein weiterer großer Physiker dieser Periode ist MICHAEL FARADAY. Er war ursprünglich Buchbinder und erwarb sich durch Selbststudium umfangreiche physikalische





127/1 Versuchsaufbau G. S. Ohms aus dem Jahre 1825. Das Thermoelement besteht aus zwei Metallen, deren Lötstellen verschiedene Temperaturen aufweisen. Dadurch entsteht eine geringe elektrische Spannung. Die verschiedenen Widerstandsdrähte werden zwischen die Hg-Näpfchen eingeschaltet. Die vom Strom abgelenkte Magnetnadel wird durch Verdrillen eines Torsionsdrahtes in die alte Lage zurückgedreht. Der Drehwinkel ist ein Maß für die Stromstärke.

und chemische Kenntnisse. Anfangs als Laborgehilfe, später als Assistent und schließlich als Direktor des Laboratoriums der Royal Institution[1] gelangen ihm wichtige physikalische Entdeckungen. 1833 veröffentlichte er die Ergebnisse seiner Arbeiten über die Elektrolyse. Faraday bewies die Gültigkeit des 1. Gesetzes mit einem „Voltameter". Das ist ein Wasserzersetzungsapparat, bei dem die entwickelten Gase aufgefangen und gemessen werden. Das 2. Gesetz wurde durch die Zersetzung von Zinn- und Bleiverbindungen bewiesen.

Von größter Bedeutung ist die von Faraday begründete Lehre von den elektrischen und magnetischen Feldern. Seine Entdeckung der elektromagnetischen Induktion bildete schließlich die Grundlage für die Entwicklung der Starkstromindustrie, die aber erst 50 Jahre später begann. Maßgebend dafür waren vor allem ökonomische Gründe. Die kapitalistischen Unternehmer scheuten vor all den für die Entwicklung notwendigen Ausgaben zurück, die erst für einen sehr späten Zeitpunkt Gewinn versprachen. Die Verwendung von Elektromotoren setzte das Vorhandensein eines elektrischen Stromnetzes voraus, das erst mit der Einführung des elektrischen Stroms für Beleuchtungszwecke auf Kosten der privaten Abnehmer geschaffen wurde.

Am Ende des 19. Jahrhunderts und im 20. Jahrhundert entwickelte sich dann die Elektroindustrie außerordentlich schnell bis zum heutigen Stand.

[1] **Royal Institution:** Englische Einrichtung zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse.

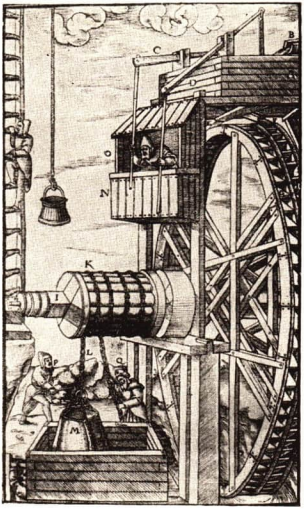
Mechanik

Im Jahre 1961 stieß zum ersten Mal ein Mensch in den Weltenraum vor: Major GAGARIN umrundete als erster in etwa 200 km Abstand die Erde. Ihm folgten andere Weltraumfahrer mit immer längeren Fahrten. Diese Taten zeigen uns, wie es der Mensch verstanden hat, die Naturgesetze, besonders auch die der *Mechanik*, nutzbar zu machen. Unser Bild zeigt die sechs sowjetischen Kosmonauten GAGARIN, TITOW, NIKOLAJEW, POPOWITSCH, BYKOWSKI und VALENTINA TERESCHKOWA.

Die Mechanik ist die Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte (Statik) und von den Bewegungen der Körper unter dem Einfluß äußerer Kräfte (Dynamik). Durch die eingehende Beschäftigung vieler Gelehrter mit diesem Teilgebiet begann im 16. und 17. Jahrhundert die stürmische Entwicklung der Physik. Die Gründe hierfür waren vor allem ökonomischer Natur. Im Schoße der Feudalgesellschaft entstand eine neue, die kapitalistische Produktionsweise. „Die bisherige feudale oder zünftige Betriebsweise der Industrie reichte nicht mehr aus für den mit neuen Märkten anwachsenden

Bedarf. Die Manufaktur trat an ihre Stelle."[1] Die Produktionsinstrumente und Produktionsverfahren wurden verbessert und vervollkommnet. Diese technischen Veränderungen hatten aber auch Auswirkungen auf die Wissenschaft.
Zum Antrieb der Blasebälge in den Eisenhütten und der Pochhämmer in den Hammerwerken dienten zum Beispiel Wasserräder. Wie KARL MARX feststellte, brachte der Betrieb dieser Anlagen neue Erkenntnisse über die Reibung und die Übertragung mechanischer Bewegungen. Ähnliches zeigte sich auf vielen anderen Gebieten, zum Beispiel im Bergbau (Bild 130/1), Geschützwesen und Uhrenbau.
Die Naturwissenschaftler benutzten seit dem Anfang des 17. Jahrhunderts die von den Praktikern gefundenen Zusammenhänge, um die Mechanik auch theoretisch und vor allem mathematisch weiterzuentwickeln. Im Gegensatz zur Wärme- und Elektrizitätslehre, deren Erforschung daher auch erst später einsetzte, waren die Gesetzmäßigkeiten der Mechanik leichter zu erkennen. Auch das war ein Grund für die vorrangige Entwicklung der Mechanik, an der Gelehrte vieler Länder mitwirkten. Zwei Wissenschaftler ragen besonders hervor:

GALILEO GALILEI (1564 bis 1642) und
ISAAC NEWTON (1643 bis 1727).



GALILEI machte Experiment und Beobachtung zur Grundlage der Naturforschung. Hatte man vor GALILEI das Experiment kaum benutzt, so vernachlässigte man nach seinem Tode zeitweise die Theorie. Aber Experimente allein genügen nicht, um eine wissenschaftliche Lehre aufzubauen. Die Beobachtungen und Einzelgesetze müssen nach einheitlichen Gesichtspunkten geordnet werden. Die umfassende Darstellung der bis dahin bekannten und neuer Gesetzmäßigkeiten der Mechanik ist das Verdienst von ISAAC NEWTON.

[1] MARX-ENGELS: Kommunistisches Manifest.

130/1 Wasserrad als Fördermaschine in einem mittelalterlichen Bergwerksbetrieb. Durch das Betätigen der Hebel *C* und *D* läßt sich der Drehsinn des Wasserrades ändern. Erklären Sie!

131/1 Kettentraktor KT 50 mit Rodegerät aus dem VEB Brandenburger Traktorenwerk
Das Rodegerät ist mit einer hydraulischen Anlage ausgestattet, die über ein Hebelgestänge auf den zu rodenden Wurzelstock wirkt. Die mechanischen Gesetzmäßigkeiten, die der Konstruktion dieses Gerätes zugrunde liegen, werden in der Mechanik erläutert

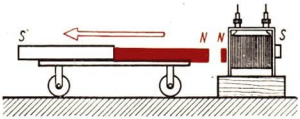
Durch die wissenschaftliche Grundlage ist es wiederum möglich, die Technik weiterzuentwickeln. Zwischen Theorie und Praxis besteht eine enge Wechselwirkung: Die eine kommt nicht ohne die andere aus.
Es gibt aber noch einen anderen Grund für die überragende Bedeutung der Mechanik. Viele Vorgänge und Erscheinungen der Physik lassen sich einfacher darstellen, wenn mechanische Gesetze und Vergleiche benutzt werden. Ein Beispiel dafür ist die Erklärung der Wärme als Bewegungsenergie der Moleküle. Die Mechanik bildet daher die Grundlage der Physik.

1. Die Kraft

Unter dem Einfluß der am Rotor wirksamen Hubkraft startet der Hubschrauber fast senkrecht zum Flug. Die Kraft ist eine der wichtigsten physikalischen Größen. Bekannt ist uns bereits, daß überall dort Kräfte wirken, wo Bewegungs- oder Formänderungen auftreten. Dabei muß aber beachtet werden, daß die Kraft nicht selbständig besteht; man kann sie nicht von der Materie trennen. Der dialektische Materialismus[1] kennt kein Nebeneinander von Kraft und Materie.

1.1. Kraftwirkungen

Man kann eine Kraft nach ihren Wirkungen beurteilen und unterscheidet eine *dynamische Kraftwirkung* und eine *statische Kraftwirkung*.
Unter dem Einwirken einer Kraft können Körper ihren Bewegungszustand verändern (dynamische Kraftwirkung).
Das Wägelchen in Bild 132/2 wird durch magnetische Kräfte in Bewegung gesetzt. Eine Holundermarkkugel wird durch elektrische Kräfte von dem geriebenen PVC-Stab angezogen. Die Reibungskraft der Bremsen bringt den Traktor zum Stillstand. Der Fußball wird durch die Muskelkraft weggeschleudert.

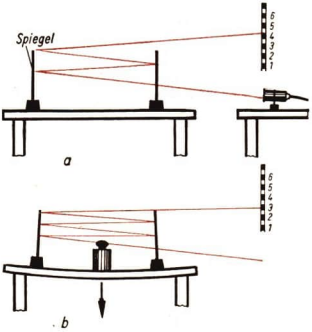


132/2 Zwischen dem Stabmagneten und dem Elektromagneten wirken magnetische Kräfte

Durch eine Kraft kann der Bewegungszustand eines Körpers geändert werden.

Kräfte können aber auch eine Formänderung eines Körpers hervorrufen (statische Kraftwirkung). Der Schmied formt den Stahl um, der Sportler zieht den Expander auseinander (Bild 133/2). Das Stroh wird durch die Strohpresse zusammengedrückt, das Sprungbrett durch das Gewicht des Schwimmsportlers gebogen.

[1] Der dialektische Materialismus ist die Philosophie des Marxismus-Leninismus.



133/1 Durch die Belastung des Tisches neigen sich beide Spiegel nach innen. Einfalls- und Reflexionswinkel ändern sich. Der Lichtstrahl trifft daher auf eine andere Stelle des Maßstabs

133/2 Der Expander ist ein Sportgerät zur Kräftigung der Muskulatur

Die Formänderung ist manchmal kaum wahrzunehmen. Durch besondere Einrichtungen kann man aber auch geringe Formänderungen nachweisen (Bild 133/1).

Durch eine Kraft können Körper verformt werden.

Beide Kraftwirkungen treten meist gleichzeitig auf. Der Volleyball wird zum Beispiel durch den Schlag verformt und außerdem weggestoßen. Zur Vereinfachung vernachlässigt man oft eine Wirkung, im genannten Beispiel etwa die Formänderung, da sie für den physikalischen Vorgang des Wegstoßens unbedeutend ist.
Für manche Kräfte sind besondere Bezeichnungen gebräuchlich, zum Beispiel *Reibungskraft*, *Luftwiderstand* und *Gewicht*.

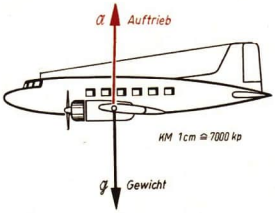
1.2. Skalare und Vektoren

In der Physik bedient man sich verschiedener Verfahren, um Zusammenhänge einfach und übersichtlich darzustellen. Zu diesen Hilfsmitteln gehört die Verwendung von Vektoren.

Wird eine physikalische Größe durch die Angabe von Zahlenwert und Maßeinheit eindeutig bestimmt, so bezeichnet man sie als *Skalar*. Die Temperatur, die Zeit, die elektrische Ladung sind zum Beispiel Skalare.
Bei vielen physikalischen Größen genügt eine solche Angabe nicht. Der Auftrieb eines Flugzeuges vom Typ Il 14 P beträgt zum Beispiel etwa 14000 kp. Von Bedeutung ist aber auch die Richtung, in der der Auftrieb wirkt und der Angriffspunkt des Auftriebs.

Erst durch die zusätzliche Angabe der Richtung und des Angriffspunktes ist der Auftrieb eindeutig bestimmt (Bild 134/1).

Physikalische Größen, die durch Angriffspunkt, Richtung, Richtungssinn und Betrag eindeutig bestimmt sind, lassen sich durch Vektoren darstellen. Sie heißen vektorielle Größen.



134/1 Der Auftrieb $\mathfrak{A}$ und das Gewicht $\mathfrak{G}$ sind vektorielle Größen. Sie werden durch die Vektoren $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{G}$ dargestellt

Die zeichnerische Darstellung erfolgt durch einen Pfeil, der die Wirkungslinie und Richtung zeigt, in der die Größe wirkt. Die Pfeilspitze gibt den Richtungssinn an, und die Länge des Pfeiles in Verbindung mit einem Maßstab veranschaulicht den Betrag, Vektoren bezeichnet man mit Frakturbuchstaben.

Tabelle 1: Gebräuchliche Frakturbuchstaben zur Bezeichnung von Vektoren

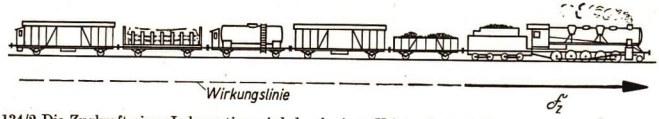
Lateinischer Buchstabe	A	a	F	G	g	K	L	R	r	S	s	T	v	W	Z
Deutscher Druckbuchstabe	$\mathfrak{A}$	$\mathfrak{a}$	$\mathfrak{F}$	$\mathfrak{G}$	$\mathfrak{g}$	$\mathfrak{K}$	$\mathfrak{L}$	$\mathfrak{R}$	$\mathfrak{r}$	$\mathfrak{S}$	$\mathfrak{s}$	$\mathfrak{T}$	$\mathfrak{v}$	$\mathfrak{W}$	$\mathfrak{Z}$
Deutscher Schreibbuchstabe	$\mathcal{A}$	$\mathcal{a}$	$\mathcal{F}$	$\mathcal{G}$	$\mathcal{g}$	$\mathcal{K}$	$\mathcal{L}$	$\mathcal{R}$	$\mathcal{r}$	$\mathcal{S}$	$\mathcal{s}$	$\mathcal{T}$	$\mathcal{v}$	$\mathcal{W}$	$\mathcal{Z}$

Soll nur der Betrag des Vektors angegeben werden, so benutzt man lateinische Buchstaben oder setzt den deutschen Buchstaben in Betragszeichen (z. B. $|\mathfrak{F}| = F$).

Beispiele

Im Bild 134/1 hat der Vektor $\mathfrak{A}$ eine Länge von 2 cm. Diese Strecke entspricht einem Betrag des Vektors von 14 000 kp (1 cm ≙ 7000 kp). Will man dagegen die gesamte physikalische Größe beschreiben, so ist außer der Angabe „A = 14 000 kp" noch die Richtungsangabe: „Der Auftrieb $\mathfrak{A}$ wirkt dem Flugzeuggewicht $\mathfrak{G}$ entgegen" erforderlich. Der Angriffspunkt muß ebenfalls angegeben werden.

Das Bild 134/2 zeigt ein weiteres Beispiel.



134/2 Die Zugkraft einer Lokomotive wird durch einen Vektor dargestellt.
Die Länge des Vektors ist ein Maß für den Betrag der Kraft. Die Pfeilspitze gibt die Richtung der Kraft an. Der Angriffspunkt der Kraft befindet sich am Zughaken

Die Kraft gehört zu den physikalischen Größen, die durch Angriffspunkt, Richtung, Richtungssinn und Betrag gekennzeichnet werden. Sie läßt sich durch einen Vektor darstellen (Bild 134/2).

1.3. Die statische Kraftmessung — Krafteinheiten

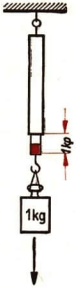
Hängt man an eine Federwaage ein Wägestück von 1 kg, so wird unter der Wirkung des Gewichts die Schraubenfeder gedehnt. Bei Normalbedingungen (45. Breitengrad, Meereshöhe) beträgt die auf das Kilogramm wirkende Kraft ein Kilopond (1 kp). Eine beliebige Kraft, die die Schraubenfeder um denselben Betrag dehnt, hat dann ebenfalls die Größe von einem Kilopond. Bei dieser *statischen Kraftmessung* vergleicht man also die durch Kräfte hervorgerufenen Formänderungen. Bei doppelter Verlängerung der Feder wirkt eine Kraft von $F = 2$ kp, bei dreifacher Verlängerung eine Kraft von $F = 3$ kp, usf.

(Vergleiche 2.2.: Hookesches Gesetz und 3.: Zusammensetzen von Kräften.)

Das Kilopond (kp) ist eine Maßeinheit der Kraft.

Abgeleitete Krafteinheiten sind das Megapond (Mp), das Pond (p) und das Millipond (mp).

$$1\ \text{Mp} = 1000\ \text{kp} = 10^3\ \text{kp}$$
$$1\ \text{kp} = 1000\ \text{p} = 10^3\ \text{p}$$
$$1\ \text{p} = 1000\ \text{mp} = 10^3\ \text{mp}$$



135/1 Auf das Kilogrammstück wirkt eine Kraft von 1 kp

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Stellen Sie je fünf noch nicht im Lehrbuch genannte Beispiele für statische und dynamische Kraftwirkungen zusammen!
2. Beim Fußballspiel schießt ein Spieler den Ball gegen den Torpfosten. Erklären Sie an diesem Beispiel die Wirkungen von Kräften!
3. Eine Scherzfrage: Was geschieht, wenn sich eine Mücke auf eine Eisenbahnschiene setzt? Antwort: Die Schiene biegt sich durch! Geben Sie eine Erklärung!
4. Wickeln Sie einen Stahldraht um einen runden Stab und stellen Sie sich so eine Feder her! Biegen Sie oben und unten einen Haken! Hängen Sie verschiedene Wägestücke an, und notieren Sie jeweils die Verlängerung der Feder! Dieselben Verlängerungen können Sie dann durch verschieden starkes Ziehen mit einem Finger erreichen.

2. Die Formung fester Körper

Der Bogen zählt neben dem Faustkeil und dem Spieß zu den ältesten Jagdgeräten des Menschen. Heute wird das Bogenschießen vor allem als Sport betrieben. In vielen Betriebssportgemeinschaften beteiligen sich die Sportschützen an den Wettkämpfen. Kraft und Geschicklichkeit erfordert die Bedienung des Bogens. Welche Eigenschaften muß das Material besitzen, aus dem der Bogen hergestellt wird?

2.1. Elastische Formung

Beim Einwirken von Kräften können Körper verformt werden. Nehmen die Körper beim Aufhören der Kraftwirkung ihre urprüngliche Form wieder an, so bestehen sie aus *elastischen Stoffen*.

Tabelle 2: Beispiele für elastische Formung

Beanspruchter Körper	Beanspruchung auf	Art der Verformung
Kranseil	Zugfestigkeit	Dehnung
Stützpfeiler	Druckfestigkeit	Stauchung (negative Dehnung)
Eisenbahnschiene	Biegefestigkeit	Biegung
Stahlbohrer	Verdrehungsfestigkeit	Drillung (Torsion)
Kurbelwelle im Motor	Biege- und Verdrehungsfestigkeit	Biegung und Drillung

Wenn die wirkende Kraft eine gewisse Grenze überschreitet, erfolgt keine elastische, sondern eine bleibende Verformung oder eine Zerstörung des Körpers. Beispielsweise wird eine Fahrradspeiche durch starkes Biegen bleibend verformt, eine Rasierklinge durch starkes Biegen zerbrochen.

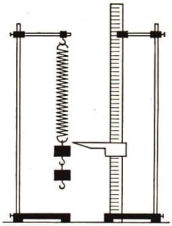
2.2. Die elastische Verlängerung einer Schraubenfeder und eines Drahtes

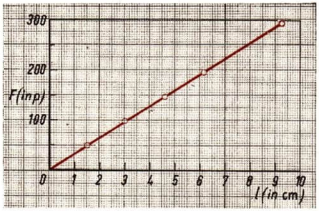
Der Zusammenhang zwischen der Größe der wirkenden Kraft und der Größe der Verlängerung einer Schraubenfeder aus Stahl läßt sich an einem Versuch nach Bild 137/1 ermitteln. Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Abhängigkeit der Verlängerung einer Schraubenfeder von der Belastung

Belastungszunahme ΔF (in p)	Gesamtbelastung F (in p)	Zuwachs der Verlängerung Δl (in cm)	Gesamtverlängerung l (in cm)	$\frac{F}{l}$ (in p · cm^{-1})
0	0	—	—	—
50	50	1,5	1,5	33,3
50	100	1,5	3,0	33,3
50	150	1,6	4,6	32,6
50	200	1,5	6,1	32,8
100	300	3,1	9,2	32,6

● *Erklären Sie die in der Tabelle 3 angeführten Begriffe! In welchem Falle entspricht Δl der Größe l?*



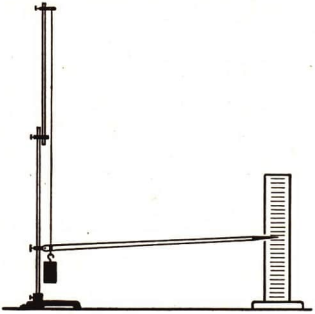


137/1 Versuchsanordnung und grafische Darstellung der Federverlängerung

Um physikalische Gesetze aus Meßreihen zu erkennen, bildet man den Quotienten oder das Produkt aus zwei zusammengehörigen Größen. Ist der Quotient für alle Wertepaare der Meßbereiche konstant, so besteht zwischen den Größen direkte Proportionalität. Produktgleichheit bedeutet entsprechend indirekte Proportionalität zwischen den Größen.

Der Versuch hat folgendes Ergebnis:
Die Meßwerte der Gesamtverlängerung liegen bei der grafischen Darstellung auf einer Geraden (Bild 137/1). Das Verhältnis $\frac{F}{l}$ ist für jede Belastung nahezu konstant. Zwischen Kraft und Gesamtverlängerung besteht eine direkte Proportionalität:

$$l \sim F.$$



138/1 Versuchsanordnung zum Nachweis der elastischen Dehnung eines Drahtes. Der Draht ist in einer flachen Kerbe einmal um den Holzzeiger geschlungen. Der Zeiger kann sich um einen Lagerzapfen drehen. Beachten Sie Aufgabe 8, Seite 144

Die Gesamtverlängerung l einer Schraubenfeder ist der Gesamtbelastung F proportional.

Führt man den Proportionalitätsfaktor k ein, so erhält man die Gleichung

$$F = k \cdot l.$$

Der Proportionalitätsfaktor k hängt vom Material und der Beschaffenheit der Feder ab. Man bezeichnet ihn als *Federkonstante.* Auch die Dehnung eines Stahldrahtes ist der wirkenden Kraft proportional, wie man einem Versuch nach Bild 141/1 entnehmen kann. Bezeichnet man die Verlängerung mit l, so folgt

$$\Delta l \sim F.$$

Verwendet man Drähte gleicher Länge und gleichen Werkstoffs, die aber einen unterschiedlichen Querschnitt aufweisen, so erhält man die Beziehung

$$\Delta l \sim \frac{1}{A}.$$

Schließlich wächst die Verlängerung Δl mit der Drahtlänge l:

$$\Delta l \sim l.$$

Zusammenfassend ist festzustellen:

Die elastische Verlängerung eines Drahtes ist der wirkenden Kraft und der Drahtlänge direkt proportional, dem Drahtquerschnitt indirekt proportional.

$$\Delta l \sim \frac{F \cdot l}{A} \quad \text{Statt dessen kann man auch schreiben:} \quad \frac{\Delta l}{l} \sim \frac{F}{A}$$

Eine Vereinfachung ergibt sich, wenn für die beiden Quotienten zwei neue Begriffe benutzt werden:

$\frac{\text{Verlängerung}}{\text{Gesamtlänge}} = \text{Dehnung}$	$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$	(25.1)
$\frac{\text{Kraft}}{\text{Querschnitt}} = \text{Spannung}^1$	$\frac{F}{A} = \sigma$	(25.2)

[1] Die Spannung σ hat nichts mit dem Spannungsbegriff der Elektrizitätslehre zu tun. σ hat die Maßeinheit eines Drucks, zum Beispiel $\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$. ε: epsilon, σ: sigma (griechische Buchstaben).

Damit folgt das allgemeine **Hookesche Gesetz:**

$$\varepsilon = k \cdot \sigma$$

Dehnung und Spannung sind bei elastischen Verformungen einander proportional.

Dieses Gesetz gilt für alle elastischen Verformungen, nicht nur für die von Schraubenfedern und Drähten. Es wurde 1680 von dem englischen Physiker ROBERT HOOKE gefunden. Man kann es in der lateinischen Fassung als das kürzeste Gesetz der Physik bezeichnen:

„ut tensio sic vis"[1]

2.3. Der Elastizitätsmodul

Durch einen Proportionalitätsfaktor $\frac{1}{E}$ kann die Proportionalität $\varepsilon \sim \sigma$ als Gleichung geschrieben werden:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma$$

Die Größe E heißt der Elastizitätsmodul[2]. Er ist eine Materialkonstante und gibt die Spannung an, die theoretisch die ursprüngliche Körperlänge verdoppeln würde. Meist tritt aber schon vor Erreichen dieser Verlängerung der Bruch ein.

$$\boxed{\textbf{Elastizitätsmodul} = \frac{\textbf{Spannung}}{\textbf{Dehnung}} \quad \Big| \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}} \tag{26}$$

Durch eine einfache Überlegung läßt sich die Bedeutung des Elastizitätsmoduls ermitteln: Der Elastizitätsmodul ist nach Definition der Quotient aus Spannung und Dehnung. Ein Bruch hat einen großen Wert, wenn der Zähler groß und der Nenner klein ist. Ein großer Elastizitätsmodul bedeutet demnach, daß trotz des Wirkens großer Zugkräfte (Spannung!) nur eine geringe Dehnung eintritt.

Beispiel

Ein Kupferdraht mit der Länge $l = 800$ mm und dem Querschnitt $A = 0{,}07\ \text{mm}^2$ wird durch eine Kraft von 0,1 kp um 0,09 mm gedehnt.
Der Elastizitätsmodul von Kupfer ist zu bestimmen!

Gegeben:

Länge $l = 800$ mm
Querschnitt $A = 0{,}07\ \text{mm}^2$
Belastung $F = 0{,}1$ kp
Verlängerung $\Delta l = 0{,}09$ mm

Gesucht:

Elastizitätsmodul E_{cu}

Lösung: $E_{cu} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

$$E_{cu} = \frac{l \cdot F}{\Delta l \cdot A}$$

$$E_{cu} = \frac{800\ \text{mm} \cdot 0{,}1\ \text{kp}}{0{,}09\ \text{mm} \cdot 0{,}07\ \text{mm}^2}$$

$$\underline{\underline{E_{cu} \approx 12{,}7 \cdot 10^3\ \text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}}}$$

Der Elastizitätsmodul von Kupfer beträgt ungefähr $12{,}7 \cdot 10^3\ \text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}$.

[1] (lat.) wörtlich: Wie die Dehnung, so die Kraft. [2] Modul: Maß (von lat. módulus)

Für einen Stahldraht gleicher Abmessungen erhält man mit $F = 0{,}1$ kp und $\Delta l = 0{,}053$ mm für den Elastizitätsmodul nachstehenden Wert:

$$E_{st} = \frac{l \cdot F}{\Delta l \cdot A}$$

$$E_{st} = \frac{800\,\text{mm} \cdot 0{,}1\,\text{kp}}{0{,}053\,\text{mm} \cdot 0{,}07\,\text{mm}^2}$$

$$\underline{\underline{E_{st} \approx 21{,}6 \cdot 10^3\,\text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}}}$$

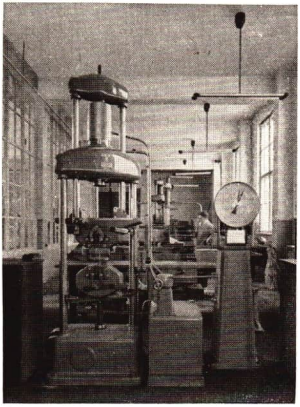
Der Elastizitätsmodul von Stahl beträgt etwa $21{,}6 \cdot 10^3$ kp · mm^{-2}.

2.4. Das Spannung-Dehnung-Diagramm

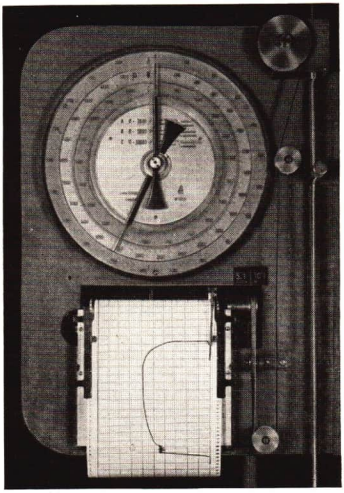
Die Zugfestigkeit von Werkstoffen wird mit besonderen Prüfmaschinen untersucht (Bild 140/1). Ein Probestab wird dabei bis zum Bruch gedehnt. Eine Schreibvorrichtung zeichnet eine Kurve, welche die Abhängigkeit der Verlängerung des Stabes von der wirkenden Zugkraft angibt (Bild 141/1).

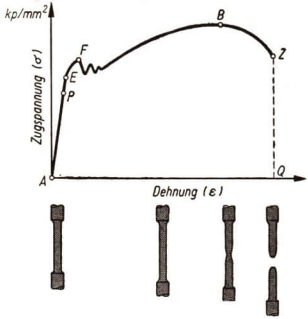
Dem Diagramm kann man die Abhängigkeit der Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ von der Zugspannung $\sigma = \frac{F}{A}$ entnehmen (Bild 141/2).

Mit zunehmender Belastung steigt die Kurve zuerst geradlinig an: Die Dehnung ist der Zugspannung proportional. Es gilt das Hookesche Gesetz. Beim Überschreiten der *Proportionalitätsgrenze* P wächst die Verformung stärker als die Zugspannung. Schließlich wird der Punkt E, die *Elastizitätsgrenze*, erreicht. Oberhalb von E treten bleibende Verformungen auf. Nach Überschreiten der *Fließgrenze* F nimmt die Dehnung stark zu; das Material beginnt zu „fließen". Es ist plastisch geworden und verhält sich wie eine außerordentlich zähe Flüssigkeit.



140/1 Werkstoffprüfmaschine. In der modernen Technik kommt der Materialprüfung besondere Bedeutung zu. Für die Festigkeit der einzelnen Werkstoffe sind bestimmte Mindestwerte amtlich festgelegt worden. Mit Hilfe besonderer Prüfmaschinen wird das Material vor der Weiterverarbeitung in dieser Hinsicht laufend überprüft. Welche Beispiele für Materialprüfungen kennen Sie? Worin liegt die volkswirtschaftliche Bedeutung der Materialprüfung?





141/2 Spannung-Dehnung-Diagramm für Flußstahl

141/1 Zeiger und Schreibvorrichtung einer Werkstoffprüfmaschine

Diese Erscheinung ist ein Beispiel für eines der Grundgesetze des dialektischen Materialismus, des Gesetzes vom dialektischen Sprung. Es wurde von KARL MARX und FRIEDRICH ENGELS erkannt und besagt, daß quantitative[1] Veränderungen beim Überschreiten einer gewissen Grenze zu einem qualitativ[2] neuen Zustand führen.

- *Worin besteht die quantitative Veränderung?*
- *Welches ist die qualitative Veränderung?*

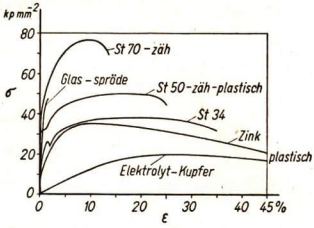
Die größte Zugspannung wird im Punkt B unter Einwirkung der Bruchlast F_B erreicht. Der Stab schnürt sich ein und reißt schließlich im Punkt Z.
Als *Zugfestigkeit* σ_B bezeichnet man den Quotienten aus der in B wirkenden maximalen Kraft F_B und dem ursprünglichen Stabquerschnitt A_0 vor der Verformung.

$$\text{Zugfestigkeit} = \frac{\text{Bruchlast}}{\text{Querschnitt}} \qquad \sigma_B = \frac{F_B}{A_0} \tag{27}$$

Mit Hilfe des Spannung-Dehnung-Diagramms kann man leicht erkennen, ob Stoffe spröde, plastisch oder zäh sind (Bild 142/1).
Bricht der Stoff sofort nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze, so ist er *spröde*. Er läßt sich nicht unelastisch verformen. Beispiele: Grauguß, gehärteter Stahl, Glas.

[1] quantitativ: der Menge, der Größe nach. [2] qualitativ: der Beschaffenheit, der Art nach.

Bei *plastischen Stoffen* erfolgt eine bleibende Verformung. Die Zugspannung wächst während des Fließens nicht an. Beispiele: Knetmasse, Elektrolytkupfer (bedingt).
Zähe Stoffe sind ebenfalls unelastisch formbar. Die Zugspannung nimmt aber während des Fließens noch zu. Beispiele: Stahl, Aluminium, Dederon.



142/1 Spannung-Dehnung-Diagramm spröder, plastischer und zäher Stoffe

Tabelle 4: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit einiger Werkstoffe

Stoff	Elastizitätsmodul[1] E (in kp · mm^{-2})	Zugfestigkeit σ_B (in kp · mm^{-2})
Dural (*Al-Cu-Mg*)	7200	42 ··· 58
Blei	1700	1,7 ··· 2,2
Stahl: *St* 37	21000	37 ··· 44
St 70	22000	70 ··· 85
Federstahl gehärtet	22000	120 ··· 150
Grauguß *GG*-14	10000	11 ··· 16
Kupfer, hart gezogen	11500	38 ··· 14
Wolfram	36200	420 ··· 700
Zinn	5500	2
Glas	5000 ··· 8000	···
Holz, parallel zur Faser	900 ··· 1300	7 ··· 13
Holz, senkrecht zur Faser	40 ··· 110	0,75 ··· 1,5

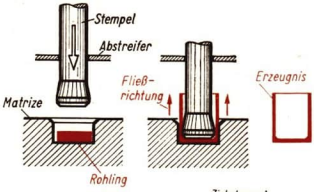
2.5. Formgebung durch Schmieden, Pressen und Ziehen

Die stetige Steigerung der Arbeitsproduktivität bildet die Grundlage für den weiteren Aufschwung unserer sozialistischen Wirtschaft. Das ist unter anderem möglich durch bessere Fertigungsverfahren. Arbeitsgänge, die einen hohen Zeitaufwand erfordern, wie das Drehen und Fräsen, können zum Beispiel manchmal durch „spanloses" Umformen ersetzt werden. Dazu zählen das Schmieden, Pressen und Ziehen. Die Umformung erfolgt dabei durch Schlag oder Druck. Voraussetzung ist jedoch, daß sich die Werkstoffe plastisch verhalten.

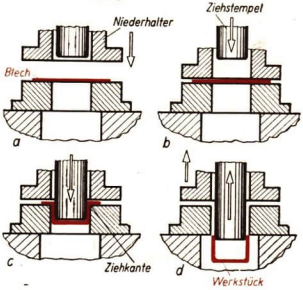
● *Was bedeutet Plastizität?*

Bei der *Kaltumformung* sind der Formänderung durch die Werkstoffeigenschaften Grenzen gesetzt. Soll eine starke Umformung erfolgen, dann muß das Werkstück vorher erwärmt werden. Man spricht von *Warmumformung*. Dazu gehört zum Beispiel auch das Schmieden.

[1] Die angegebenen Werte sind Durchschnittswerte.



143/1 Fließpressen einer Hülse. Hohle Werkstücke aus weichem Stahl, Kupfer und Aluminium können durch Fließpressen hergestellt werden. Der kalte Werkstoff fließt unter dem Druck eines Stempels in eine Matrize



143/2 Beim Tiefziehen werden ebene Blechrohlinge in Hohlteile umgeformt. Dieses Verfahren wird bei der Herstellung von Karosserien angewendet

a) Der Niederhalter geht nach unten und hält das Blech fest

b) Der Ziehstempel trifft auf das Blech

c) Das Blech wird über die Ziehkante in die Hohlform gedrückt. Der Werkstoff „fließt" von außen nach

d) Ziehstempel und Niederhalter gehen nach oben

Es gibt sehr viele technische Verfahren der spanlosen Formgebung. Das Fließpressen und Tiefziehen ist in den Bildern 143/1 und 143/2 dargestellt.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Berechnen Sie die Federkonstante einer Schraubenfeder, bei der eine Kraft von 2 kp eine Verlängerung von 5 cm bewirkt! (Angabe in $kp \cdot m^{-1}$)!
2. Ein Aluminiumdraht von 2 m Länge und einem Durchmesser von 0,2 cm wird durch eine Kraft von 23 kp um 2 mm gedehnt. Ermitteln Sie den Elastizitätsmodul E! Beachten Sie: In der Technik ist für den Elastizitätsmodul die Maßeinheit $kp \cdot mm^{-2}$ gebräuchlich. Alle Längeneinheiten sind daher entsprechend umzuwandeln.
3. Ein Prüfstab aus Grauguß reißt bei einer maximalen Zugbelastung von 6,28 Mp. Der Durchmesser des Stabes betrug 20 mm. Bestimmen Sie die Zugfestigkeit σ_B in $kp \cdot mm^{-2}$!
4. Ein dünner Kupferdraht wird an zwei Rundhölzern oder Metallstäben befestigt. Man ermittelt Drahtlänge und Querschnitt. Wird das eine Rundholz mit den Füßen an den Boden gedrückt und das andere mit den Händen langsam hochgestemmt, so verlängert sich der Draht (Bild 143/3).

143/3 Nachweis der elastischen Dehnung eines Drahtes

Führen Sie den Versuch bis zum Zerreißen aus (nicht ruckartig ziehen)!
4.1. Woran erkennen Sie das Überschreiten der Fließgrenze?
4.2. Um wieviel Prozent hat sich der Kupferdraht insgesamt gedehnt?
4.3. Steht Ihnen eine sogenannte Lumpenwaage zur Verfügung, so können Sie auch die Zugfestigkeit σ_B bestimmen. Klemmen Sie in den Zeigerschlitz ein kleines Korkstückchen! Es wird durch den Zeiger mitgenommen und markiert die maximale Kraft F_{max}.

5. Beschreiben Sie die Wirkungsweise einer Federwaage auf der Grundlage des Hookeschen Gesetzes! Skizzieren Sie zwei Vorschläge, wie auch ohne Schraubenfeder eine Kraftmessung möglich wäre! (Hinweis: Blattfeder, Spiralfeder).

6. Vergleichen Sie die Spannung-Dehnung-Kurven der Stahlsorten in Bild 142/1 miteinander!
6.1. *St* 34 und *St* 50 sind „weiche" Stähle. Begründung aus dem Kurvenverlauf!
6.2. Welche Eigenschaft besitzt *St* 70?
6.3. Vergleichen Sie die Zugfestigkeiten der Stahlsorten!

7. Veranschaulichen Sie sich an Hand einer Stange aus Knetmasse die Begriffe Dehnung, Stauchung, Biegung und Torsion!

8. Führen Sie einen Versuch zum Nachweis der elastischen Dehnung eines Drahtes selbst durch. Bauen Sie mit eigenen Mitteln eine entsprechende Versuchsanordnung (vergleiche Bild 138/1)! Die Verlängerung des Drahtes läßt sich entsprechend Bild 144/1 ermitteln. Warum darf bei der Berechnung der Strahlensatz angewandt werden?

144/1 Berechnung der Drahtverlängerung: $x : 40 = 60 : 240$

Zusammenfassung

1. Kräfte kann man nach ihren Wirkungen beurteilen.

Nennen Sie statische und dynamische Kraftwirkungen!

2. Kräfte sind durch Angriffspunkt, Richtung, Richtungssinn und Betrag gekennzeichnet.

Mit welchen Hilfsmitteln lassen sie sich darstellen?
Was sind Skalare?

3. Das Kilopond ist eine Maßeinheit der Kraft.

Welche anderen Maßeinheiten für Kräfte kennen Sie?

4. Bei der elastischen Formung nehmen die Körper die ursprüngliche Form wieder an, wenn die Kraftwirkung aufhört.

Woran erkennt man eine unelastische Formung?

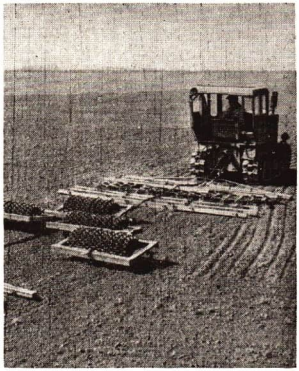
5. Die elastische Verlängerung einer Schraubenfeder ist der angreifenden Kraft proportional.

Welche Verhältnisse herrschen bei der elastischen Dehnung eines Drahtes?

6. Dehnung und Spannung sind bei elastischen Verformungen einander proportional.

Erklären Sie diese Begriffe an einer grafischen Darstellung!

3. Zusammensetzen von Kräften mit gleicher Wirkungslinie



Die Arbeitszeit bei landwirtschaftlichen Bestellungsarbeiten kann unter anderem durch Gerätekombination und Gerätekopplung verkürzt werden. Außerdem wird dadurch das Zugvermögen des Traktors besser genutzt. Bei der Gerätekombination setzt jedes Anhängegerät der Bewegung in Fahrtrichtung einen Widerstand, eine Kraft, entgegen. Der Traktor muß eine Mindestkraft aufbringen, um den Widerstand aller Geräte zu überwinden.

3.1. Zusammensetzen gleichgerichteter Kräfte

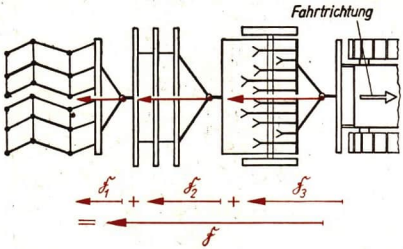
Bei der Behandlung der nachfolgenden Kapitel müssen wir zunächst voraussetzen, daß die betrachteten Körper durch die auf sie einwirkenden Kräfte nicht verformt werden. Solche Körper werden in der Physik als starr bezeichnet.

Vektoren können durch besondere Verfahren miteinander verknüpft werden. Zu diesen Verfahren gehört die Addition von Vektoren.
Bei gleicher Wirkungslinie und gleicher Richtung der Vektoren ist die *vektorielle Addition* besonders einfach. Man trägt in diesem Fall am Ende des ersten Vektors den zweiten Vektor an. Daran fügt man den dritten usw. Die Reihenfolge ist dabei beliebig.
Der neue Vektor, gemessen vom Angriffspunkt der ersten Kraft bis zum Endpunkt (Pfeilspitze) der letzten Kraft heißt die *Resultierende*[1].

Bei der Gerätekombination[2] landwirtschaftlicher Anhängegeräte wirken die Einzelkräfte entgegen der Fahrtrichtung. Sie addieren sich.

Die Kräfte $\mathfrak{F}_1$, $\mathfrak{F}_2$ und $\mathfrak{F}_3$ in Bild 146/1 haben die gleiche Wirkungslinie. Da sie an starren Körpern angreifen, dürfen sie längs der Wirkungslinie verschoben werden. Die Resultierende oder Gesamtkraft erhält man durch die eben erläuterte grafische

[1] von resultare (lat.): sich ergeben.
[2] Gerätekombination: Verbindung verschiedener Geräte zur gleichzeitigen Durchführung verschiedener Arbeitsgänge.
Gerätekopplung: Verbindung gleichartiger Geräte zur Vergrößerung der Arbeitsbreite.



146/1 Kombination von Grubber, Schleppe und Egge (in Fahrtrichtung gesehen). Welche Aufgaben haben die einzelnen Geräte?

Addition. Die Gesamtkraft hat, wie jeder Vektor, einen Angriffspunkt, eine Richtung und einen Betrag.

Die mathematische Schreibweise für diese Art der Verknüpfung von Vektoren ist

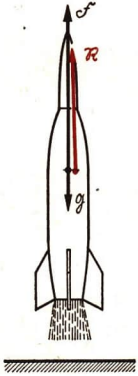
Gesamtkraft = vektorielle Summe aller Teilkräfte	$\mathfrak{F} = \mathfrak{F}_1 + \mathfrak{F}_2 + \cdots + \mathfrak{F}_n.$	(28)

Den *Betrag* der Gesamtkraft erhält man bei gleichgerichteten Kräften als algebraische Summe der Einzelbeträge:

$$F = F_1 + F_2 + \cdots + F_n$$

3.2. Zusammensetzen entgegengesetzt gerichteter Kräfte

Haben die Vektoren die gleiche Wirkungslinie, aber entgegengesetzte Richtung, so erhält man ebenfalls die Resultierende als vektorielle Summe der Teilkräfte. Die mathematische Schreibweise ist die gleiche wie bei Kräften mit gleichem Richtungssinn. Zur zeichnerischen Bestimmung verschiebt man einen Vektor mit seinem Angriffspunkt bis zur Pfeilspitze des anderen Vektors. Die Reihenfolge ist beliebig, jedoch muß die Richtung berücksichtigt werden. Der Vektor, gemessen vom ursprünglichen Angriffspunkt bis zur letzten Pfeilspitze, ist die Resultierende (Bild 146/2). Bei entgegengesetzter Richtung der Teilkräfte darf man ihre Beträge nicht einfach algebraisch addieren. Das ist nur möglich, wenn man (willkürlich) den Kräften einer Richtung ein negatives Vorzeichen gibt.



146/2 Beim Start einer Rakete wirken in entgegengesetzter Richtung die Schubkraft $\mathfrak{F}$ und das Gewicht $\mathfrak{G}$. Die vektorielle Addition ergibt die Resultierende $\mathfrak{R}$

Beispiel

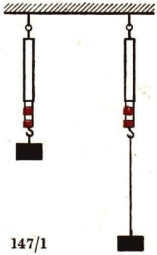
Betrag der Schubkraft einer Rakete: $F = +\,80\,000$ kp; Betrag des Gewichtes der Rakete: $G = -\,20\,000$ kp. Gesucht ist der Betrag der resultierenden Kraft.

Lösung: $R = +\,80\,000\text{ kp} + (-\,20\,000\text{ kp})$
$R = +\,80\,000\text{ kp} - 20\,000\text{ kp}$
$R = +\,60\,000\text{ kp}$

Das Vorzeichen kennzeichnet die Richtung der Resultierenden.

Sehr oft tritt der Fall ein, daß entgegengesetzte Kräfte den gleichen Betrag aufweisen. Die Kräfte sind im Gleichgewicht. Die vektorielle Addition ergibt einen resultierenden Vektor vom Betrag Null.

Auf dem Gleichgewichtszustand zweier Kräfte beruht die statische Kraftmessung. Eine belastete Federwaage ist im Gleichgewicht, wenn das Gewicht des angehängten Körpers und die Federkraft den gleichen Betrag aufweisen.



147/1

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Warum zeigen die beiden Federwaagen nach Bild 147/1 die gleiche Kraft an?
(Das Fadengewicht ist zu vernachlässigen.)

2. Bestimmen Sie die Gesamtkraft, die der Traktor zum Ziehen der gekoppelten Geräte (Grubber, Schleppe, schwere Egge) nach Bild 146/1 aufbringen muß. Benutzen Sie Tabelle 5!

Tabelle 5: Zugkraftbedarf landwirtschaftlicher Geräte auf mittleren Böden (Durchschnittswerte)

Gerät	erforderliche Zugkraft (in kp)	Gerät	erforderliche Zugkraft (in kp)
Zweischarpflug	380	Grubber	370
Dreischarpflug	630 ··· 1000	Cambridgewalze	150
Krümelwalzenegge	100	Holzwalze	100
Schleppe	250	Drillmaschine	120
schwere Egge	150	Mähbinder	500
Scheibenegge	500	Kopplungsbalken	30

3. Sie fahren mit dem Fahrrad bei Vorderwind beziehungsweise bei Rückenwind. Welche Wirkungen haben die auftretenden Kräfte?

4. Mit gleicher Wirkungslinie greifen an einem Punkte A die Kräfte mit den Beträgen $F_1 = 10$ kp, $F_2 = 42$ kp, $F_3 = 0{,}013$ Mp, $F_4 = 85$ p, $F_5 = 2000$ mp und $F_6 = 2{,}8$ kp an. $\mathfrak{F}_1$, $\mathfrak{F}_2$ und $\mathfrak{F}_5$ bilden mit $\mathfrak{F}_3$, $\mathfrak{F}_4$ und $\mathfrak{F}_6$ einen Winkel von 180°. Wie groß ist die Resultierende?

5. Bestimmen Sie zeichnerisch die Resultierende nach Bild 147/2! Welche Wirkung hat die Gesamtkraft $\mathfrak{R}$?
Maßstab: 1 cm ≙ 20 kp.

147/2 Auf den fahrenden Rennwagen wirkt in Fahrtrichtung die Zugkraft $\mathfrak{Z}$, in entgegengesetzter Richtung der Widerstand $\mathfrak{W}$ (Luftwiderstand und Reibung)

4. Zusammensetzen und Zerlegen nichtparalleler Kräfte

Als im Segelflug um 1922 die ersten Stundenflüge vollbracht wurden, gab es noch keine bessere Startmethode als den Gummiseilstart. Um das Flugzeug geradlinig nach vorn in die Luft zu schnellen, zogen zwei Mannschaften links und rechts schräg zur Startrichtung an je einem Seil. Das Flugzeug bewegte sich nach der Freigabe durch die Haltemannschaft geradlinig vorwärts. Die Richtung hängt ab von den Größen und den Richtungen der beiden Seilkräfte.

4.1. Kräfteparallelogramm

Im vorstehenden Abschnitt wurden Kräfte mit gleicher Wirkungslinie vektoriell addiert. Grundsätzlich gilt:

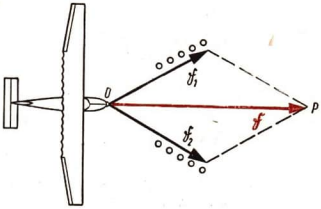
Kräfte beliebiger Richtung können vektoriell addiert werden.

Man muß dabei nicht nur die Größe, sondern auch die Richtung und den Richtungssinn beachten.

Eine rechnerische Lösung solcher Aufgaben ist bei nichtparallelen Kräften nur mit geometrischen Mitteln möglich (Trigonometrie). Aus diesem Grunde kann im folgenden nur die zeichnerische Lösungsmethode erläutert werden.

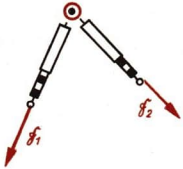
Beim Gummiseilstart haben wir das Zusammenwirken zweier Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ mit verschiedenen Kraftrichtungen kennengelernt. Das Zustandekommen einer gemeinsamen Kraft $\mathfrak{F}$ (Bild 148/1) kann man unter der Voraussetzung zeitlich nacheinander wirkender Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ erklären.

Die zeichnerische Lösung dieser Aufgabe gelingt mit dem sogenannten *Kräfte-*



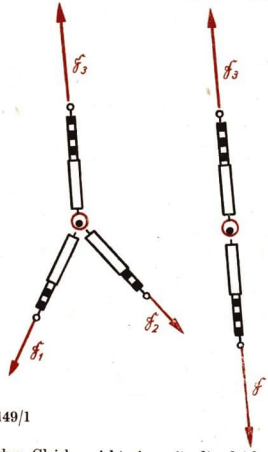
148/1

parallelogramm. Man verschiebt dazu die Vektoren $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ parallel so weit, daß zusammen mit den ursprünglichen Kraftpfeilen ein Kräfteparallelogramm entsteht. Die Diagonale dieses Parallelogramms stellt dann die *Gesamtkraft* $\mathfrak{F}$ dar.
Die Gesamtkraft $\mathfrak{F}$ hat dieselbe Wirkung wie die beiden Einzelkräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$. $\mathfrak{F}$ heißt deshalb auch Ersatzkraft.



Man kann dieses Zusammenwirken der Kräfte auch mit einem einfach durchzuführenden Experiment überprüfen:

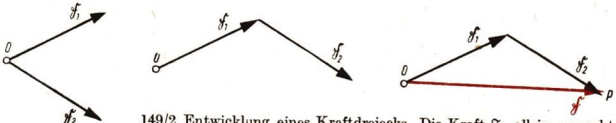
Auf einen Nagel, der in ein Brett geschlagen ist, wirken über einen Ring die Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$. Zur Anzeige benutzen wir zwei Federwaagen (Bild 149/1). Lassen wir an dem Ring eine Kraft $\mathfrak{F}_3$ in entgegengesetzter Richtung wirken, bis der Nagel entlastet ist, dann herrscht zwischen den Kräften Gleichgewicht. Ersetzen wir nun noch $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ durch eine Kraft $\mathfrak{F}$, dann muß diese bei fortbestehendem Gleichgewicht einerseits die gleiche Größe wie $\mathfrak{F}_3$ besitzen und andererseits der Wirkung der Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ entsprechen.



149/1

4.2. Kräftedreieck

In der Technik ist es üblich, statt des Kräfteparallelogramms das *Kräftedreieck* zu zeichnen. Es entspricht der trigonometrischen Berechnungsmethode und stellt auch eine Vereinfachung dar.



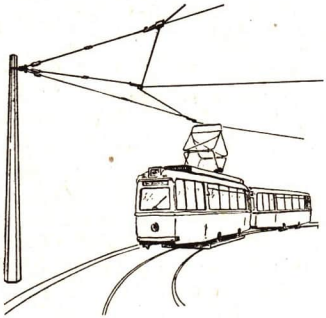
149/2 Entwicklung eines Kraftdreiecks. Die Kraft $\mathfrak{F}_1$ allein versucht das Flugzeug (0) in ihre Richtung zu bewegen. Nach Fortfall der Kraftwirkung von $\mathfrak{F}_1$ lassen wir die Kraft $\mathfrak{F}_2$ angreifen. Deren Wirkung entspricht dann der Kraftpfeil $\mathfrak{F}_2$, den wir an $\mathfrak{F}_1$ anfügen müssen.

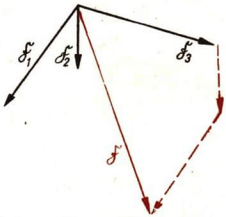
Zeichnerisch ergibt sich die Lösung dadurch, daß man an den Endpunkt des Vektors $\mathfrak{F}_1$ den Vektor $\mathfrak{F}_2$ anträgt (Bild 149/2). Verbindet man den freien Angriffspunkt O mit dem noch freien Endpunkt des Vektors $\mathfrak{F}_2$ durch einen Pfeil, dessen Richtungssinn durch Angriffspunkt O und Endpunkt P festliegt, dann erhält man den Vektor $\mathfrak{F}$, das ist die resultierende Kraft.

Man kann auch $\mathfrak{F}_2$ zuerst und dann $\mathfrak{F}_1$ einsetzen. Immer wird der Linienzug zum gleichen Punkt P gelangen, so daß man sich die beiden Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ ersetzt denken kann durch eine gemeinsame, die resultierende Kraft $\mathfrak{F}$. Die Erfahrung zeigt die Berechtigung zum Anwenden dieses Verfahrens.

4.3. Kräftepolygon

Auch mehr als zwei nichtparallele Kräfte (Bild 150/2) können so zusammengesetzt werden, wie es nach dem Kräftedreieck für zwei Kräfte möglich ist.
Bei Anordnung der Kräfte in einer Ebene werden diese in beliebiger Folge so verschoben, daß sie einen Linienzug ergeben. Die entstandene Figur heißt *Kräftepolygon*[1]. Die Resultierende ist der Vektor vom gemeinsamen Angriffspunkt zur Pfeilspitze des letzten Vektors (Bild 150/1).

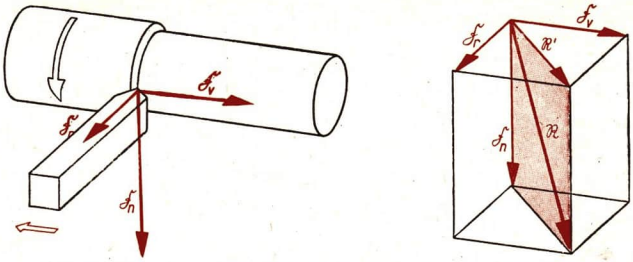




150/1 Zusammensetzen mehrerer nichtparalleler Kräfte
150/2 Auf den Oberleitungsmast wirken drei Kräfte. Welche Wirkungen haben die Kräfte?

Häufiger treten Kräfte auf, die nicht in einer Ebene liegen, sondern zueinander räumlich verteilt wirken. Beispielsweise greifen an einem Drehmeißel die Vorschubkraft $\mathfrak{F}_v$, die Rückkraft $\mathfrak{F}_r$ und die Hauptschnittkraft $\mathfrak{F}_n$ an, die jeweils senkrecht aufeinanderstehen (Bild 151/1).

[1] Polygon: Vieleck



151/1 Darstellung der am Drehmeißel wirkenden Kräfte. Der Drehmeißel wird gegen das Werkstück gedrückt. Auf Meißel und Werkstück wirkt die Vorschubkraft $\mathfrak{F}_v$. Wodurch entstehen die beiden anderen Kräfte?

4.4. Zerlegen einer Kraft

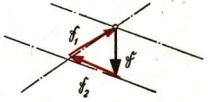
Auf der Grundlage des Kräftedreiecks ist auch das Zerlegen einer Kraft in zwei Teilkräfte möglich. Man nennt die Teilkräfte *Komponenten*[1].
Die Zerlegung einer Kraft kann vieldeutig sein, weil ein Dreieck durch eine Seite allein nicht eindeutig bestimmt ist. Man muß beispielsweise auch die Wirkungslinien der beiden Teilkräfte kennen, um die Zerlegung eindeutig durchführen zu können.

151/2

Beispiel

Beim Anwenden des Kräftedreiecks werden durch den Angriffspunkt und den Endpunkt der Kraft $\mathfrak{F}$ die Wirkungslinien so gezogen, daß sie sich schneiden. Vom Angriffspunkt der zu zerlegenden Kraft aus zeichnet man auf den Wirkungslinien die gesuchten Ersatzkräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ ein (Bild 151/2).

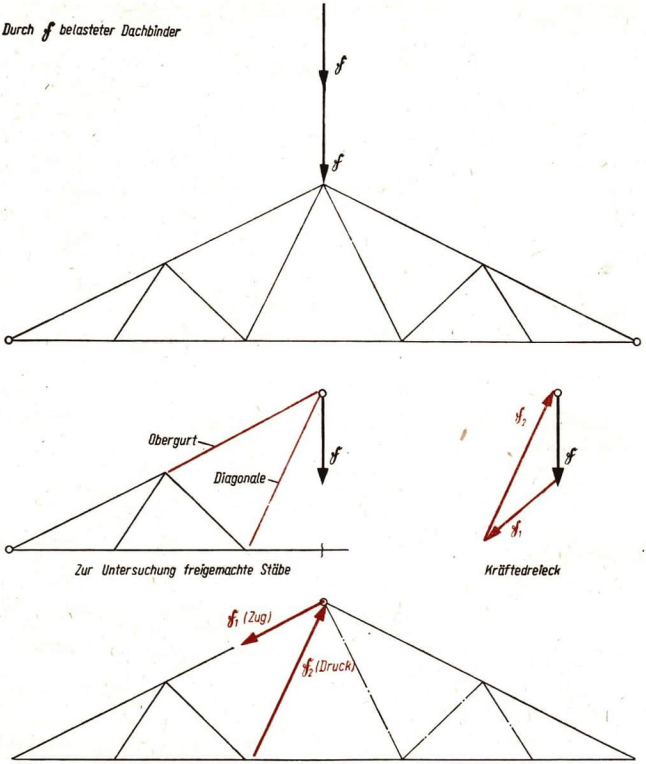
Bei den in der Technik viel verwendeten Kraftzerlegungen ist das Feststellen der *Beanspruchung* bestimmter Maschinen- oder Bauteile nach Größe und Richtung besonders wichtig. Zu diesem Zweck ordnet man die entsprechend Bild 151/2 bestimmten Komponenten $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ so auf den Wirkungslinien an, daß der Kräftezug *in Fortsetzung der Kraftrichtung von* $\mathfrak{F}$ geschlossen wird (Bild 151/3).
Die Komponenten werden dann parallel so verschoben, bis sie mit den beanspruchten Bauteilen zusammenfallen. Der Richtungssinn von $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ gibt die Beanspruchungsart an (Bild 152/1).



151/3

[1] Komponente = Zusammensetzende (da die Komponenten zusammen die Resultierende ergeben)

Durch $\mathfrak{F}$ belasteter Dachbinder



Zur Untersuchung freigemachte Stäbe

Kräftedreleck

Auf die Stäbe vom Kräftedreleck übertragene Belastungsgrößen

152/1 Die linke Seite des Trägers wird von der halben Belastung, also von $\mathfrak{F}$, beansprucht. Diese Kraft wird so zerlegt, daß ihre Komponenten in die Richtungen der beiden Stäbe wirken. Mit den beiden Stabkräften wird das Krafteck geschlossen. Die Größe der Stabkräfte gibt die Beanspruchung der Stäbe an. Der Richtungssinn der Stabkraft gibt Auskunft über die Beanspruchungsart: Vom Angriffspunkt weggerichtet: Zugbelastung des Bauteils. Zum Angriffspunkt hingerichtet: Druckbelastung des Bauteils. Mit dieser Festlegung wird die anscheinend so schwierige Bestimmung der Stabkräfte an einem Fachwerkträger vereinfacht.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Zwei Kräfte von 6 kp und 4 kp greifen in einem Punkt unter einem Winkel von 90° an. Ermitteln Sie die Resultierende

   1.1. durch Zeichnung,

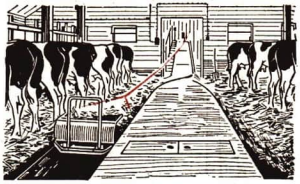
   1.2. durch Rechnung!

2. Bei der Schleppschaufel-Entmistungsanlage (Bild 153/1) wirkt eine angenommene Gesamtzugkraft von $F = 1000$ kp. Welcher Beanspruchung unterliegen die Seilbefestigungen an der Schaufel, wenn die beiden sich gabelnden Seile einen Winkel von 60° einschließen?

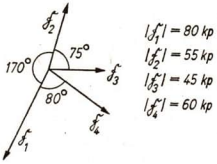
3. Bestimmen Sie die Resultierende der in einer Ebene liegenden Kräfte nach Bild 153/2 mittels Kräftepolygon.

4. Sie tragen mit einem anderen Schüler zusammen einen Kartoffelkorb. Wie schwer ist der Korb, wenn jeder Schüler eine Kraft von 20 kp aufwendet (Bild 153/3)? Lösung durch Zeichnung! Anleitung: Verschieben Sie die Teilkräfte bis zum Schnittpunkt und setzen Sie sie dort vektoriell zusammen! Die Resultierende muß nochmals zerlegt werden!

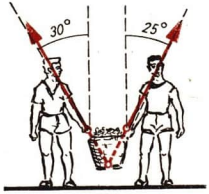
5. Ermitteln Sie Größe und Richtung der Kräfte, die auf die Wandhaken (Bild 155/1) ausgeübt werden. Das Gewicht der Leuchte beträgt 6 kp, der Winkel 160°. Lösung durch Zeichnung!



153/1 Schleppschaufel-Entmistungsanlage

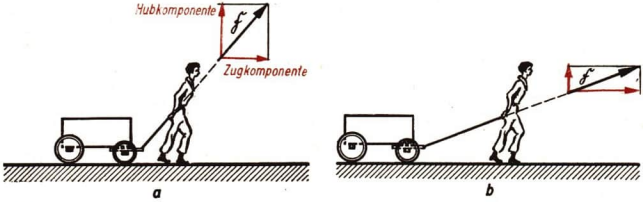


153/2

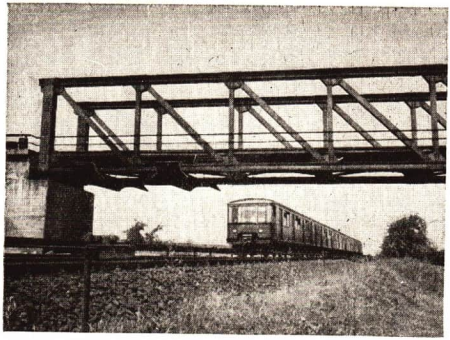


153/3

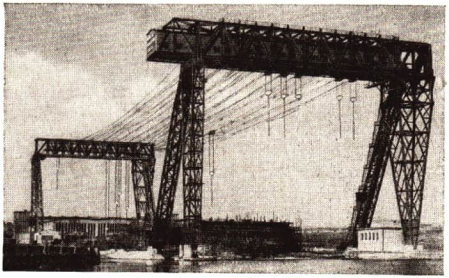
6. Warum benutzt man bei Handwagen keine kurzen Deichseln?
   Beantworten Sie die Frage an Hand des Bildes 153/4! Die Zugkräfte sollen gleich groß sein. Maßstab 1 cm ≙ 2 kp.



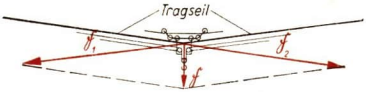
153/4



154/1 Fachwerkkonstruktion einer Brücke
Durch die diagonal eingefügten Stäbe entsteht ein biegesteifer Träger. Brükkenträger, Masten von Hochspannungsleitungen, Dachkonstruktionen, Fahrzeug- und Maschinenteile usw. werden oft in dieser Form gebaut.



154/2 Kabelkrananlage der Warnowwerft in Warnemünde. Hier werden vor allem große Frachtschiffe gebaut. Welche Vorteile ergeben sich durch eine Kabelkrananlage?



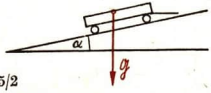
154/3 Kabelkrananlage
Bestimmen Sie aus $|\mathfrak{F}| =$ 1200 kp den Maßstab!

7. Skizzieren Sie einige Fachwerkkonstruktionen in Ihrem Heimatort (zum Beispiel Brücke, (Bild 154/1) Holzgerüst, Dachkonstruktion usw.).
Erläutern Sie das Kräfteparallelogramm an einigen Beispielen technischer Sportarten wie
Wasserski – Zugkraft am Seil beim Ausscheren
Motorsport – Bodenhaftung bei Kurvenfahrt
Flugsport – Bugfesselung beim Windenschlepp!

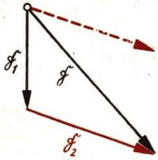
8. Ein Hänger von 800 kp steht auf einer Laderampe mit 10° Steigungswinkel (Bild 155/4). Ermitteln Sie zeichnerisch die Beträge der Hangabtriebskraft und der Normalkraft!

9. Die Richtung einer Kraft von 20 kp bildet mit der Horizontalen einen Winkel von 35°. Sie wird von einer in horizontaler und einer in vertikaler Richtung wirkenden Komponenten abgefangen. Wie groß sind die Komponenten?

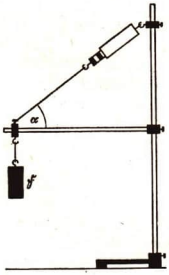
155/1



155/2



155/3



155/4 Welche Beispiele für diesen Belastungsfall kennen Sie?

10. Bild 154/3 zeigt einen Ausschnitt aus einer Kabelkrananlage. Die Seilteile werden auf Zug beansprucht.

10.1. Vergleichen Sie den Betrag der Last $F = 1200$ kp mit den Beträgen der beiden Komponenten!

10.2. Zeichnen Sie das Kräftedreieck bei gleicher Last auch für folgende Winkel: 90°, 120°, 160°, 180°. Erläutern Sie die Ergebnisse!

Welche Beziehung besteht zwischen dem Winkel, den die Komponenten einschließen und ihren Beträgen?

11. Sind die Resultierende $\mathfrak{F}$ und eine Komponente $\mathfrak{F}_1$ nach Betrag und Richtung bekannt, so läßt sich die andere Komponente ebenfalls ermitteln.

Man verbindet die Endpunkte der beiden Vektoren und erhält durch Parallelverschiebung dieser Geraden die fehlende Komponente (Bild 155/3).

Beachten Sie: Die Resultierende liegt stets zwischen den Komponenten!

Bestimmen Sie nach Richtung (Winkelangabe) und Betrag die fehlende Komponente, wenn $F = 20$ kp, $F_1 = 70$ kp, $\sphericalangle F, F_1 = 130°$ ist.

12. Macht man Klimmzüge zweckmäßiger mit parallelen oder gespreizten Armen?

Begründen Sie Ihre Meinung durch Skizzen!

13. In der Versuchsanordnung nach Bild 155/4 wird das Halteseil auf Zug, der Ausleger auf Druck beansprucht. Die Seilzugkraft kann an der Federwaage gemessen werden.

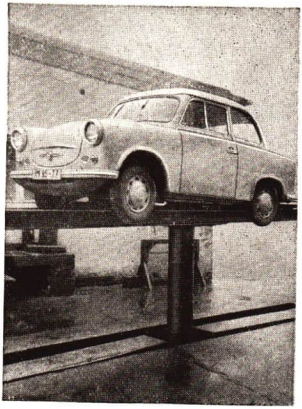
13.1. Bauen Sie die Versuchsanordnung mit eigenen Mitteln (Metallbaukasten, Schraubenfeder) nach!

Wie muß der Ausleger beschaffen sein, damit er nicht knickt?

Welche Veränderungen am Halteseil müssen Sie vornehmen, wenn die Last $\mathfrak{F}$ vergrößert wird?

13.2 Bestimmen Sie zeichnerisch die Beträge der Komponenten für $\alpha = 25°$ und $F = 1200$ p!

5. Zusammensetzen und Zerlegen paralleler Kräfte



Am hydraulischen Wagenheber werden Gesetzmäßigkeiten der Druckausbreitung in Flüssigkeiten benutzt.
Beim Aufbocken sind auch Gesetze der Statik zu beachten: Das Gewicht der Fahrzeugteile belastet die beiden Fahrzeugachsen unterschiedlich. Das aufgebockte Fahrzeug soll so stehen, daß die Resultierende der beiden parallelen Teilkräfte in Richtung des Druckkolbens angreift. Warum?

5.1. Zusammensetzen paralleler Kräfte

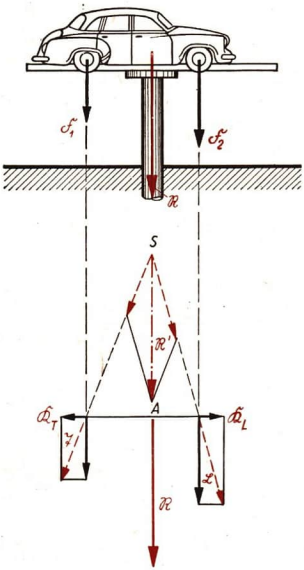
Zur Ermittlung der Resultierenden zweier paralleler Kräfte fügt man im Angriffspunkt von $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ die Kräfte $\mathfrak{K}_T$ und $\mathfrak{K}_L$ hinzu (Bild 157/1). Sie sind dem Betrag nach gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet. Da sie die gleiche Wirkungslinie besitzen, heben sich ihre Wirkungen auf. Man bestimmt aus $\mathfrak{K}_T$ und $\mathfrak{F}_1$, bzw. aus $\mathfrak{K}_L$ und $\mathfrak{F}_2$ die Resultierenden $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$.
Die Angriffspunkte von $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ werden längs ihrer Wirkungslinien bis zum Schnittpunkt S verschoben. Die Resultierende $\mathfrak{R}'$ des aus $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ gebildeten Parallelogramms entspricht der gesuchten Gesamtkraft $\mathfrak{R}$. Man kann sie längs ihrer Wirkungslinie bis zum Punkt A verschieben.
Die Lage der Wirkungslinie von $\mathfrak{R}$ läßt sich auch rechnerisch mit Hilfe der Ähnlichkeitslehre ermitteln (Bild 157/2).
Es ergibt sich:

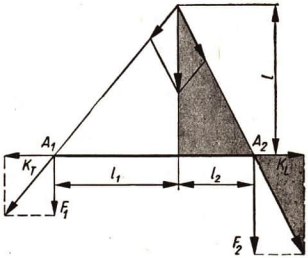
Die Wirkungslinie der Resultierenden zweier paralleler Kräfte teilt den Abstand ihrer Wirkungslinien im umgekehrten Verhältnis der Beträge der Kräfte.

$$l_1 : l_2 = F_2 : F_1 .$$

Der Betrag der Resultierenden ergibt sich durch Addition der Beträge der parallelen Teilkräfte.

$$R = F_1 + F_2 .$$





157/2 Die schraffierten Dreiecke sind ähnlich (warum?). Es gelten die Verhältnisse

$\frac{l}{l_1} = \frac{F_1}{K_T}$ und $\frac{l}{l_2} = \frac{F_2}{K_L}$.

Durch Umformen erhält man

$K_T = \frac{F_1 \cdot l_1}{l}$ und $K_L = \frac{F_2 \cdot l_2}{l}$.

Da $K_T = K_L$ ist, folgt $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$

oder $\frac{l_1}{l_2} = \frac{F_2}{F_1}$.

157/1 Zusammensetzen zweier paralleler Kräfte

5.2. Zerlegen einer Kraft in parallele Komponenten

Durch Umkehrung des Zusammensetzens paralleler Kräfte läßt sich eine Kraft in parallele Komponenten zerlegen.

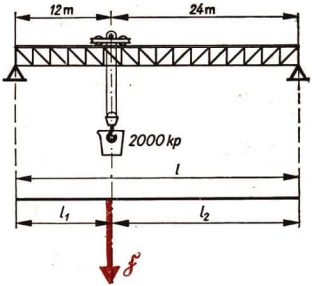
Beispiel

Es soll die Belastung der Fahrbahnschienen eines Gießerei-Brückenkrans ermittelt werden.

Rechnerische Lösung:

Man geht von der Proportion $l_1 : l_2 = F_2 : F_1$ aus.

$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$.



157/3 Gießerei-Brückenkran (KM 1 mm ≙ 125 kp)

Eine Proportion bleibt richtig, wenn man auf beiden Seiten zum Zähler den jeweiligen Nenner addiert[1]:

$\frac{F_1 + F_2}{F_2} = \frac{l_2 + l_1}{l_1}$. Da $F_1 + F_2 = F$ und $l_2 + l_1 = l$ ist, erhält man $\frac{F}{F_2} = \frac{l}{l_1}$.

Daraus folgt die Gleichung $F_2 = \frac{l_1}{l} \cdot F$.

In entsprechender Weise ergibt sich aus $\frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}$

die Gleichung $F_1 = \frac{l_2}{l} \cdot F$.

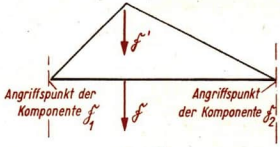
Beim Zerlegen einer Kraft in zwei parallele Komponenten ergeben sich deren Beträge aus

$$\boxed{F_1 = \frac{l_2}{l} \cdot F} \tag{29.1}$$

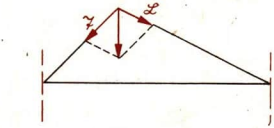
$$\boxed{F_2 = \frac{l_1}{l} \cdot F} \tag{29.2}$$

Zeichnerische Lösung:

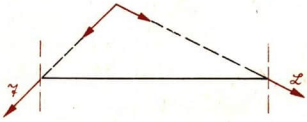
Die Kraft $\mathfrak{F}$ wird längs ihrer Wirkungslinie beliebig verschoben.
Man verbindet den Angriffspunkt von $\mathfrak{F}'$ mit den Angriffspunkten der Komponenten.



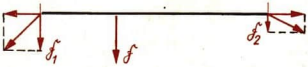
$\mathfrak{F}'$ wird in die Komponenten $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ zerlegt.



Man verschiebt $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ bis zum Angriffspunkt der gesuchten Teilkräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$.



Die Zerlegung von $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ ergibt $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$.



[1] Dieses mathematische Verfahren heißt korrespondierende Addition.

Beispiel

Die Kranbrücke nach Bild 157/3 hat ein Eigengewicht von 20 000 kp, die Laufkatze mit Hubvorrichtung wiegt 2000 kp. Die Kranpfanne hat ein Gewicht von 3000 kp. Wie groß ist die Belastung der Fahrbahnschienen?

Gegeben:

$G = 20\,000$ kp (Eigengewicht der Kranbrücke)
$F = 5000$ kp (Zusatzgewicht)
$l = 36$ m
$l_1 = 12$ m
$l_2 = 24$ m

Gesucht:

F_1, F_2

Lösung:

$$F_1 = \frac{l_2}{l} \cdot F$$

$$F_1 = \frac{24\text{ m}}{36\text{ m}} \cdot 5000\text{ kp}$$

$$\underline{\underline{F_1 \approx 3333\text{ kp}}}$$

$$F_2 = \frac{l_1}{l} \cdot F$$

$$F_2 = \frac{12\text{ m}}{36\text{ m}} \cdot 5000\text{ kp}$$

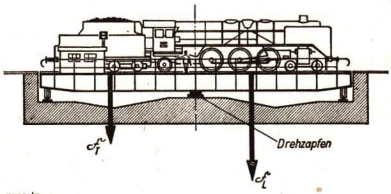
$$\underline{\underline{F_2 \approx 1667\text{ kp}}}$$

Das Eigengewicht der Kranbrücke verteilt sich zusätzlich symmetrisch auf beide Schienen.

Die Gesamtbelastung der Fahrbahnschienen beträgt demnach rund 13333 kp, *beziehungsweise 11667* kp.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Begründen Sie, warum sich für den Betrag der Resultierenden nach Bild 157/2 tatsächlich $R = F_1 + F_2$ ergibt!
   Anleitung: Zerlegen Sie nach dem Verschieben bis zum Punkt S die Kräfte $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ wieder in die ursprünglichen Komponenten und beachten Sie die Regeln über das Zusammensetzen von Kräften mit gleicher Wirkungslinie!



159/1

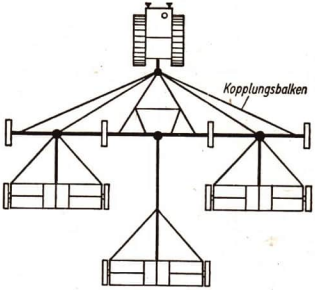
2. Kann eine Lokomotive mit Tender so auf einer Drehscheibe aufgestellt werden, daß der Vektor des Gesamtgewichts auf den Drehzapfen zeigt? Das Tendergewicht beträgt 50 Mp, das Lokomotivgewicht 130 Mp. Der Abstand der Angriffspunkte ist 12 m. Die beiden Angriffspunkte sollen zur Vereinfachung jeweils in der Mitte von Lok und Tender angenommen werden.
   2.1. Wie groß ist das Gesamtgewicht?
   2.2. In welcher Entfernung vom Angriffspunkt des Lokomotivgewichtes befindet sich die Wirkungslinie der Resultierenden? Beachten Sie: $l_1 + l_2 = l$!
   2.3. Kontrollieren Sie, ob die Lokomotive so weit verschoben werden kann, daß sich die eingangs gestellte Frage bejahen läßt!

3. Beim Drillen verwendet man mit Vorteil drei gekoppelte Drillmaschinen. Bestimmen Sie die erforderliche Gesamtzugkraft (einschließlich Kopplungsbalken)!
Entnehmen Sie die Art der Kopplung dem Bild 160/1, die erforderlichen Werte der Tabelle 5 auf Seite 147!

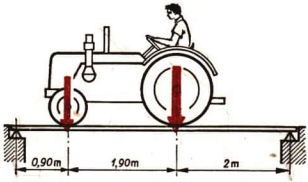
4. Ein Träger ruht horizontal auf zwei Stützen A und B, die einen Abstand von 6 m haben. Wie groß sind die Auflagebelastungen, wenn der Träger ein Gewicht von 300 kp hat und in einer Entfernung von 2,5 m von A sich eine zusätzliche Last von 250 kp auf dem Träger befindet? Lösung durch Zeichnung und durch Rechnung.

5. Welche Belastung wirkt auf die Lager einer Brücke durch das Gewicht eines Traktors RS 14? Die Achslasten betragen vorn 990 kp und hinten 1110 kp (Bild 160/2)!

6. An einer Reckstange hangelt ein Schüler, der ein Gewicht von 55 kp hat. Dabei hängt er kurzfristig (an beiden nebeneinandergreifenden Händen) in einem Abstand von 150 cm, beziehungsweise 90 cm von den Auflagestellen der Reckstange. Wie verteilt sich das Körpergewicht auf die Auflagestellen? Lösung durch Zeichnung!



160/1 Durch die Gerätekopplung von Drillmaschinen wird die Arbeitsbreite wesentlich vergrößert. Welche Vorteile ergeben sich dadurch bei den Bestellarbeiten?



160/2

Zusammenfassung

1. **Mehrere gleichzeitig auf einen Körper wirkende Kräfte können zu einer resultierenden Kraft zusammengesetzt werden.**

   Wie erfolgt die Zusammensetzung von Kräften?

2. **Die Gesamtkraft ergibt sich als vektorielle Summe der Teilkräfte.**

   Was heißt vektorielle Addition?

3. **Das Zusammensetzen zweier nichtparalleler Kräfte erfolgt nach dem Kräfteparallelogramm oder nach dem Kräftedreieck.**

   Vergleichen Sie beide Verfahren!

4. **Kräfte können in Komponenten zerlegt werden.**

   Welche verschiedenen Möglichkeiten kennen Sie?
   Welche Verfahren werden benutzt?

5. **Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften sind Grundlagen für technische Berechnungen.**

   Nennen Sie Beispiele!

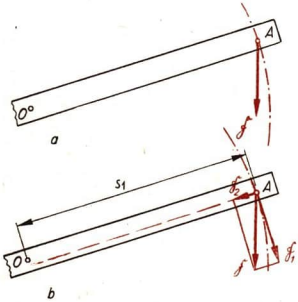
6. Das Drehmoment

Flugplatz Chodinka bei Moskau 1922. An einem Flugzeug der Deutsch-Russischen Luftverkehrsgesellschaft DERULUFT wird der Motor in Gang gesetzt. Dabei wird vom Bodenpersonal der lange Hebelarm des Luftschraubenblattes zum Anwerfen ausgenutzt. Das Hebelgesetz stellt den Sonderfall eines umfassenden Gesetzes der Mechanik dar, des Drehmomentensatzes. Ihm kommt in der Statik große Bedeutung zu.

6.1. Grundbegriffe

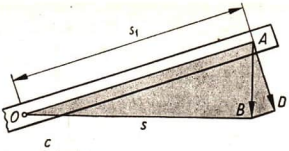
Die Wirkung einer Kraft $\mathfrak{F}$, die an einem drehbar gelagerten Körper angreift, hängt nicht nur von ihrem Betrag und ihrer Richtung ab, sondern auch vom Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt.

● *Nennen Sie die Bestimmungsstücke einer Kraft!*



161/1 An einem um eine feste Achse drehbar gelagerten Stab greift im Punkt A eine Kraft $\mathfrak{F}$ an. Ein solcher Stab wird als Hebel bezeichnet. Es erfolgt eine Drehung um den Punkt 0. Die Wirkungslinie der Kraft $\mathfrak{F}$ fällt dabei nicht mit dem Weg des Punktes A zusammen. Wovon ist die Geschwindigkeit abhängig, mit der sich der Punkt A bewegt?

161/2 Der Punkt A kann sich nur auf einer Kreisbahn bewegen. Man zerlegt daher die Kraft mit dem Betrag F in zwei Komponenten. Für die Drehung ist nur die Komponente F_1 wirksam, die tangential zur Kreisbahn angreift und die den Abstand s_1 vom Drehpunkt hat



162/1 Zeichnet man die Strecke $\overline{OB} = s$ ein, die *senkrecht* auf $\overline{AB}$ steht, so erhält man zwei ähnliche Dreiecke. Es ergibt sich die Proportion $\overline{AD} : \overline{AB} = \overline{OB} : \overline{OA}$ oder $F_1 : F = s : s_1$, bzw. die Produktgleichung $F_1 \cdot s_1 = F \cdot s$

Beispiele

Die Luftschraube des Flugzeugmotors läßt sich leichter drehen, wenn der Abstand des Angriffspunktes der Kraft vom Drehpunkt groß ist.
Wo greifen Sie beim Drehen eines Glücksrades an?
Warum sind die Tretkurbeln des Fahrrades länger als der Radius des Kettenrades?

Die Gesetzmäßigkeiten für Drehbewegungen lassen sich leicht erfassen, wenn mit einer neuen physikalischen Größe, dem **Drehmoment** $\boldsymbol{M}$ gearbeitet wird.

Als Drehmoment bezeichnet man das Produkt aus der angreifenden Kraft und dem senkrechten Abstand der Kraftwirkungslinie vom Drehpunkt.

Daß für die Größe der Drehwirkung tatsächlich nur *der senkrechte* Abstand maßgebend ist, ergibt sich aus den Bildern 161/1 bis 162/1.

Wie jeder anderen physikalischen Größengleichung kann man auch der Gleichung $F_1 \cdot s_1 = F \cdot s$ einen bestimmten Sachverhalt entnehmen.
$F_1 \cdot s_1$ ist nach der Definition ein Drehmoment. Das in der Bewegungsrichtung wirksame Drehmoment $F_1 \cdot s_1$ ist also dem Drehmoment aus der angreifenden Kraft und dem senkrechten Abstand der Kraftrichtung vom Drehpunkt gleichwertig.
Bezeichnet man den senkrechten Abstand s der Kraftwirkungslinie vom Drehpunkt als Kraftarm, so kann man einfacher formulieren:

Drehmoment = Kraft · Kraftarm	$\boldsymbol{M = F \cdot s}$

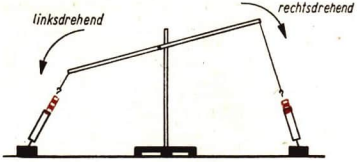
(30)

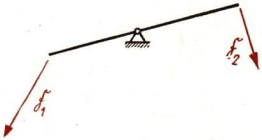
Haben zwei Drehmomente den gleichen Betrag, aber entgegengesetzte Vorzeichen, dann heben sie einander in ihrer Wirkung auf: Der Hebel ist im Gleichgewicht.
Wirken an einem drehbar gelagerten Körper beliebig viele Drehmomente, so läßt sich unter Berücksichtigung des Vorzeichens die Gleichgewichtsbedingung mit dem **Drehmomentensatz** formulieren:

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

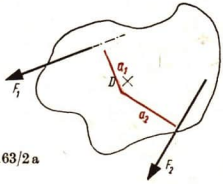
$$\sum_{k=1}^{n} M_k = M_1 + M_2 + \cdots + M_n = 0 \qquad (30.1)$$

Der Hebel braucht dabei nicht horizontal zu stehen. Gleichgewicht heißt, daß sich alle Kräfte in ihren Wirkungen nach außen aufheben (Bild 163/1).



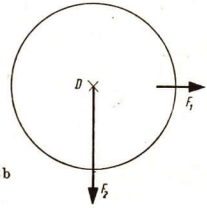


163/1 Auf den Hebel wirken zwei Kräfte. Sie rufen ein rechtsdrehendes Moment im Uhrzeigersinn und ein linksdrehendes Moment entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn hervor. Rechtsdrehende Momente erhalten meist ein negatives Vorzeichen, linksdrehende Momente ein positives Vorzeichen



163/2 a

Der *Drehmomentensatz* ermöglicht eine einfachere Darstellung vieler Einzelgesetze (vgl. 8. Kraftumformende Einrichtungen).



163/2 b

Versuche, Fragen, Aufgaben

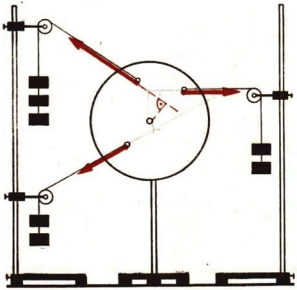
1. Übertragen Sie die Bilder 163/2 in Ihr Heft und zeichnen Sie die Kraftarme ein! Beachten Sie, daß in der Mathematik senkrechter Abstand stets „rechtwinklig" bedeutet!

2. Führen Sie den Versuch nach Bild 163/3 durch!
   2.1. Welche Momente sind rechtsdrehend, welche sind linksdrehend?
   2.2. Befindet sich die Momentenscheibe in der gezeichneten Stellung im Gleichgewicht? Kontrolle!

3. An einem drehbar gelagerten starren Körper wirken folgende Drehmomente:

$F_1 = -\ 80$ p	$s_1 = 2$ cm
$F_2 = \ \ 100$ p	$s_2 = 1$ cm
$F_3 = -\ 10$ p	$s_3 = 7$ cm
$F_4 = \ \ 200$ p	$s_4 = 3$ cm
$F_5 = -300$ p	$s_5 = 1$ cm

   3.1. Stellen Sie fest, ob Gleichgewicht herrscht!
   3.2. Fügen Sie gegebenenfalls noch ein Drehmoment M_6 hinzu!



163/3 Momentenscheibe

7. Schwerpunkt und Gleichgewichtslagen

Aus der Erfahrung wissen wir, daß es einer gewissen Geschicklichkeit bedarf, um lange oder sperrige Lasten transportieren zu können. Beim Transport eines schweren Gegenstandes ist es zweckmäßig, diesen in einem bestimmten Punkt, im Schwerpunkt, zu unterstützen. Ein zusätzliches Stützen des Gegenstandes, damit er im Gleichgewicht bleibt, kann dann mit geringfügigem Kraftaufwand durchgeführt werden.

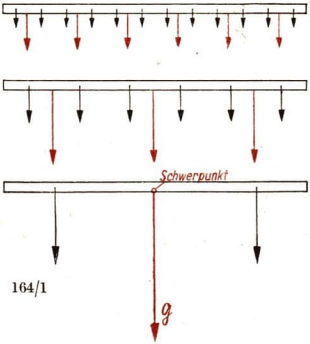
7.1. Der Schwerpunkt

Man denke sich zum Beispiel die Bohle in kleine Stücke zerlegt (Bild 164/1). Auf jedes Stück wirkt die Schwerkraft. Je zwei dieser parallelen Kräfte werden zu einer Resultierenden vereinigt. Diese setzt man wiederum zusammen usf. Die Gesamtresultierende ist gleich dem Gewicht $\mathfrak{G}$ des Körpers. Ihre Wirkungslinie verläuft durch den *Schwerpunkt* des Körpers.

Im Schwerpunkt denkt man sich die gesamte Masse des Körpers vereinigt (er wird auch Massenmittelpunkt genannt). Den Schwerpunkt kann man als Angriffspunkt des Gewichtes $\mathfrak{G}$ des Körpers auffassen.

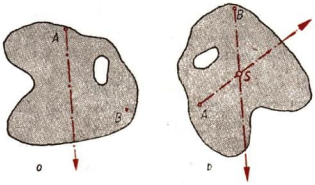
Unterstützt man einen Körper im Schwerpunkt, so befindet er sich in jeder Lage im Gleichgewicht.

Die Summe aller Drehmomente in bezug auf die Unterstützung ist Null. Bei regelmäßig geformten Flachkörpern, die aus einem einheitlichen Material bestehen, fällt der Schwerpunkt mit dem Symmetriezentrum zusammen. Der Schwerpunkt unregel-

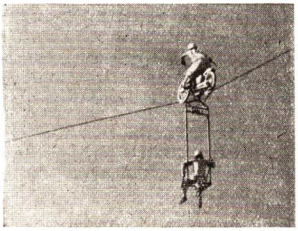


164/1

mäßig geformter Körper wird meist experimentell bestimmt. Dabei benutzt man die Tatsache, daß bei um eine feste Achse drehbaren Körpern der Schwerpunkt stets die tiefstmögliche Lage einnimmt (Bild 165/1).



165/1 Schwerpunktbestimmung. Der Körper wird an zwei beliebigen Punkten A und B nacheinander aufgehängt. Die Lote von den Aufhängepunkten heißen *Schwerelinien*. Ihr Schnittpunkt ist der Schwerpunkt



165/2 Artisten mit Motorrad auf dem Hochseil. Das Motorrad fährt ohne Reifen auf Spezialfelgen. Es besteht keine Absturzgefahr, da sich das Gerät im stabilen Gleichgewicht befindet

7.2. Gleichgewichtslagen

Wie im Absatz 6.2 beschrieben wurde, befindet sich ein Körper im Gleichgewicht, wenn die Summe aller Drehmomente Null ergibt. Je nach dem Verhalten der Körper bei einer kleinen Lageänderung unterscheidet man drei Gleichgewichtslagen: das *stabile*, das *labile* und das *indifferente Gleichgewicht*.

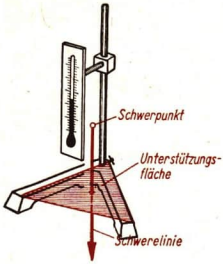
Tabelle 6: Gleichgewichtslagen

Gleichgewichtslage	Kennzeichen	Beispiele
Stabiles Gleichgewicht	Der Schwerpunkt befindet sich in der tiefstmöglichen Lage. Er wird bei einer kleinen Lageänderung stets gehoben.	Schaukel, Uhrenpendel Wandbild, Stehaufmännchen, Waagebalken
Labiles Gleichgewicht	Der Schwerpunkt liegt über dem Unterstützungspunkt. Der Schwerpunkt wird sich bei einer kleinen Lageänderung stets senken.	Stabhochsprung
Indifferentes Gleichgewicht	Schwerpunkt und Unterstützungspunkt sind in einem Punkt vereint. Bei einer kleinen Lageänderung bleibt der Schwerpunkt stets in gleicher Höhe.	Schwungräder, Turbinenlaufräder, Fahrzeugräder, Propeller

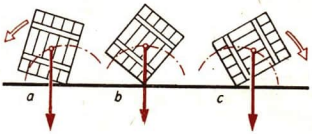
7.3. Die Standfestigkeit

Das Stativ in Bild 166/1 befindet sich im stabilen Gleichgewicht. Bei geringem Anheben des Schwerpunktes durch Kippen kehrt es in die alte Lage zurück. Durch starkes Kippen kann das Stativ aus dem stabilen Gleichgewicht gebracht werden. Das gilt für alle stehenden, im stabilen Gleichgewicht befindlichen Körper. Die Eigenschaft eines Körpers, entgegen einer Kraftwirkung im stabilen Gleichgewicht zu verbleiben, heißt *Standfestigkeit*. Aus Versuchen läßt sich ermitteln:

Ein Körper kehrt in die alte Lage zurück, wenn die Schwerelinie durch die Unterstützungsfläche verläuft; ein Körper kippt um, wenn die Schwerelinie nicht mehr durch die Unterstützungsfläche verläuft.



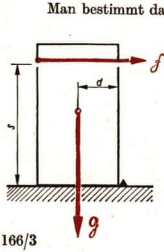
166/1 Die von den Verbindungslinien zwischen den Auflagepunkten begrenzte Fläche wird als Unterstützungsfläche bezeichnet



166/2 a) Kippt man eine Kiste an, so kehrt sie bei kleiner Auslenkung wieder in ihre alte Lage zurück. Sie ist im stabilen Gleichgewicht
b) Beim Erreichen eines bestimmten Kippwinkels nimmt der Schwerpunkt die höchstmögliche Lage ein. Die Kiste ist im labilen Gleichgewicht
c) Wird der Kippwinkel noch größer, so kippt die Kiste um, da die Schwerelinie nicht mehr durch die Unterstützungsfläche geht. Die Kiste nimmt schließlich eine andere stabile Gleichgewichtslage ein

Beispiel

Das Maß der Standfestigkeit kann mit Hilfe des Drehmomentensatzes ermittelt werden: Man bestimmt das Drehmoment, das einen Quader zum Kippen bringt. Dieses Kippmoment beträgt $M_k = F \cdot s$. Ihm entgegen wirkt das Standmoment $M_{st} = G \cdot d$ (Bild 166/3). Beide Drehmomente werden auf die Kippkante K bezogen. Ist das Kippmoment größer als das Standmoment, so geht der Körper in eine neue Gleichgewichtslage über, setzt man beide Momente gleich, so erhält man mit der Kippkraft F ein Maß für die Standfestigkeit:



166/3

$$M_k = M_{st}$$

$$F \cdot s = G \cdot d \quad \text{oder}$$

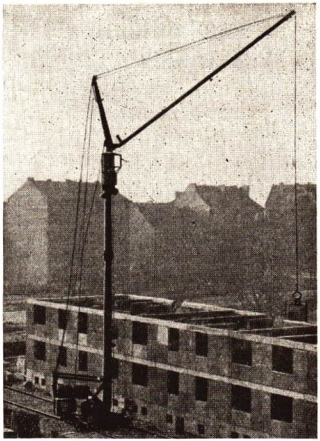
$$\boxed{F = \frac{G \cdot d}{s}} \qquad (31)$$

Große Kippkraft bedeutet große Standfestigkeit.

● *Was bedeuten G, d und s? Wie beeinflussen G, d und s die Standfestigkeit?*

Die Standfestigkeit eines Körpers ist um so größer, je größer sein Gewicht und der rechtwinklige Abstand der Kippkante von der Schwerelinie sind und je tiefer der Schwerpunkt liegt.

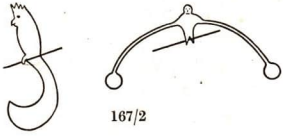
Die Standfestigkeit ist besonders bei Hebezeugen von Bedeutung. Das Standmoment muß stets größer sein, als die Summe der Kippmomente. Bei Kränen erreicht man das vor allem durch ein Gegengewicht und durch Anordnung der schweren Maschinenteile im Unterteil.



167/1 Moderner Baukran beim Heben von Fertigteilen. Wodurch ergibt sich die gute Standfestigkeit?

Versuche, Fragen, Aufgaben

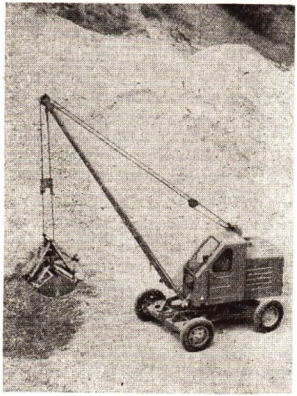
1. Bestimmen Sie den Schwerpunkt eines unregelmäßig geformten Holzbrettchens. Kontrollieren Sie mit Hilfe der Schwerelinien das Ergebnis!
2. Ermitteln Sie den Schwerpunkt eines Schlüsselringes. Hinweis: Klemmen Sie in den Ring eine dünne Pappscheibe!
3. Veranschaulichen Sie an einem Lineal mit Bohrung die Gleichgewichtslagen!
4. Füllen Sie ein leergeblasenes Ei mit einigen kleinen Bleistücken. Eine Öffnung wird mit Papier verklebt. Durch Eingießen von geschmolzenem Paraffin werden die Bleistückchen in ihrer Lage festgehalten. Nach dem Erkalten haben Sie ein sogenanntes Stehaufmännchen. Erklären Sie die Wirkung physikalisch!
5. Erklären Sie die deutschen Bezeichnungen *unsicheres* Gleichgewicht für labiles Gleichgewicht, *beständiges* Gleichgewicht für indifferentes Gleichgewicht, *sicheres* Gleichgewicht für stabiles Gleichgewicht!
6. Zeichnen Sie die Figuren des Bildes 167/2 auf starke Pappe! Wo liegt der Schwerpunkt? Welcher Gleichgewichtszustand liegt vor, wenn man die Figuren an der angegebenen Stelle auf einen Draht setzt?



167/2

7. Stellen Sie sich mit geschlossenen Füßen mit dem Rücken an die Wand und versuchen Sie, ein Buch vom Erdboden aufzuheben, ohne in die Kniebeuge zu gehen. Erklären Sie, warum man dabei nach vorn fällt!
8. Vergleichen Sie die Standfestigkeit folgender Sportgeräte: Kasten, Pferd, Sprunglattenständer, Barren! Durch welche Maßnahmen erreicht man eine große Unterstützungsfläche?

8. Kraftumformende Einrichtungen

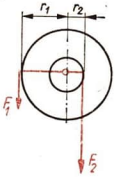


Am Lader T 170 findet man eine Anzahl kraftumformender Einrichtungen: Rolle, Flaschenzug, Wellrad, Hebel, Getriebe. Sie haben die Aufgabe, Kräfte hinsichtlich Richtung, Betrag oder Angriffspunkt umzuformen. Bei welchen Arbeiten konnten Sie das im VEB Mähdrescherwerk Weimar gefertigte Gerät beobachten? Wo befinden sich die angeführten Maschinenteile und Getriebe bei anderen bekannten Geräten, Maschinen und Fahrzeugen?

Durch die Anwendung des Drehmomentensatzes ist es möglich, die Bedingungen des Gleichgewichts bei kraftumformenden Einrichtungen einfach zu formulieren (siehe Tabelle 7).

Hebel, Wellräder, Kurbeln und Getriebe sind wichtige Bestandteile von Maschinen. Bei Baggern, Kränen und anderen Geräten werden Rollen und Flaschenzüge benutzt. Mit der festen Rolle ändert man nur die Kraftrichtung. Bei allen anderen kraftumformenden Einrichtungen wird dagegen meist auch der Betrag der Kraft geändert. Erwünscht ist oft eine Kraftersparnis. Das wird durch eine Vergrößerung des Kraftarms erreicht.

168/1 Seilwinde



Beispiel

Die Kraftarme bei einer Seilwinde (Bild 168/1) sind unterschiedlich lang. Nach dem Drehmomentensatz ist die Kraft an der Kurbel daher kleiner als die wirksame Kraft an der Trommel. Wird die Kurbel gedreht, so verschieben sich die Angriffspunkte der Kräfte auf Kreisbahnen mit unterschiedlichen Radien.

Tabelle 7: Kraftumformende Einrichtungen

	Bisherige Formulierung/Formel	neue Formulierung	Beispiel
Hebel	Ein Hebel ist im Gleichgewicht, wenn das Produkt aus Kraft und Kraftarm gleich dem Produkt aus Last und Lastarm ist. $F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$	Es herrscht Gleichgewicht, wenn die Summe aller Drehmomente Null ist.	rechtsdrehend; linksdrehend; Schubkarre; $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$
feste Rolle	An der festen Rolle herrscht Gleichgewicht, wenn die Kraft gleich der der Last ist. $F_1 = F_2$		einfacher Aufzug; $F_1 \cdot r = F_2 \cdot r$; $F_1 = F_2$
lose Rolle (parallele Seile)	An der losen Rolle herrscht Gleichgewicht, wenn die am freien Seilende angreifende Kraft halb so groß ist wie die Last. $F_1 = \frac{F_2}{2}$		$F_1 \cdot 2r = F_2 \cdot r$; $F_1 = \frac{F_2 r}{2r}$; $F_1 = \frac{F_2}{2}$
Wellrad, Kurbel	Am Wellrad herrscht Gleichgewicht, wenn das Produkt aus der Kraft und dem Radius des Rades gleich dem Produkt aus der Last und dem Radius der Welle ist. $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$		$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$

Die bei einer Umdrehung zurückgelegten Wege werden mit s_1 und s_2 und die Radien mit r_1 und r_2 bezeichnet.

Man erhält die Proportion

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{s_1}{s_2}.$$

Aus der Gleichung des Wellrades

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

ergibt sich die Proportion

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{F_2}{F_1}.$$

Zusammen mit $\frac{r_1}{r_2} = \frac{s_1}{s_2}$ folgt

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{s_1}{s_2}.$$

Beim Wellrad stehen die Kräfte im umgekehrten Verhältnis zu den zurückgelegten Wegen:

$$F_2 : F_1 = s_1 : s_2.$$

Dieses Gesetz gilt für alle kraftumformenden Einrichtungen. Je kleiner die Kraft ist, die man aufwendet, um so größer ist demnach der Weg. Es wird bezeichnet als das **Gesetz von der Erhaltung der Arbeit.**

Durch Anwendung einer kraftumformenden Einrichtung kann Kraft gespart werden, wenn der Kraftweg vergrößert wird.

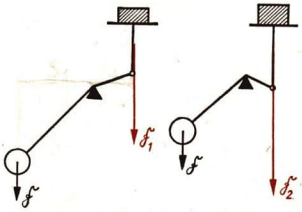
Der Kraftweg kann also auf Kosten der Kraft vergrößert werden, wie Tabelle 8 auf Seite 172 zeigt.

Welchen Zweck verfolgt man damit?

Versuche, Fragen, Aufgaben

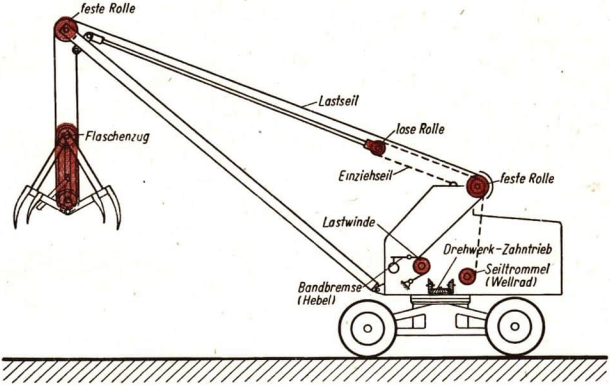
1. Welche Kraft wirkt, wenn man einen Kupferdraht mit Hilfe einer Kneifzange trennt? Der Abstand Schneide — Drehpunkt betrage 30 mm, der Abstand Drehpunkt — Angriffspunkt der Handkraft 150 mm. Die Handkraft sei 7 kp. (Die Festigkeit des Materials soll nicht berücksichtigt werden.)

2. Erklären Sie die Wirkungsweise einer Briefwaage mit Hilfe des Drehmomentensatzes (Bild 170/1).
Anleitung: Übertragen Sie Bild 170/1 in das Heft und zeichnen Sie die Kraftarme ein!



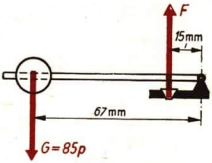
170/1

3. Untersuchen Sie in ähnlicher Weise, wie in Bild 171/1 gezeigt wird, andere landwirtschaftliche Geräte und Maschinen auf die Anwendung einfacher kraftumformender Einrichtungen!



171/1 Kraftumformende Einrichtungen am Lader T 170

4. Bei welcher Druckkraft des Dampfes öffnet sich das Sicherheitsventil des Papinschen Topfes? Entnehmen Sie die Werte dem Bild 171/2. (Das Gewicht des Hebels wird vernachlässigt!)



171/2

5. Mit Hilfe eines aus je zwei festen und losen Rollen bestehenden Flaschenzuges soll ein Behälter von 60 kp um 2 m gehoben werden. Welcher Kraftweg ist zurückzulegen? Welche Kraft ist zum Heben notwendig, wenn das Gewicht einer „Flasche" 15 kp beträgt?
Erklären Sie an Hand der Bilder 171/3 die Hebelwirkung am Kopf und am Unterschenkel auf Grund des Drehmomentensatzes!

171/3 a b

7. Erklären Sie die Wirkungsweise der in der Tabelle 8 dargestellten Einrichtungen! Ergänzen Sie die letzte Spalte der Hebelbeispiele!

Tabelle 8: Kraftumformende Einrichtungen

Hebel	Unterarm	Bild 1	
	Typenhebel der Schreibmaschine	Bild 2	
	Schleuderbrett	Bild 3	

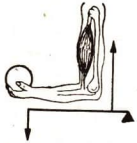


Bild 1

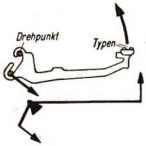


Bild 2

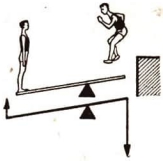


Bild 3

einfacher Flaschenzug	Katapultstart eines Flugzeuges	Bild 4	Flugzeugschlitten erreicht die doppelte Geschwindigkeit des Preßluftzylinders.
Riementrieb	Ventilatorenantrieb eines Motors	Bild 5	Bei einer Umdrehung der Riemenscheibe dreht sich der Propeller viermal.
Kettentrieb	Fahrrad	Bild 6	Auf $2^1/_2$ Umdrehungen des Zahnkranzes kommt eine Umdrehung des Kettenrades.

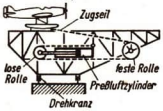


Bild 4

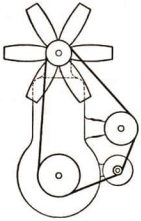
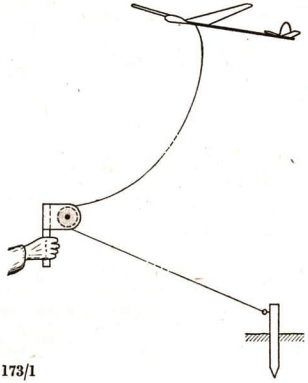


Bild 5

Bild 6



173/1

8. Beim Start von Segelflugmodellen benutzt man unter anderen sogenannte Umlenkrollen. Welche kraftumformende Einrichtung liegt vor (Bild 173/1)?

9. Das Übersetzungsverhältnis zweier Riemenscheiben ergibt sich zu

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

n_1: Drehzahl der treibenden Welle,
n_2: Drehzahl der angetriebenen Welle,
d_1: Durchmesser der treibenden Riemenscheibe,
d_2: Durchmesser der getriebenen Riemenscheibe.
Welchen Umfang muß das getriebene Rad haben, wenn das treibende Rad einen Durchmesser von 40 cm hat und wenn
$i = 0{,}22$
beträgt?

Zusammenfassung

1. **Das Produkt aus der angreifenden Kraft und dem Kraftarm heißt Drehmoment.**[1]
   Beschreiben Sie die Begriffe an einem Beispiel!

2. **Ein um eine Achse drehbarer Körper ist im Gleichgewicht, wenn die Summe aller Drehmomente Null ergibt.**
   Wie lautet die mathematische Schreibweise?[2]

3. **Der Schwerpunkt ist der Angriffspunkt der auf einen Körper wirkenden Schwerkraft.**
   Welche Verfahren zur Bestimmung des Schwerpunktes sind Ihnen bekannt?

4. **Es gibt drei Gleichgewichtslagen: stabiles, labiles, indifferentes Gleichgewicht.**
   Wie werden sie unterschieden?

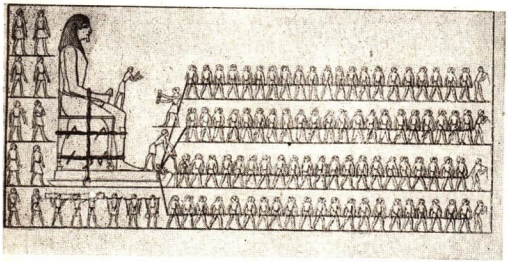
5. **Die Eigenschaft eines Körpers, entgegen einer Kraftwirkung im stabilen Gleichgewicht zu bleiben, heißt Standfestigkeit.**
   Wovon hängt die Standfestigkeit eines Körpers ab?

[1] von movimentum (lat.): das Bewegende
[2] Σ: sigma, griech. Buchstabe, bedeutet als mathematisches Symbol im Momentensatz: Bilde die Summe aller einzelnen Drehmomente von M_1 bis M_n.

9. Die Entwicklung der Statik

Die Gesetzmäßigkeiten einiger einfacher Maschinen wurden zuerst durch griechische Gelehrte untersucht. ARISTOTELES (384 bis 322 v. u. Ztr.) schrieb über den Hebel: „Eine in größerer Entfernung vom Unterstützungspunkt angreifende Kraft bewegt ein Gewicht leichter, weil sie einen größeren Kreis beschreibt." Als Begründer der Statik kann man ARCHIMEDES (287 bis 212 v. u. Ztr.) ansehen. Er erfaßte die Gleichgewichtsbedingungen des Hebels mathematisch und soll selbst neue Maschinen, wie die Wasserschraube, den Flaschenzug und die „Schraube ohne Ende", erfunden haben. Bei der Verteidigung seiner Heimatstadt Syrakus auf Sizilien wurden von ARCHIMEDES konstruierte Wurfmaschinen erfolgreich eingesetzt.
In den Büchern des ARCHIMEDES findet man eine rein mathematische Behandlung; Experimente werden nicht erwähnt. Von einer Physik im heutigen Sinne kann man daher in der Antike nicht sprechen.
Die Weiterentwicklung der Statik ruhte danach über 1000 Jahre. Ursache dafür war neben den ökonomischen Widersprüchen der Feudalgesellschaft vor allem die wissenschaftsfeindliche Einstellung der Kirche. Sie konnte aber vom 14. Jahrhundert (Niedergang des Feudalismus) an die Beschäftigung mit den Naturwissenschaften nicht mehr verhindern. Man studierte jedoch nicht die Natur, sondern die Schriften des ARISTOTELES. Seine Autorität galt uneingeschränkt. Noch Anfang des 17. Jahrhunderts sagte einer dieser Scholastiker[1], dem man die Sonnenflecken zeigen wollte: „Wozu, mein Sohn, ich habe den ARISTOTELES zweimal durchgelesen und nichts

[1] Scholastiker: Anhänger einer mittelalterlichen religiös-philosophischen Richtung, die ihre Erkenntnisse allein durch Vergleich und „Auswertung" von Büchern, vor allem der Bibel, zu gewinnen versuchten. Die Scholastik hemmte die Entwicklung der Wissenschaft.



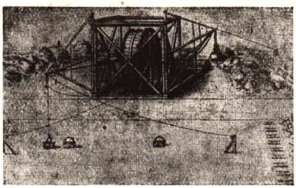
174/1 Seit über 5000 Jahren sind Hebel, Rolle und geneigte Ebene den Menschen bekannt. Nur mit ihrer Hilfe war der Bau der gewaltigen Pyramiden und Tempel möglich. Zahllose Sklavenheere mühten sich dabei, die großartigen Baudenkmäler des Altertums zu schaffen. (Relief aus der Zeit um 3000 v. u. Z.)

Derartiges gefunden. Die Flecke existieren nicht, sondern sind nur Fehler deiner (Fern-) Gläser oder deiner Augen.“ Das auf solcher „Grundlage“ beruhende Studium der Natur stellte für die Kirche keine Gefahr dar und wurde deshalb wohlwollend von ihr geduldet.

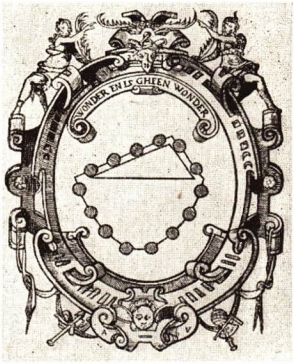
Erst die ökonomischen Veränderungen im Frühkapitalismus führten zu einer Belebung auf dem Gebiete der Naturwissenschaften. Man machte sich die antiken Kenntnisse wieder nutzbar und wertete eine Reihe unbekannter antiker Schriften aus, die über Byzanz nach Italien gelangten.

Über diese Periode, die Renaissance, (etwa 1440 bis 1540), schrieb FRIEDRICH ENGELS: „Es war die größte progressive[1] Umwälzung, die die Menschheit bis dahin erlebt hatte, eine Zeit, die Riesen brauchte, und Riesen zeugte, Riesen an Denkkraft, Leidenschaft und Charakter, an Vielseitigkeit und Gelehrsamkeit.“[2]

Eine dieser genialen Persönlichkeiten war LEONARDO DA VINCI (1452 bis 1519). Er erweckte die Mechanik zu neuem Leben. LEONARDO DA VINCI war nicht nur ein bedeutender Maler und Bildhauer, sondern auch Architekt und Ingenieur. Vor allem hervorzuheben ist sein Eintreten für das Experiment und die mathematische Behandlung physikalischer Probleme. Er hat eine Fülle von Apparaten und Maschinen konstruiert (Bild 175/1) und arbeitete auch an der Auffindung physikalischer Zusammenhänge (Hebel, geneigte Ebene, Flaschenzug). Er veröffentlichte aber den größten Teil seiner Arbeiten nicht, so daß sein Einfluß auf die weitere Entwicklung gering war. Seine Ideen eilten teilweise



175/1 Entwurf eines Grabenbaggers von LEONARDO DA VINCI



175/2 Titelbild einer Schrift von STEVIN. Die Inschrift lautet: „Wunder und ist (doch) kein Wunder.“ Die Kette muß im Gleichgewicht sein, da sie sonst zu rotieren anfinge und weiter rotieren würde, denn alle Kettenglieder sind gleich. Die unter der Grundfläche hängenden Kettenglieder sind für sich im Gleichgewicht. Werden sie weggelassen, so herrscht nach wie vor für die Kettenglieder der geneigten Ebene Gleichgewicht

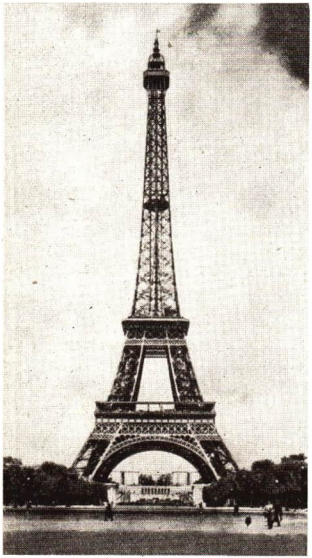
[1] progressiv: hier soviel wie fortschrittlich
[2] FRIEDRICH ENGELS: Dialektik der Natur.

seiner Zeit weit voraus, so daß die gesellschaftlichen Verhältnisse einer Verwirklichung entgegenstanden.

Die Zentren der wissenschaftlichen Tätigkeit waren im 16. und 17. Jahrhundert neben Italien und Frankreich auch die Niederlande. Hier wurde, vor allem wegen der geographischen Bedingungen und der Schiffahrt, die Statik der Flüssigkeiten weiterentwickelt. Der holländische Wasserbauingenieur SIMON STEVIN (1548 bis 1626) untersuchte unter anderem das Gleichgewicht an der geneigten Ebene und kam zu dem Ergebnis, daß die Kettenteile auf den beiden geneigten Seiten des Dreiecks im Gleichgewicht sind, wenn ihre Gewichte im gleichen Verhältnis wie die Seitenlängen stehen (Bild 175/2).

Dieses Ergebnis stellt praktisch den Satz vom Parallelogramm der Kräfte dar, der später durch GALILEO GALILEI und ISAAC NEWTON endgültig formuliert wurde. GALILEI brachte die Lehre von den einfachen Maschinen zu einem gewissen Abschluß und prägte die *Goldene Regel der Mechanik:* „Was an Leichtigkeit gewonnen wird, geht an Weg, Zeit und Langsamkeit verloren."

Die Statik war am Ende des 18. Jahrhunderts im wesentlichen aufgebaut. Sie bildet eine der Grundlagen der Technik und wird in enger Verbindung mit der Produktion weiterentwickelt. Als Beispiel sei auf das Bauwesen hingewiesen (Bilder 176/1 und 176/2).



176/1 Eiffelturm in Paris
Zum Bau des 300 m hohen Eiffelturms in Paris (1889) wurden 7300 t Stahl benötigt

176/2 Antennenmast des Deutschlandsenders bei Oranienburg. Für den 351 m hohen Antennenmast des Deutschen Demokratischen Rundfunks (1962) waren 148 t Stahl notwendig. Trotz der unterschiedlichen Zwecke, denen beide Anlagen dienen, ist die Verminderung der Masse um 98% durch die Anwendung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse und modernster Fertigungsverfahren außerordentlich groß

10. Gleichförmige und ungleichförmige Bewegung

Bald schneller, bald langsamer bewegt sich das Kanu vorwärts, wenn man es vom Ufer aus beobachtet. Diese ungleichförmige Bewegung bemerkt der Kanute jedoch kaum; denn ihm erscheint es fast so, als wenn sich sein Boot gegenüber dem Wasser nicht bewegt.
Man kann also die Bewegung eines Körpers verschieden betrachten, aber man muß sie immer im Zusammenhang mit seiner Umwelt sehen.

10.1. Die Relativität der Bewegung

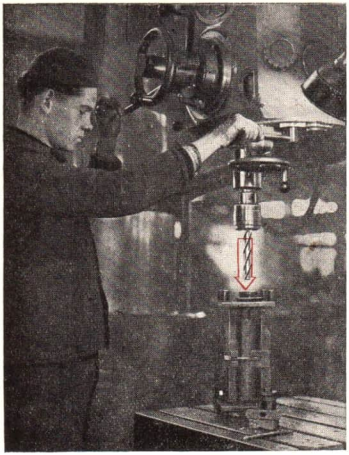
Ändert ein Körper seine Lage gegenüber einem anderen Körper, so bewegt er sich *relativ*[1] zu diesem. Diesen zweiten Körper bezeichnet man als das Bezugssystem. Beispielsweise ist ein im Gepäcknetz eines fahrenden Eisenbahnzuges befindlicher Koffer relativ zum Zug in Ruhe, relativ zur Erdoberfläche in Bewegung.
Im allgemeinen ist das Bezugssystem die Erdoberfläche. Es wird meist nicht besonders erwähnt. Man bezeichnet daher einen Körper als in Ruhe befindlich, wenn er sich relativ zur Erdoberfläche nicht bewegt.
In Wirklichkeit sind alle gegenüber der Erdoberfläche ruhenden Körper in bezug auf das Sonnensystem in Bewegung. Auch das Sonnensystem ist nicht in Ruhe; es bewegt sich mit großer Geschwindigkeit durch den Weltraum. Es gibt kein Bezugssystem, das sich *absolut*[2] in Ruhe befindet.

Alles in der Natur ist in ständiger Bewegung.

10.2. Die gleichförmige Bewegung

Um Bewegungen einfach zu beschreiben, benötigt man den Begriff *Geschwindigkeit*. Erfolgt bei der Bewegung eines Körpers keine Richtungsänderung, so heißt die Bewegung *translatorisch*.

[1] relativ: hier soviel wie bezüglich [2] absolut: hier soviel wie vollkommen



178/1 Die Bohrspindel verschiebt sich geradlinig gleichförmig. In gleichen Zeiten werden gleiche Wege zurückgelegt, da die Bewegung durch den automatischen Vorschub vorgenommen wird

178/2 Die Geschwindigkeit läßt sich durch einen Vektor darstellen. Die Pfeilspitze gibt die Bewegungsrichtung in einem bestimmten Augenblick an, der Pfeillänge entspricht der Betrag der Geschwindigkeit

Legt ein Körper längs einer Geraden in gleicher Zeit gleiche Wege zurück, so heißt seine Bewegung *geradlinig gleichförmig* (Bild 178/1).
Die Geschwindigkeit ist eine physikalische Größe, die Richtung und Betrag der Bewegung eines Körpers angibt (Bild 178/2). Sie läßt sich durch einen Vektor darstellen. Durch die Geschwindigkeit wird somit der Bewegungszustand eines Körpers oder eines Systems von Körpern angegeben. Die Geschwindigkeit ist auch ein wichtiger Faktor zum Bestimmen der Leistung einer Maschine (s. S. 229).
Man bestimmt den Betrag der Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung, indem man den Betrag der Länge der Meßstrecke durch den Betrag der benötigten Zeit dividiert.

Die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung ist der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der benötigten Zeit.

$$\boxed{\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}} \quad \boxed{v = \frac{s}{t}} \qquad (32)$$

Als Maßeinheiten für die Strecke werden vor allem km, m, cm verwendet, als Zeiteinheiten h, min, s. Die gebräuchlichsten Maßeinheiten für die Geschwindigkeiten sind daher

$$m \cdot s^{-1};\ km \cdot h^{-1};\ km \cdot s^{-1};\ m \cdot min^{-1}.$$

Zur Vereinfachung schreibt man statt „der Betrag der Geschwindigkeit" oft kurz „die Geschwindigkeit". Es ist zu beachten, daß zur genauen Bestimmung der Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ auch die Richtung anzugeben ist.

Beispiel

Vorschubgeschwindigkeit (Support[1] mit Drehmeißel) an einer Drehmaschine.

Gegeben:
$s = 100\ mm$
$t = 35\ s$

Gesucht:
Vorschubgeschwindigkeit[2] v (in $mm \cdot s^{-1}$)

Lösung:

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

$$v = \frac{100\ mm}{35\ s}$$

$$\underline{\underline{v \approx 2{,}86\ mm \cdot s^{-1}}}$$

Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt 2,86 $mm \cdot s^{-1}$.

Die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ ist parallel zur Zugspindel gerichtet.

Eine besonders übersichtliche Darstellung von Bewegungsvorgängen erhält man durch Diagramme.

Beispiel

Ein Dieselzug bewegt sich nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit auf gerader Strecke mit einer konstanten Geschwindigkeit von $20\ m \cdot s^{-1}$. Den bei einer gleichförmigen Bewegung zurückgelegten Weg kann man berechnen, wenn $v = \frac{s}{t}$ nach s aufgelöst wird: $s = v \cdot t$.

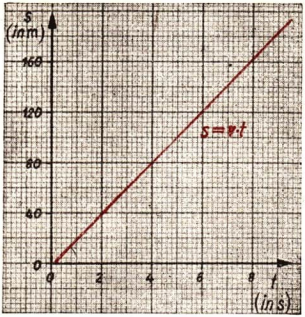
(Vervollständigen Sie die nachstehende Tabelle!)

Tabelle 9: Wege des Zuges in verschiedenen Zeiten

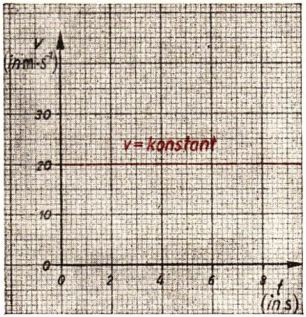
Fahrzeit (in s)	0	0,5	1	2	3	3,6	4	5
Weg (in m)	0		20	40				100

Den Zusammenhang zwischen Weg und Zeit veranschaulicht man grafisch folgendermaßen:
Auf der Abszissenachse (Zeitachse) werden die Zeiten abgetragen, auf der Ordinatenachse (Wegachse) die dazugehörigen Wege. Verbindet man alle Punkte, so erhält man

[1] Support: Werkzeugschlitten
[2] In der Technik ist es üblich, die Vorschubgeschwindigkeit mit s' zu bezeichnen und in $mm \cdot min^{-1}$ anzugeben.



180/1 Weg-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung eines Eisenbahnzuges



180/2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung eines Eisenbahnzuges

eine ansteigende Gerade (Bild 180/1). Der zurückgelegte Weg ist der Zeit proportional: $s \sim t$.
Sie kennen solche Zusammenhänge bereits aus der Mathematik. Der Weg ist eine lineare Funktion der Zeit.
Die grafische Darstellung der Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und der Zeit ergibt eine Parallele zur Abszissenachse (Bild 180/2).

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Ein Schnellzug bewegt sich auf gerader Strecke mit einer Geschwindigkeit von $90\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ gleichförmig. Welche Zeit benötigt er für eine Strecke von 500 m?
   Hinweis: Verwandeln Sie die Maßeinheiten km in m und h in s.

2. Geben Sie einige übliche Maßeinheiten für Geschwindigkeiten an:

Fußgänger	in $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$
Fallschirmspringer	in $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$
Großraketen	in .....
Schall	in .....
Flugzeug	in .....
Traktor	in .....
Elektronenwanderung	in .....

3. Zeichnen Sie die Diagramme für eine gleichförmige Bewegung mit der Geschwindigkeit $v = 14{,}5\ \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$!

10.3. Ungleichförmige Bewegungen

10.3.1. Durchschnittsgeschwindigkeit und Augenblicksgeschwindigkeit

Die meisten Bewegungen der Körper in unserer Umwelt verlaufen nicht gleichförmig, denn es ändern sich entweder der Betrag der Geschwindigkeit, die Richtung der Geschwindigkeit oder beide gleichzeitig. Solche Bewegungen heißen *ungleichförmig*.

Tabelle 10: Beispiele für ungleichförmige Bewegungen

Art der Bewegung	Art der Änderung	Bezeichnung
Anfahren eines Traktors	Betrag der Geschwindigkeit ändert sich (Zunahme)	Beschleunigte Bewegung
Bremsen eines Eisenbahnzuges auf gerader Strecke	Betrag der Geschwindigkeit ändert sich (Abnahme)	Verzögerte Bewegung (negativ beschleunigte Bewegung)
Herabfallender Rammbär	Betrag der Geschwindigkeit ändert sich (gleichmäßige Zunahme)	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung
Umlauf eines Erdsatelliten auf Kreisbahn	Richtung der Geschwindigkeit ändert sich	Rotationsbewegungen (werden in Klasse 11 behandelt)
Kurvenfahrt eines Motorradfahrers	Richtung und Betrag der Geschwindigkeit ändern sich	

● *Geben Sie weitere Beispiele für ungleichförmige Bewegungen an!*

Die *Durchschnittsgeschwindigkeit* $\bar{v}$ für eine ungleichförmige Bewegung ergibt sich als Verhältnis aus dem Gesamtweg und der dazu benötigten Gesamtzeit:

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

Sie ist die mittlere Geschwindigkeit längs der gesamten Wegstrecke.

Beispiel

Rennstrecke Sachsenring bei Hohenstein-Ernstthal. Ein Fahrer der Klasse bis 125 cm³ benötigte für eine Runde von 8,730 km Länge die Zeit 3:38 min = 218 s.

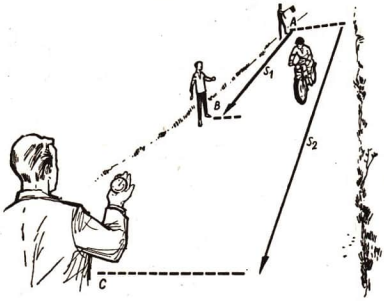
$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

$$\bar{v} = \frac{8{,}730\ \text{km}}{\frac{218}{3600}\ \text{h}}$$

$$\underline{\underline{\bar{v} \approx 144\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}}}.$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt etwa 144 km · h⁻¹.

Beim Durchfahren der Geraden ist die Geschwindigkeit des Rennfahrers größer als 144 km · h^{-1}. Um seine augenblickliche Geschwindigkeit zu bestimmen, kann das folgende Verfahren benutzt werden (Bild 182/1).



182/1 Bestimmen der Durchschnittsgeschwindigkeit eines Motorradfahrers
Bei kleinem Abstand $\overline{BC}$ wird praktisch die Augenblicksgeschwindigkeit gemessen

Beispiel

Die Meßstrecken $\overline{AB}$ und $\overline{AC}$ werden vermessen. Ein Beobachter bei A gibt ein Signal beim Durchfahren des Meßpunktes: Die Beobachter bei B und C setzen Stoppuhren in Gang.
Der Beobachter bei B stoppt die Zeit t_1 für das Durchfahren der Strecke $\overline{AB}$.
Der Beobachter bei C stoppt die Zeit t_2 für das Durchfahren der Strecke $\overline{AC}$.
Die Durchschnittsgeschwindigkeit längs der Strecke $\overline{BC}$ ergibt sich zu

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

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

Läßt man die Meßpunkte B und C einander immer näher rücken, so wird sich die errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit immer mehr der Augenblicksgeschwindigkeit nähern.

Tabelle 11: Durchschnittsgeschwindigkeiten

Beispiel	Geschwindigkeit (in m · s^{-1})	Geschwindigkeit (in km · h^{-1})
Gletscher	$6{,}4 \cdot 10^{-6}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$
Fußgänger	1,4	5
Fallschirmspringer (mit geöffnetem Schirm)	3 ··· 5	10,8 · · 18
Frachtdampfer	7	25
Traktor beim Pflügen	7,5	27
Schnellzug	25	90
Flugzeug (Tu 104)	236	850
Gewehrgeschoß	870	3130
1. kosmische Geschwindigkeit	$7{,}9 \cdot 10^3$	$28{,}4 \cdot 10^3$
2. kosmische Geschwindigkeit	$11{,}2 \cdot 10^3$	$40{,}3 \cdot 10^3$

Die Augenblicksgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der ein Körper einen möglichst klein gewählten Teil seiner Bahn tatsächlich durchläuft.

Die Augenblicksgeschwindigkeit läßt sich annähernd durch eine Geschwindigkeitsbestimmung über eine kleine Meßstrecke ermitteln.

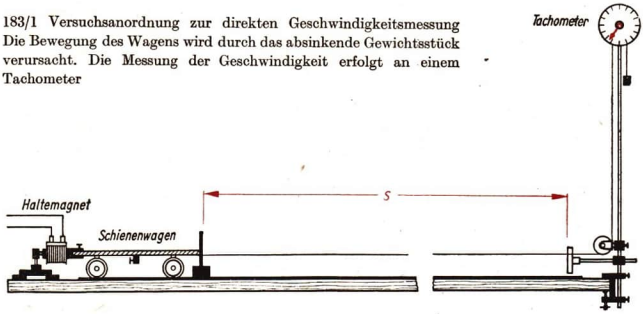
10.8.2. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Wirkt auf einen frei beweglichen Körper eine konstante Kraft, so bewegt sich der Körper geradlinig vorwärts. Seine Geschwindigkeit wird dabei immer größer. Eine solche Bewegung heißt *gleichmäßig beschleunigt*. Die dabei auftretenden Gesetzmäßigkeiten ergeben sich aus dem Versuch nach Bild 183/1.

Tabelle 12: Die zu verschiedenen Fahrzeiten gehörigen Geschwindigkeitswerte

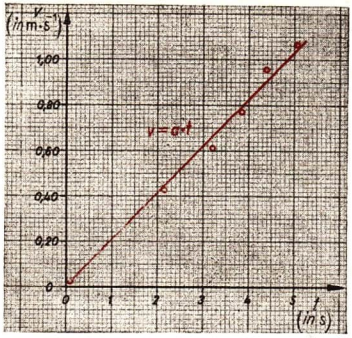
Gesamtfahrzeit t (in s)	Geschwindigkeit v am Ende der gegebenen Gesamtfahrzeit (in $m \cdot s^{-1}$)	$\frac{v}{t} = a$ (in $m \cdot s^{-2}$)
0	0	—
2,2	0,38	0,17
3,3	0,55	0,17
4,0	0,70	0,18
4,6	0,88	0,19
5,3	0,98	0,18

Der letzten Spalte der Tabelle 12 entnimmt man, daß der Quotient aus Geschwindigkeit und Zeit innerhalb der Fehlergrenze (siehe Seite 18) konstant ist.



183/1 Versuchsanordnung zur direkten Geschwindigkeitsmessung
Die Bewegung des Wagens wird durch das absinkende Gewichtsstück verursacht. Die Messung der Geschwindigkeit erfolgt an einem Tachometer

184/1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung



Demnach besteht ein direktes Verhältnis zwischen beiden Größen, und die Meßpunkte der grafischen Darstellung liegen nahezu auf einer Geraden (Bild 184/1).

$$v \sim t.$$

Unter Benutzung eines Proportionalitätsfaktors a, der *Beschleunigung*, erhält man das

Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

Geschwindigkeit = Beschleunigung · Zeit	$v = a \cdot t$	(33.1)

Die Beschleunigung a hat neben dem Betrag auch eine Richtung. Sie läßt sich daher ebenfalls durch einen Vektor darstellen. Statt „Betrag der Beschleunigung" schreibt man oft nur „die Beschleunigung".

Die Maßeinheit der Beschleunigung ergibt sich als Quotient aus einer Geschwindigkeitseinheit und einer Zeiteinheit, meist $m \cdot s^{-2}$ oder $cm \cdot s^{-2}$.
Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung bestimmt man a aus folgender Gleichung:

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

$\Delta v = v_2 - v_1$ Geschwindigkeitsänderung (Zunahme oder Abnahme),

$\Delta t = t_2 - t_1$ Zeitdauer der Änderung.

Man kann demnach die Beschleunigung folgendermaßen definieren:

Beschleunigung = Geschwindigkeitsänderung / Zeitdauer der Änderung	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	(33.2)

Beispiele

1. Ein PKW „Trabant" erreicht 13 Sekunden nach dem Anfahren eine Geschwindigkeit von $50\ km \cdot h^{-1}$; 37 Sekunden nach dem Anfahren eine Geschwindigkeit von $80\ km \cdot h^{-1}$. Wie groß ist die (gleichmäßige) Beschleunigung während der Geschwindigkeitserhöhung von $50\ km \cdot h^{-1}$ auf $80\ km \cdot h^{-1}$?

Gegeben:
$v_2 = 80\ km \cdot h^{-1}$ $t_2 = 37\ s$
$v_1 = 50\ km \cdot h^{-1}$ $t_1 = 13\ s$

Gesucht:
a (in $m \cdot s^{-2}$)

Lösung:

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

$$a = \frac{30 \cdot 10^3\,\mathrm{m}}{36 \cdot 10^2\,\mathrm{s} \cdot 24\,\mathrm{s}}$$

$$\underline{\underline{a \approx 0{,}35\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}}}$$

Die durchschnittliche Beschleunigung bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 50 km · h⁻¹ *auf 80* km · h⁻¹ *beträgt 0,35* m · s⁻².

2. Ein D-Zug verringert durch Bremsen seine Geschwindigkeit von $v_1 = 80\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ auf $v_2 = 0$, d. h. bis zum Stillstand. Die Zeitdauer des Bremsens beträgt 36 s. Wie groß ist die negative Beschleunigung?
(Negative Beschleunigungen heißen auch Verzögerungen).

Gegeben:

$v_2 = 0$
$v_1 = 80\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$
$t = 36\,\mathrm{s}$

Gesucht:

a (in $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$)

Lösung:

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

$$a = \frac{-80 \cdot 10^3\,\mathrm{m}}{36 \cdot 10^2\,\mathrm{s} \cdot 36\,\mathrm{s}}$$

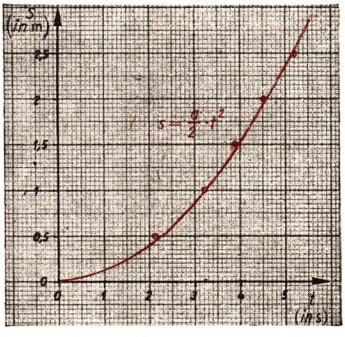
$$\underline{\underline{a = -0{,}62\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}}}.$$

Die negative Beschleunigung beträgt 0,62 m · s⁻².

Zwischen den Wegen bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung und den dazugehörigen Zeiten besteht ebenfalls ein funktionaler Zusammenhang. Trägt man die Meßergebnisse aus Tabelle 13 in ein Diagramm ein, so erhält man einen Teil einer Parabel (Bild 185/1).

Tabelle 13: Zum Versuch nach Bild 183/1

Zeit t (in s)	Weg s (in m)	$\frac{s}{t^2} = k$ (in $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$)
0	0	—
2,2	0,5	0,10
3,3	1,0	0,09
4,0	1,5	0,09
4,6	2,0	0,09
5,3	2,5	0,09



185/1 Weg-Zeit-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Der Tabelle kann man entnehmen, daß der Quotient $\frac{s}{t^2}$ innerhalb der Fehlergrenzen (s. S. 18) konstant ist.
Die zurückgelegten Wege sind demnach dem Quadrat der Zeit proportional:

$$s \sim t^2 .$$

Beim Übergang zur Gleichung erhält man

$$s = k \cdot t^2 .$$

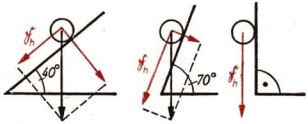
Ein Vergleich zwischen k und a nach den Tabellen 12 und 13 ergibt $k = \frac{a}{2}$.
Dieser Zusammenhang gilt für alle gleichmäßig beschleunigten Bewegungen. Deshalb erhält man das

Weg-Zeit-Gesetz der beschleunigten Bewegung:

$$\boxed{s = \frac{a}{2} \cdot t^2} \tag{34}$$

10.3.3. Der freie Fall

Das Hinabrollen einer Kugel auf einer geneigten Ebene ist ebenfalls eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Ursache der Bewegung ist die Hangabtriebskraft. Vergrößert man die Neigung der geneigten Ebene, so wird die beschleunigende Hangabtriebskraft (Bild 186/1) größer.

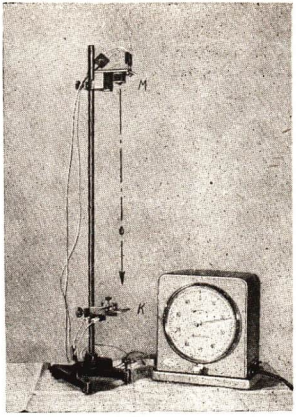


186/1 Die beschleunigende Hangabtriebskraft wächst mit der Neigung der geneigten Ebene.

Bei einem Neigungswinkel von 90° ist die Hangabtriebskraft am größten, und zwar gleich dem Gewicht der Kugel. Die Kugel fällt frei herab.
Für den *freien Fall* gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung auf der geneigten Ebene. Die Beschleunigung nimmt beim freien Fall einen ganz bestimmten Wert an. Man nennt ihn die *Fallbeschleunigung*.
Die **Gesetze des freien Falls** lauten dann:

Weg-Zeit-Gesetz:	$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$	(35.1)
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz:	$v = g \cdot t$	(35.2)
Geschwindigkeit-Weg-Gesetz:[1]	$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$	(35.3)

[1] $t = \frac{v}{g}$; $t^2 = \frac{2s}{g}$; quadriert man die erste Gleichung und setzt t^2 gleich, so folgt $\frac{v^2}{g^2} = \frac{2s}{g}$ und $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}$. Für s setzt man meist h (Höhe!)



187/1 Bestimmung der Fallbeschleunigung g mit Hilfe einer Demonstrationsstopuhr. Bei Betätigung des Schalters gibt der Haltemagnet M die Kugel frei. Gleichzeitig beginnt die Uhr zu laufen. Die auf den Kontakt K auftreffende Kugel stoppt die Uhr

Diese Gesetze gelten nur, wenn Luftwiderstand und Auftrieb des fallenden Körpers vernachlässigt werden können.
Die Fallbeschleunigung läßt sich annähernd durch den in Bild 187/1 beschriebenen Versuch ermitteln. Mit anderen Versuchsanordnungen erhielt man für Messungen auf dem 50. Breitengrad in Meeresspiegelhöhe als genauesten Wert

$$g = 9{,}81079\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}.$$

Für die meisten Messungen genügt ein abgerundeter Wert:

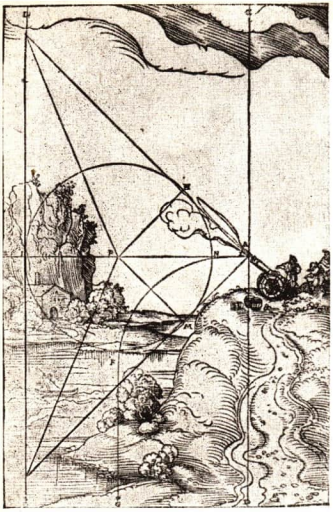
Die Fallbeschleunigung (auch Erd- oder Schwerebeschleunigung) beträgt $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Da die Schwerkraft vom Ort der Messung abhängig ist, nimmt auch die dadurch verursachte Fallbeschleunigung ortsabhängige Werte an.

Beispiel	Höhe	g (in $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$)
Äquator	0	9,78
Pol	0	9,83
Mount Everest	8840 m	9,65
	300 km über der Erde	8,96
	40000 km über der Erde	0,19

10.3.4. Die Entdeckung der Fallgesetze

Bis weit in das Mittelalter hinein gab es einen Stillstand in der Entwicklung der Naturwissenschaften. „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 Forschung berechtigte Zweifel an der Richtigkeit religiöser Glaubenssätze und der biblischen Darstellung aufkamen. Die sich herausbildenden neuen kapitalistischen Produktionsverhältnisse führten in der



188/1 Vorstellung von der Geschoßflugbahn im Mittelalter
TARTAGLIA läßt für Anfang und Ende der Flugbahn noch geradlinige Stücke zu

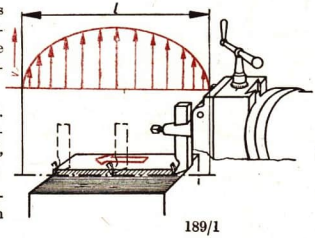
Renaissance zu einer verstärkten Beschäftigung mit technischen und naturwissenschaftlichen Problemen.
Die Bourgeoisie als aufstrebende Klasse gegenüber dem Feudaladel benutzte die kopernikanische Anschauung vom Aufbau des Sonnensystems mit den Planeten. Damit machte sie sich frei von den Dogmen der römisch-katholischen Kirche. Jedoch mußten die Einwände gegen das Kopernikanische Weltsystem mit der sich um die Sonne drehenden Erde beseitigt werden. Beispielsweise war eine Erklärung notwendig, warum durch die sich drehende Erde kein Sturm entsteht, und warum ein hochgeworfener Gegenstand gegenüber der Erde nicht zurückbleibt. Es galt daher, zum Beispiel die Gesetze des freien Falls zu untersuchen. Den Ausgangspunkt für die Entwicklung der *Dynamik*[1] bildeten aber die praktischen Erfordernisse des Geschützwesens, das damals eine immer größere Bedeutung erlangte.
NICCOLO TARTAGLIA (1499 bis 1559) widerlegte zum Beispiel die scholastische Ansicht, daß die Kanonenkugel sich zuerst geradlinig bewegt, dann stehenbleibt und senkrecht nach unten fällt. Er wagte es aber nicht, den bisherigen Ansichten voll zu widersprechen (Bild 188/1).
Den entscheidenden Schlag gegen die Scholastik führte der große italienische Gelehrte GALILEO GALILEI. Er wurde 1564 in Pisa geboren. Bereits mit 25 Jahren erhielt er eine Professur an der Universität Pisa. Von 1592 bis 1609 lehrte GALILEI an der Universität Padua. Von größter Bedeutung sind vor allem seine Untersuchungen über die Bewegungsgesetze, die 1638 veröffentlich wurden. Bereits um 1590 hatte GALILEI die Lehre des ARISTOTELES, daß die Körper um so schneller fallen, je schwerer sie sind, angegriffen.
Zur Begründung seiner eigenen Behauptung, daß alle Körper gleich schnell fallen, führte GALILEI am schiefen Turm zu Pisa Fallversuche durch. Aber die Anhänger des ARISTOTELES glaubten eher den Büchern als den Versuchen. Da GALILEI theoretisch nachweisen konnte, daß für die Bewegung auf der geneigten Ebene ähnliche Verhältnisse gelten müssen, bestätigte er die Gesetze an einer Fallrinne. Er beschreibt seine Versuche folgendermaßen:

[1] Dynamik: Lehre von den Bewegungen der Körper und den einwirkenden Kräften.

„Auf einem Holzbrett von 12 Ellen Länge ... war eine Rinne von etwas mehr als einem Zoll Breite eingegraben. Dieselbe war sehr gerade gezogen, und um die Fläche recht glatt zu haben, war inwendig ein sehr glattes und reines Pergament aufgeklebt; in diese Rinne ließ man eine sehr harte völlig runde und glattpolierte Messingkugel laufen. Nach Aufstellung des Brettes wurde dasselbe einerseits angehoben, dann ließ man die Kugel durch den Kanal fallen und verzeichnete in sogleich zu beschreibender Weise die Fallzeit für die ganze Strecke: häufig wiederholten wir den einzelnen Versuch, zur genaueren Ermittlung der Zeit, und fanden gar keine Unterschiede, auch nicht einmal von einem Zehntteil eines Pulsschlages. Darauf ließen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strecken ... und fanden stets, daß die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten; und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene, in der die Kugel lief.
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 jeden beobachteten Fallzeit: das dieser Art aufgesammelte Wasser wurde auf einer sehr genauen Waage gewogen; aus den Differenzen der Wägemenge erhielten wir die Verhältnisse der Gewichte und der Zeiten, und zwar mit solcher Genauigkeit, daß die zahlreichen Beobachtungen niemals merklich voneinander abwichen."

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Beschreiben Sie die Art der Bewegung des Hobelmeißels in Bild 189/1! Um die Darstellung übersichtlich zu halten, sind alle Geschwindigkeitspfeile um 90° im Uhrzeigersinn gedreht worden.



189/1

2. Bestimmen Sie nach dem Verfahren in 10.3.1. näherungsweise die Augenblicksgeschwindigkeit eines Radfahrers, Motorradfahrers, LKW, Eisenbahnzuges!

3. Berechnen Sie die Durchschnittsgeschwindigkeit bei folgenden sportlichen Leistungen in $km \cdot h^{-1}$:

   Radsportler G. A. Schur, Praha-Brno, 220 km in 5 : 29 : 02 h,
   Langstreckler E. Zatopek, 20-km-Lauf in 59 : 51,8 min,
   Eisschnelläuferin H. Haase, 500-m-Lauf in 45,9 s,
   Mittelstreckler S. Valentin, 1000-m-Lauf in 2 : 16,7 min,
   Skiläufer K. Werner, 50-km-Langlauf in 3 : 24 h,
   Schwimmerin K. Beyer, 200-m-Brustschwimmen in 2 : 48,0 min,
   Hürdenläuferin G. Birkemeyer, 80-m-Hürdenlauf in 10,5 s.
   Ordnen Sie die Ergebnisse!

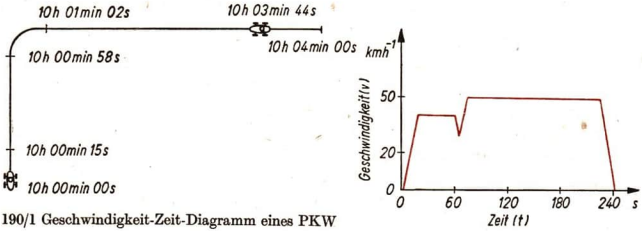
4. Berechnen Sie folgende Durchschnittsbeschleunigungen und ordnen Sie die Ergebnisse!
   Wartburg vom Stillstand auf $80\ km \cdot h^{-1}$ in 15 s,
   MZ-125-Rennmaschine vom Stillstand auf $100\ km \cdot h^{-1}$ in 6 s,
   Flugzeug Tu 104 bei der Landung: Geschwindigkeit beim Aufsetzen $225\ km \cdot h^{-1}$, Zeitdauer des Bremsens ohne Schirm 48 s, Endgeschwindigkeit $0\ km \cdot h^{-1}$! (Mit Bremsfallschirm beträgt die Zeit nur 35 s.)
   Bestimmen Sie in allen Beispielen die zurückgelegten Wege!

5. Ein Motorradfahrer fährt mit unzulässig hoher Geschwindigkeit von $v = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ durch eine Ortschaft.
50 m vor dem Fahrer wird durch ein anderes Fahrzeug (Torausfahrt!) die Straße blockiert. Kann der Motorradfahrer die Maschine durch Bremsen noch zum Stillstand bringen (vgl. Tabelle 14)?

Anleitung: Die Zeit ist zu eliminieren. Setzen Sie $a = \frac{v}{t}$ in die Gleichung $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ ein! Welche neue Formel ergibt sich? Bestimmen Sie nunmehr die Bremsstrecke! Während der Reaktionszeit legt der Fahrer noch eine Strecke von etwa 20 m zurück, bevor die Bremsen wirksam werden. Welche Folgerungen ergeben sich für Ihr Verhalten im Straßenverkehr (auch für Fußgänger)?

Tabelle 14: Durchschnittsbeschleunigungen

Beispiel	Beschleunigung beim Anfahren	Verzögerung beim Bremsen
Güterzug	$0{,}08\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$	$-\ 0{,}15\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
D-Zug (elektr.)	$0{,}25\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$	$-\ 0{,}60\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
Berliner S-Bahn	$0{,}55\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$	—
Geschoß im Lauf	$500\,000\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$	—
Entfaltungsstoß beim Öffnen des Fallschirms	—	$-\ 5\ g \cdots -\ 8\ g$
Raketen-Versuchsschlitten	$6\ g$	$-\ 25\ g \cdots -\ 40\ g$
Motorrad		
schwaches Bremsen (nasser Asphalt)	—	$-\ 2\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
heftiges Bremsen (nur auf trockener, griffiger Straße, Gefahr des Blockierens)	—	$-\ 6\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$



190/1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm eines PKW

6. Erklären Sie das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm nach Bild 190/1.

7. Die Bremsstrecke eines D-Zuges, der seine Geschwindigkeit von $80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ bis auf Null herabsetzt, beträgt 400 m. Kontrollieren Sie die Angabe der negativen Beschleunigung in Tabelle 14!

8. Läßt man aus einer Höhe von 20 m gleichzeitig eine Bleikugel, ein Holzstück und eine Feder herunterfallen, so kommen die Körper nicht gleichzeitig am Erdboden an. Das Versuchsergebnis scheint den Fallgesetzen zu widersprechen! Erklären Sie!

9. Welche Endgeschwindigkeit hat ein Schwimmsportler nach einem Sprung vom 10-m- und 5-m-Turm und vom 3-m-Brett?
Anleitung: Der Luftwiderstand kann vernachlässigt werden. Für g setzen Sie $10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$. Angabe der Geschwindigkeit in $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ und $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$.
Vergleichen Sie die Werte mit anderen Geschwindigkeiten! Benutzen Sie eine Quadrattafel!

10. Warum ist es nicht notwendig, den Luftwiderstand bei der Bewegung auf der geneigten Ebene zu berücksichtigen (vgl. Aufgabe 17)? Wovon ist er hauptsächlich abhängig?

11. Von einer Brücke fällt ein Stein in das Wasser eines Flusses. Die Fallzeit beträgt 1,7 s. Berechnen Sie die Brückenhöhe über dem Wasserspiegel! (Der Luftwiderstand ist nicht zu berücksichtigen. $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$)

12. Geben Sie an, ob man bei den folgenden Beispielen mit den Gleichungen $v = g \cdot t$ und $s = \frac{g}{2} \cdot t^2$ rechnen darf. Begründen Sie Ihre Meinung!
Fallschirmspringer am geöffneten Schirm — Schwimmer beim Sprung vom 3-m-Brett — Regentropfen aus 2000 m Höhe — Fallröhre (ausgepumpt) — Fallröhre (luftgefüllt).

13. Der Olympiasieger im Marathonlauf 1896 in Athen, der Grieche SPIRIDON LOUIS, durchlief die 42,195 km in 2 : 55 : 20 h. Der Äthiopier ABEBE BIKILA siegte 1960 in Rom über die gleiche Strecke in 2 : 15 : 16 h. Wie groß wäre der Vorsprung des Siegers von 1960 gewesen? (Rechnen Sie mit Durchschnittsgeschwindigkeiten über die gesamte Strecke!)

14. Beim Zeitfahren der Friedensfahrer startet der Fahrer Nr. 72 um 9.10 Uhr. Für eine Fahrstrecke von 42 km benötigt er 59 : 02 min. Der Fahrer Nr. 43 ist 9.08 Uhr gestartet. Er legt die Strecke in 61 : 15 min zurück. Um welche Uhrzeit überholt Fahrer Nr. 72 den anderen Fahrer?

15. Das Weg-Zeit-Gesetz des freien Falls läßt sich auf folgende Weise akustisch bestimmen:
In eine 3 m lange Schnur knüpft man an den folgenden Stellen je eine Mutter ein: 0, 12, 48, 108, 192, 300 cm.
In einem Treppenhaus läßt man die Schnur frei herabhängen. Die unterste Kugel soll gerade den Boden berühren. Läßt man die Schnur los, so schlagen die Muttern in gleichen Zeitabständen auf. (Die Schnur in eine kleine Holzkiste fallen lassen!)
Warum sind die Zeitabstände immer gleich?

16. Bei einem Kurzstreckenläufer wurden folgende Geschwindigkeiten gemessen:

zurückgelegte Strecke (in m)	0	2,5	5	10	15	20	30	40
Augenblickgsgeschwindigkeit beim Durchlaufen des Meßpunktes (in $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$)	0	5,0	6,2	7,5	8,3	9,0	9,7	9,8

Die Geschwindigkeit blieb dann nahezu konstant.
16.1. Stellen Sie die Geschwindigkeit als Funktion der Zeit grafisch dar!
16.2. Welche Art einer Bewegung liegt vor?
16.3. Welche Zeit benötigt der Läufer für die letzten 60 m, wenn diese mit der konstanten Geschwindigkeit von $9{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ durchlaufen werden?

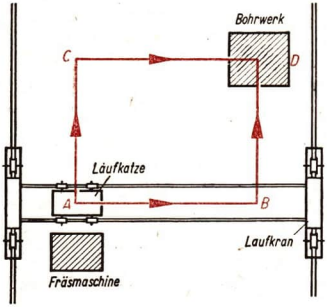
17. Führen Sie den Galileischen Versuch an der geneigten Ebene selbst aus! Stellen Sie mit Hilfe folgender Geräte die Versuchsanordnung zusammen:
Schiene einer Schleudergardine, Metallkugel, Konservenbüchse mit Glasröhrchen, Meßzylinder oder Waage und Becherglas!

11. Zusammengesetzte Bewegungen

Der mit modernen Krananlagen ausgerüstete Übersechafen Rostock ist bekannt als ein schneller Umschlaghafen.
In der Technik gibt es nur wenige Beispiele, wo ein Körper eine einfache Bewegung ausführt. Meist erfolgen mehrere Bewegungen gleichzeitig.
Das Anheben der Last, das Schwenken und die Bewegung entlang der Kaimauer können einander überlagert werden.

11.1. Überlagerung von Bewegungen

Größere Werkstücke transportiert man vor allem mit Kränen. Die Transportzeit soll möglichst gering sein. Um diese Forderung zu erfüllen, müssen Gesetzmäßigkeiten der Bewegungslehre beachtet werden.



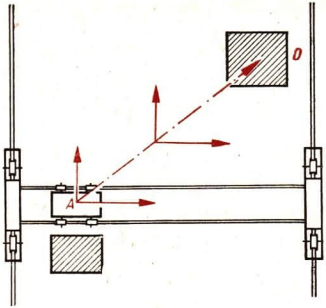
Beispiel

Ein Werkstück soll von der Fräsmaschine *A* zum Bohrwerk *D* gebracht werden (Bild 192/1).

1. *Untersuchen Sie, in welcher Reihenfolge die Kranbrücke und die Laufkatze beim Transport des Werkstücks von A nach D über C beziehungsweise über B bewegt werden!*
2. *Vergleichen Sie die Transportwege und Transportzeiten miteinander, wenn vorausgesetzt wird, daß die Bewegungen gleichförmig erfolgen!*
3. *Gibt es noch weitere Transportwege?*

192/1 Laufkran in einer Werkhalle (Blick von oben). Kranbrücke und Laufkatze können sich unabhängig voneinander bewegen

193/1 Der Endpunkt D wird unabhängig davon erreicht, ob die Teilbewegungen nacheinander oder gleichzeitig erfolgen. Bei gleichzeitiger Verschiebung in beiden Richtungen ist aber der Zeitaufwand am geringsten. Der kürzeste Transportweg verläuft diagonal. Die Kranführerin wird daher Kranbrücke und Laufkatze gleichzeitig verschieben, wenn es die Sicherheitsvorschriften gestatten. Die beiden Teilbewegungen überlagern sich dabei, ohne einander zu stören.



Dieser physikalische Sachverhalt trifft auch bei mehr als zwei Teilbewegungen zu. Für Körper, die gleichzeitig mehrere Bewegungen ausführen, gilt der

Satz von der Unabhängigkeit der Bewegung:

Führt ein Körper mehrere Bewegungen gleichzeitig aus, so überlagern sich die Teilbewegungen, ohne einander zu stören.

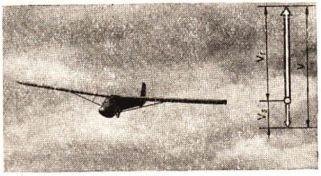
11.2. Zusammensetzen von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Aus dem Kapitel 10.2. ist uns bekannt, daß sich Geschwindigkeiten durch Vektoren darstellen lassen. (Begründung?) Deshalb ist auch eine vektorielle Addition und damit die zeichnerische Bestimmung von resultierenden Geschwindigkeiten möglich, die auf der Grundlage des Parallelogrammsatzes erfolgt.

Beispiele

1. **Beide Bewegungen haben entgegengesetzte Richtung.** Ein Segelflugzeug besitzt eine Sinkgeschwindigkeit v_s in der umgebenden Luft[1] von $-0{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Eine aufsteigende Warmluftströmung hat eine Geschwindigkeit von $v = 3{,}5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Steigt oder sinkt das Segelflugzeug gegenüber der Erdoberfläche?

Geometrische Lösung:



Rechnerische Lösung:

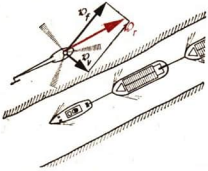
$$v_r = v_s + v$$
$$v_r = -0{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} + 3{,}5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$$
$$\underline{\underline{v_r = +2{,}7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}.}}$$

Das Segelflugzeug steigt mit einer Geschwindigkeit von 2,7 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

[1] Die Sinkgeschwindigkeit ist senkrecht nach unten gerichtet.

2. **Die Bewegungsrichtungen stehen senkrecht aufeinander.** Ein Hubschrauber fliegt zur Überwachung entlang eines Bewässerungskanals. Dabei kommt er plötzlich in ein Gebiet mit starkem Seitenwind, so daß er neben seiner Fluggeschwindigkeit von $v_f = 230\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ noch eine Versetzungsgeschwindigkeit von $v_v = 54\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ rechtwinklig zur Flugrichtung erhält. Welche Geschwindigkeit v_r gegenüber dem Erdboden[1] besitzt der Hubschrauber?

Geometrische Lösung:



Rechnerische Lösung:

$$v_r = \sqrt{v_f^2 + v_v^2}$$

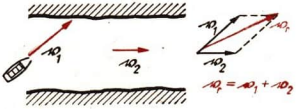
$$v_r = \sqrt{(230\ \mathrm{km \cdot h^{-1}})^2 + (54\ \mathrm{km \cdot h^{-1}})^2}$$

$$\underline{\underline{v_r \approx 236\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}}}$$

Der Hubschrauber fliegt über Grund mit einer Geschwindigkeit von etwa 236 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$.

3. **Die Bewegungsrichtungen bilden einen beliebigen Winkel.** Ein Motorboot überquert einen Fluß. Durch die antreibende Schiffsschraube erhält es die Geschwindigkeit $v_1 = 8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, durch die Strömung die Geschwindigkeit $v_2 = 4{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Wie groß ist die resultierende Geschwindigkeit v_r, wenn die Geschwindigkeitsrichtungen einen Winkel von 43° einschließen?

Geometrische Lösung:



Rechnerische Lösung:

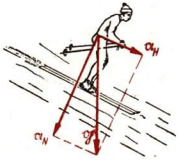
Eine rechnerische Lösung ist mit den Hilfsmitteln der Trigonometrie möglich.

Aus der Vektoraddition ergibt sich eine resultierende Geschwindigkeit über Grund von etwa 12 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

In entsprechender Weise kann man Wege und Beschleunigungen geometrisch addieren.

Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen lassen sich nach dem Parallelogrammsatz zusammensetzen. Die Diagonale gibt Betrag und Richtung der Resultierenden an.

Auch eine Zerlegung von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Wegen in Komponenten ist möglich. Man wendet dabei die gleichen Methoden wie beim Zerlegen von Kräften an (Bild 194/1).



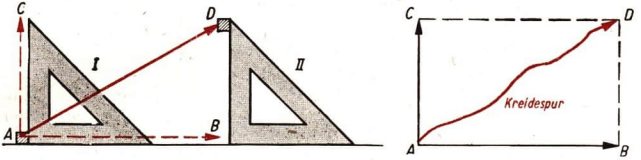
194/1 Skiläufer bei der Abfahrt am Hang. Die Beschleunigung $\mathfrak{g}$ wird in die Teilbeschleunigungen $\mathfrak{a}_N$ und $\mathfrak{a}_H$ zerlegt. Welche Wirkungen haben die beiden Komponenten?

[1] Es wird oft dafür „über Grund" geschrieben.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Ein Küstenwachschiff der Volksmarine läuft mit einer Geschwindigkeit von 15 kn nach SW. Durch eine Strömung erhält es zusätzlich eine Geschwindigkeit von 2 kn nach Ost.
1.1. Bestimmen Sie durch Zeichnung die resultierende Geschwindigkeit über Grund nach Betrag und Richtung! Die Richtung soll im Uhrzeigersinn drehend von Nord aus gemessen werden.
1.2. Zeichnen Sie das Parallelogramm der Wege für eine Fahrzeit von 10 Minuten. Hinweis: Rechnen Sie die Geschwindigkeitsangaben in $km \cdot h^{-1}$ um. 1 kn (Knoten) = 1 sm (Seemeile) $\cdot h^{-1}$. 1 sm = 1,852 km.

2. Veranschaulichen Sie die Überlagerung zweier Bewegungen mit einem Versuch nach Bild 195/1!



195/1 Spannen Sie eine Reißschiene oder eine Leiste auf dem Reißbrett fest. Das Winkeldreieck hat dadurch eine Führung. Bei A befinde sich ein Bleistift, der durch entsprechende Verschiebungen nach D gelangen soll.

3. Ein Werkstück wird durch einen Laufkran transportiert. Es überlagern sich folgende Geschwindigkeiten:
Geschwindigkeit der Kranbrücke: $v_1 = 0{,}5\ m \cdot s^{-1}$,
Geschwindigkeit der Laufkatze: $v_2 = 0{,}3\ m \cdot s^{-1}$.
Gleichzeitig wird das Werkstück mit einer Geschwindigkeit von $0{,}2\ m \cdot s^{-1}$ gehoben. Wie groß ist der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit?

4. Bauen Sie aus Ihrem Metallbaukasten das Funktionsmodell eines Laufkrans und führen Sie das Modell Ihren Mitschülern vor!

5. Ein Radfahrer erteilt dem Fahrrad durch Antrieb eine Beschleunigung von $a = 0{,}8\ m \cdot s^{-2}$. Wie groß ist die resultierende Beschleunigung in Fahrtrichtung, wenn der Radfahrer eine Straße mit einem Anstieg von 5° hinauffährt?
Anleitung: Geometrische Lösung! Die ebenfalls wirkende Erdbeschleunigung g muß in zwei Komponenten zerlegt werden.

6. Die sowjetischen Kosmonauten führen ein umfangreiches Trainingsprogramm durch. Unter anderem läuft der Kosmonaut auf einem Band, das sich entgegengesetzt zur Laufrichtung bewegt und dessen Geschwindigkeit regulierbar ist. Am Körper angebrachte Geräte registrieren die Belastung der Körperorgane. Wie kann der Kosmonaut zu höherer Leistung veranlaßt werden?

12. Der Wurf

Das Geschoß wird durch die Treibladung aus dem Rohr des Granatwerfers geschleudert. Die Berechnung der Wurfbahn eines Geschosses erfolgt auf der Grundlage physikalischer Gesetzmäßigkeiten.
Beim Wurf überlagern sich stets zwei Teilbewegungen, und zwar eine gleichförmige Bewegung durch die beim Abwurf erteilte Anfangsgeschwindigkeit v_0 und eine beschleunigte Bewegung durch die Einwirkung des Gewichtes.

12.1. Der lotrechte Wurf

Beim *lotrechten Wurf nach unten* erfolgen die Teilbewegungen auf der gleichen Wirkungslinie, beispielsweise wenn ein Handballspieler den Ball senkrecht nach unten wirft.

Um die Darstellung einfach zu gestalten, sehen wir vorläufig vom Einfluß des Luftwiderstandes ab. Ein solches Vorgehen wird oft in der Physik benutzt, da einerseits in vielen Fällen die Abweichungen gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen gering sind, während andererseits die Berücksichtigung aller Einflüsse meist einen hohen mathematischen Aufwand erfordert.

Der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit beim lotrechten Wurf nach unten ergibt sich als algebraische Summe der Beträge der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der Fallgeschwindigkeit $v = g \cdot t$:

$$v_r = v_0 + g \cdot t \ .$$

Den Betrag des resultierenden Weges erhält man ebenfalls algebraisch als Summe der Beträge der Einzelwege. Ohne Einfluß der Schwerkraft würde der Weg $s = v_0 \cdot t$ zurückgelegt; hinzu kommt der Weg auf Grund des freien Falls:

$$s_r = v_0 \cdot t + \frac{g}{2} \cdot t^2 \ .$$

Beim *lotrechten Wurf nach oben* erfolgen die Bewegungen zwar auf der gleichen Wirkungslinie, sind aber entgegengesetzt gerichtet. Den Betrag der resultierenden Ge-

schwindigkeit und des resultierenden Weges erhält man daher als Differenz der Beträge der Einzelgeschwindigkeiten und Einzelwege:

$$v_r = v_0 - g \cdot t \quad \text{und} \quad s_r = v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2.$$

Aus den Gleichungen des lotrechten Wurfs lassen sich bestimmte Zusammenhänge herleiten. Beim Wurf nach oben wird die resultierende Geschwindigkeit immer kleiner. Im Umkehrpunkt hat sie den Wert Null. Setzt man in der Gleichung $v_r = v_0 - g \cdot t$ für v_r den Wert Null ein, so ergibt sich die Gleichung

$$v_0 - g \cdot t_h = 0.$$

Mit t_h bezeichnet man die Zeit bis zum Erreichen des Umkehrpunktes, die **Steigzeit.**

$$\boxed{\textbf{Steigzeit} = \frac{\textbf{Anfangsgeschwindigkeit}}{\textbf{Fallbeschleunigung}} \quad \Big| \quad t_h = \frac{v_0}{g}} \tag{36.1}$$

Dieser Wert wird in der Gleichung $s_r = v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2$ an die Stelle von t gesetzt. Für die **Steighöhe** s_h erhält man:

$$s_h = v_0 \cdot t_h - \frac{g}{2} \cdot t_h^2, \qquad s_h = v_0 \cdot \frac{v_0}{g} - \frac{g}{2} \cdot \frac{v_0^2}{g^2}, \qquad s_h = \frac{2 v_0^2 - v_0^2}{2 g}.$$

$$\boxed{\textbf{Steighöhe} \quad \Big| \quad s_h = \frac{v_0^2}{2 g}} \tag{36.2}$$

Geben Sie den physikalischen Inhalt der Formel in Worten an!

Beispiele

1. Zur Erleichterung der schweren Arbeit des Steinsetzers werden Handrammen mit Motorantrieb verwendet. Die Energie einer Verbrennungskraftmaschine schleudert die Ramme nach oben (Bild 197/1). Welche Höhe erreicht die Ramme, wenn die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 2{,}42\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ beträgt? Wie lange dauert ein Arbeitsgang?

Gegeben:
$v_0 = 2{,}42\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
$g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

Gesucht:
Steighöhe s_h
Steigzeit t_h

Lösung:

$$s_h = \frac{v_0^2}{2 g}$$

$$s_h = \frac{(2{,}42\ \mathrm{m \cdot s^{-1}})^2}{2 \cdot 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}}$$

$$\underline{\underline{s_h \approx 0{,}30\ \mathrm{m}.}}$$

197/1

Die Ramme erreicht eine Höhe von 0,30 m.

$$t_h = \frac{v_0}{g}$$

$$t_h = \frac{2{,}42\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{9{,}81\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}}$$

$$\underline{\underline{t_h \approx 0{,}25\,\mathrm{s}}}.$$

Die Steigzeit beträgt ungefähr 0,25 s. Da Auf- und Abwärtsbewegung gleich lange dauern, trifft die Ramme 0,5 s nach dem Hochschleudern wieder auf den Boden.

2. Am 1. Mai 1960 wurde über sowjetischem Territorium im Gebiet von Swerdlowsk ein US-Spionageflugzeug in einer Höhe von 20000 m durch eine Flugabwehrrakete abgeschossen.

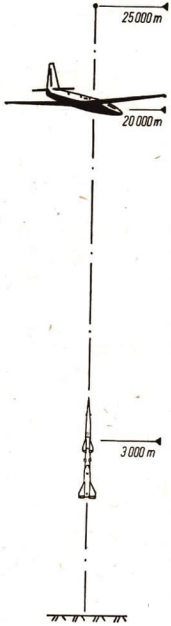
Wir wollen untersuchen, ob dazu eine Rakete verwendet werden kann, die auf senkrechter Bahn aufsteigt. Das Triebwerk hört bei 5000 m auf zu arbeiten, und die Gipfelhöhe beträgt 25000 m. Unter diesen Bedingungen gelten die Gesetze des Wurfes.

2.1. Wie lange dauert der Teil des Aufstieges, den die Rakete antriebslos zurücklegt?

2.2. Wie lange dauert die Antriebsphase bei einer Beschleunigung von $a = 6\,g$?

2.3. Wie groß ist die Gesamtsteigzeit?

2.4. Kann man unter den angegebenen physikalischen Bedingungen mit Erfolg eine ungesteuerte Abwehrrakete einsetzen?



Zu 2.1. *Gegeben:* *Gesucht:*

Steighöhe $s_h = 20000\,\mathrm{m}$ Steigzeit t_h (in s)

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

Lösung: $t_h = \frac{v_0}{g}$ $\quad v_0 = \sqrt{2\,g \cdot s_h}$

$$t_h \approx \frac{626}{9{,}81}\,\mathrm{s} \qquad v_0 = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 20000\,\mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}}$$

$$\underline{\underline{t_h \approx 64\,\mathrm{s}}} \qquad \underline{v_0 = 626\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}$$

Zu 2.2. *Gegeben:* *Gesucht:*

Endgeschwindigkeit $v_0 \approx 626\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ Antriebszeit t_A (in s)

Beschleunigung $a = 6\,g$

Lösung: $t_A = \frac{v_0}{a}$

$$t_A \approx \frac{626}{6 \cdot 9{,}81}\,\mathrm{s}$$

$$\underline{\underline{t_A \approx 10{,}6\,\mathrm{s}}}$$

Zu 2.3.

$$t_{ges} = t_A + t_h$$

$$t_{ges} = 11\,\mathrm{s} + 64\,\mathrm{s}$$

$$\underline{\underline{t_{ges} = 75\,\mathrm{s}}}.$$

Zu 2.4.

Da die Steigzeit über eine Minute beträgt, muß die Rakete abgeschossen werden, wenn sich das Flugzeug noch viele Kilo-

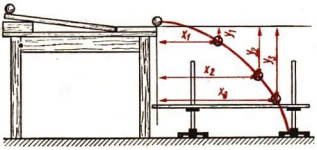
meter vor der Abschußstelle befindet. Es ist verständlich, daß die Treffmöglichkeit bei der großen Wendigkeit der Flugzeuge unter den genannten Bedingungen nur gering wäre. Das trifft nicht nur für einen senkrechten Aufstieg, sondern für alle Wurfbahnen zu. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, solche Raketen mit zielsuchenden Geräten auszurüsten. Die Aufstiegbahn der Rakete erfolgt dann nicht mehr senkrecht, sondern sie folgt dem Flugzeug. Hierfür gelten nicht mehr die einfachen Gesetze des Wurfes.

12.2. Der waagerechte Wurf

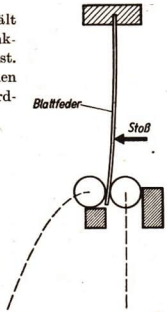
Beim waagerechten Wurf stehen die Bewegungsrichtungen senkrecht aufeinander. In horizontaler Richtung erfolgt eine gleichförmige Bewegung, senkrecht nach unten eine beschleunigte Bewegung.

Nach dem Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen überlagern sich die Teilbewegungen ungestört. Daraus folgt zum Beispiel, daß für gleiche Fallhöhen die Fallzeiten beim horizontalen Wurf und beim freien Fall gleich groß sind (Bild 199/2).

Die Überlagerung der gleichförmigen und der beschleunigten Bewegung ergibt die in Bild 199/1 gezeichnete Kurve.
Die grafische Darstellung der Überlagerung läßt sich aus zusammengehörigen x-Werten und y-Werten des Versuches vornehmen. In Richtung der Abszissenachse trägt man die Wege ($x = v_0 \cdot t$) auf Grund der gleichförmigen Bewegung ab und in Richtung der Ordinatenachse die Fallwege $\left(y = \frac{g}{2} \cdot t^2\right)$. Die resultierende Bahnkurve heißt Wurfparabel[1] (Bild 200/2).



199/1 Die Kugel rollt eine Fallrinne herab und bewegt sich danach horizontal weiter. In der Luft beschreibt sie eine Wurfkurve. Das senkrecht verschiebbare Brett ist zur Markierung einiger Bahnpunkte mit Kohlepapier belegt



199/2 Die Blattfeder hält bis zum Wurf die senkrecht fallende Kugel fest. Beide Kugeln erreichen gleichzeitig den Erdboden

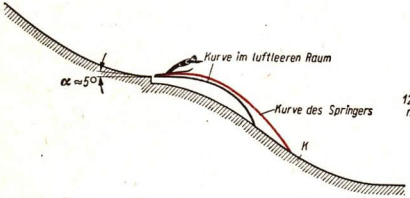
[1] Löst man $x = v_0 \cdot t$ nach t auf und setzt diesen Wert in die Gleichung $y = -\frac{g}{2} \cdot t^2$ ein, so erhält man

$$y = -\frac{g}{2} \cdot \frac{x^2}{v_0^2} \quad \text{oder} \quad y = -\frac{g}{2v_0^2} \cdot x^2.$$

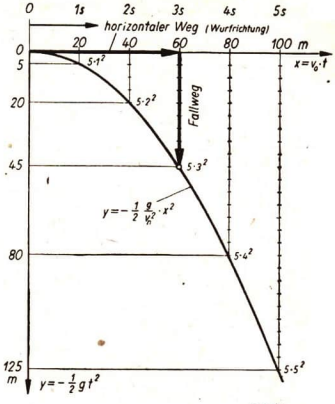
$\frac{g}{2v_0^2} = \mathrm{m}$ ist eine Konstante. Man kann demnach schreiben $y = -\mathrm{m} \cdot x^2$. Das ist die Gleichung einer Parabel.

Sie hat nur im luftleeren Raum Parabelform. Unter dem Einfluß des Luftwiderstandes treten oft erhebliche Abweichungen auf, beispielsweise beim Skisprung (Bild 200/1).

200/1 Der Skisprung ist kein horizontaler Wurf. Der Schanzentisch ist etwa 5° geneigt. Außerdem wirken in erheblichem Umfange Gesetze der Aerodynamik. Warum legt sich der Springer weit nach vorn und hebt die Skispitzen? Denken Sie an einen Tragflügel!



200/1



200/2

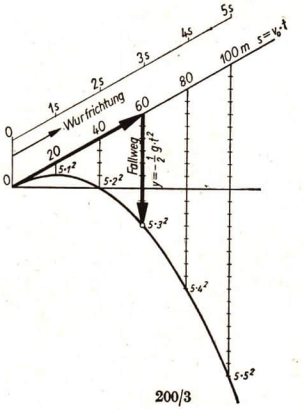
12.3. Der schräge Wurf

Die am häufigsten vorkommende Form des Wurfs ist der schräge Wurf. Der Körper wird dabei unter einem beliebigen Winkel α zur Horizontalen geworfen.

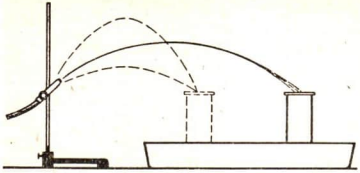
Die einzelnen Bahnpunkte beim schrägen Wurf erhält man durch Überlagerung der beiden Teilbewegungen in Abwurfrichtung und in vertikaler Richtung. Die Bahnkurve ist wiederum eine Parabel (Bild 200/3), deren Achse jedoch parallel zur y-Achse verläuft.

● *Wo liegt die Parabelachse beim horizontalen Wurf?*

Wurfweite und Steighöhe des schrägen Wurfs hängen nicht nur von der Anfangsgeschwindigkeit v_0, sondern auch vom Neigungswinkel der Abwurfrichtung ab. Bei



200/3



201/1 Neigungswinkel und Wurfweite

Neigungswinkeln, die sich zu 90° ergänzen, erhält man gleiche Wurfweiten. Die größte Wurfweite ergibt sich bei einem Neigungswinkel von 45° (Bild 201/1).

Die formelmäßigen Zusammenhänge für Wurfhöhe, Wurfzeit und Wurfweite lassen sich mit Hilfe der Trigonometrie wiedergeben.

12.4. Die Ballistik

Auch beim schrägen Wurf gelten die in 12.3 genannten Gesetzmäßigkeiten nur unter der Bedingung, daß außer der Schwerkraft keine anderen Kräfte einwirken. In der Praxis trifft das meist nicht zu. Der Luftwiderstand verursacht größere Abweichungen. Man bezeichnet Wurfbahnen, die von den Einflüssen der Atmosphäre verändert werden, als *ballistische Kurven*. Sie treten vor allem bei Geschossen auf.
Die Lehre von den Geschoßbahnen heißt die *Ballistik*. Mit ihrer Entwicklung[1] beschäftigten sich seit dem 17. Jahrhundert viele bedeutende Gelehrte, zum Beispiel Galilei, Torricelli, Newton, Bernouilli und Euler. Die Ballistik ist als Wissenschaft weder schlecht noch gut. Es kommt darauf an, wozu sie benutzt wird. Von der Bourgeoisie wurde sie jahrhundertelang in Angriffskriegen zu räube-

[1] Beachten Sie den Abschnitt 10.3.4. (Die Entdeckung der Fallgesetze)

201/2 Flugbahnen von Funken beim Schweißen. Die glühenden Teilchen werden unter verschiedenen Winkeln weggeschleudert

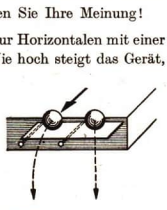
201/3 Sportschützen beim Training auf dem Schießstand. In den Schießsportgruppen der Gesellschaft für Sport und Technik kann jeder Sportler die Schießfertigkeiten erwerben, die beim Mehrkampfsport gebraucht werden.

rischen Überfällen mißbraucht. Wir aber wenden die Gesetzmäßigkeiten der Ballistik zum Schutz unserer Republik vor feindlichen Angriffen an.

Die ständige Erhöhung der Verteidigungsbereitschaft erfordert ein großes Wissen. Jeder Soldat unserer Nationalen Volksarmee muß daher auch Grundkenntnisse der Ballistik beherrschen, um die Waffentechnik voll zu meistern.
Die Bestimmung ballistischer Kurven ist jedoch mit einem erheblichen rechnerischen Aufwand verbunden, der viel Zeit erfordert. Bei der Artillerie werden deshalb vorwiegend Tabellen benutzt, um eine schnelle Gefechtsbereitschaft zu gewährleisten. Die Visiereinrichtung des Gewehrs ist ebenfalls so beschaffen, daß ohne langes Überlegen das Ziel richtig erfaßt wird.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Formulieren Sie folgende Gleichungen in Worten:
   $v_r = v_0 - g \cdot t,$
   $s_r = v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2.$
2. Ein Körper wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 40\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ hochgeworfen.
   2.1. Bestimmen Sie die Geschwindigkeit nach 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 s!
   Verwenden Sie für g den Wert $10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$! Stellen Sie die Ergebnisse in Tabellenform zusammen! Vergleichen Sie die Geschwindigkeiten zu den Zeiten 0 s, 4 s, 8 s miteinander! Was bedeutet das Minuszeichen zum Zeitpunkt 8 s? Geben Sie Ihre Erkenntnis in Satzform wieder!
   2.2. Rechnerisch erhält man auch für die Zeiten 9 s, 10 s usw. einen Geschwindigkeitswert. Wie ist das zu erklären?
3. Welche Anfangsgeschwindigkeit hatte ein Fußball, der 20 m senkrecht nach oben gestoßen wurde? Setzen Sie für $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ ein!
4. Die Geschwindigkeit beim horizontalen Wurf erhält man durch vektorielle Addition.
   Zeichnen Sie das Parallelogramm für die Wurfzeiten 5 s und 10 s mit $v_0 = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ und $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$!
   Welche Abhängigkeit besteht zwischen Wurfdauer und Richtung der resultierenden Geschwindigkeit? Welchem Wert nähert sich der Winkel α zwischen der Horizontalen und der Resultierenden für sehr große Wurfzeiten, zum Beispiel für 100 s?
5. Ein Geschoß wird auf einem Schießstand in einer Höhe von 1,5 m horizontal abgeschossen. Die Anfangsgeschwindigkeit beträgt $330\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Gleichzeitig läßt man ein gleiches Geschoß aus einer Höhe von 1,5 m frei fallen. Welches Geschoß erreicht zuerst den horizontalen Erdboden? Der Luftwiderstand soll vernachlässigt werden. Begründen Sie Ihre Meinung!
6. Bei einem Speerwurf wurde der Speer unter einem Winkel von 35° zur Horizontalen mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 28\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ davongeschleudert. Wie hoch steigt das Gerät, wenn die Abwurfhöhe 1,90 m beträgt?
   Anleitung: Zerlegen Sie grafisch v_0 in zwei Komponenten in x- und y-Richtung. Mit der Komponente v_y rechnen Sie weiter wie beim lotrechten Wurf nach oben. Der Luftwiderstand ist zu vernachlässigen.
7. Prüfen Sie die Behauptung, daß für gleiche Fallhöhen die Fallzeiten beim horizontalen Wurf und beim freien Fall gleich groß sind, an einem Versuch nach Bild 202/1 nach.



202/1

8. Bauen Sie ein Federwurfgerät nach Bild 203/1 und bestätigen Sie die Gesetzmäßigkeiten des schrägen Wurfs. Die Winkel lesen Sie an einem angelegten Winkelmesser ab. Der Auftreffpunkt wird mit Kohlepapier markiert.

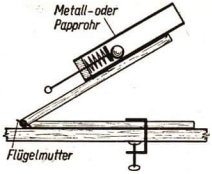
9. Von der Treffgenauigkeit sowjetischer ballistischer Raketen zeugen im Jahre 1961 durchgeführte Versuche. Man schoß in ein vorher bestimmtes, 12000 km entferntes Zielgebiet im Pazifik. Die Abweichungen betrugen etwa 1 km.

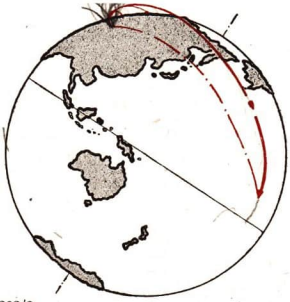
9.1. Welche Abweichung dürfte ein Artilleriegeschoß haben, das 10 km weit geschossen wird und gleiche Treffergenauigkeit aufweist?

9.2. Welche weiteren Beweise für die große technische Überlegenheit der sowjetischen Raketentechnik gibt es?

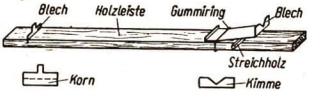
10. Erklären Sie die Aufgabe des Visiers am KK-Gewehr!
Bauen Sie sich behelfsmäßig eine Visiereinrichtung nach Bild 203/3. In welcher Richtung muß der Visierschieber verschoben werden, wenn die Zielentfernung sich verkürzt? Benutzen Sie zur Beantwortung die Visiereinrichtung!

203/1





203/2



203/3

Zusammenfassung

1. **Die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung ist der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der benötigten Zeit.**

   Worin unterscheiden sich gleichförmige und ungleichförmige Bewegungen?

2. **Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ergibt sich die Geschwindigkeit als Produkt aus Beschleunigung und Zeit.**

   Welche Beziehungen bestehen zwischen Weg und Zeit?

3. **Die Fallbeschleunigung beträgt rund 9,81 m · s^{-2}.**

   Für welche Berechnungen wird dieser Wert benötigt?

4. **Teilbewegungen eines Körpers können zu einer Gesamtbewegung zusammengesetzt werden.**

   Wie erfolgt das Zusammensetzen?

5. **Der lotrechte, waagerechte und schräge Wurf sind zusammengesetzte Bewegungen.**

   Aus welchen Teilbewegungen setzen sie sich zusammen?

13. Die Newtonschen Grundgesetze der Mechanik

1687 erschien in England ein Buch des großen englischen Physikers ISAAC NEWTON unter dem Titel „Die mathematischen Prinzipien der Physik". Mit diesem Werk gab NEWTON der Mechanik die wissenschaftliche Grundlage. Das Buch enthält drei Grundgesetze, die auch als NEWTONsche Prinzipien bezeichnet werden. Zu ihrem Verständnis ist es notwendig, zuerst den Begriff *Masse* zu erläutern. Unser Bild zeigt das Urmaß der Masse im Deutschen Amt für Meßwesen (DAM) in Berlin.

13.1. Maßeinheiten der Masse

Alle Körper besitzen eine bestimmte Masse. Zur Messung der Masse benutzt man Hebelwaagen.
Um die Massen verschiedener Körper miteinander vergleichen zu können, hat man ein Urmaß geschaffen. Es ist ein Platin-Iridium-Zylinder bestimmter Abmessungen, das *Urkilogramm* (Bild oben).

Die Maßeinheit der Masse ist das Kilogramm.

Weitere Maßeinheiten der Masse sind die Tonne, die Dezitonne, das Gramm, das Milligramm.

1 t = 1000 kg
1 dt = 100 kg
1 kg = 1000 g
1 g = 1000 mg

Welche Angaben in der Landwirtschaft werden oft mit der Maßeinheit Dezitonne verknüpft?

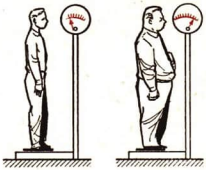
204/1 ISAAC NEWTON

13.2. Masse und Trägheit

Dem Begriff Masse ordnen wir zwei Eigenschaften zu:

1. Infolge der Schwerkraftwirkung haben alle Körper auf der Erde ein Gewicht. Das Gewicht hängt am gleichen Ort nur von der Masse des Körpers ab. Je größer die Masse ist, desto größer ist das Gewicht des Körpers (Bild 205/1).

Alle Körper sind schwer, sie haben ein Gewicht.



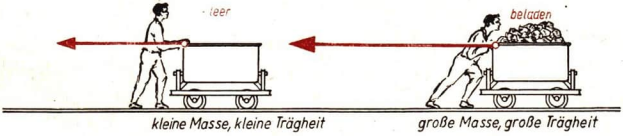
205/1 Je größer die Masse, um so größer das Gewicht!

Gewicht und Masse dürfen auf keinen Fall gleichgesetzt werden. Während die Masse eines Körpers unveränderlich ist, ändert sich das Gewicht mit dem Meßort.

Ein Körper mit der Masse 1 kg hat

am 45. Breitengrad	(in Meereshöhe)	das Gewicht 1 kp,
am Äquator	(in Meereshöhe)	das Gewicht 0,997 kp,
an den Polen	(in Meereshöhe)	das Gewicht 1,002 kp,
auf dem Mount Everest	(8840 m)	das Gewicht 0,974 kp,
auf dem Mond		das Gewicht 0,164 kp.

2. Jeder Körper widersetzt sich einer Änderung seines Bewegungszustandes. Ruhende und gleichförmig bewegte Körper sind bestrebt, im jeweiligen Zustand zu ver-



205/2 Beim Anschieben der Lore muß die Trägheit überwunden werden.

harren. Man bezeichnet diese Erscheinung als Trägheit oder Beharrungsvermögen. Je größer die Masse eines Körpers ist, um so größer ist auch seine Trägheit (Bild 205/2).

Alle Körper sind träge, sie widersetzen sich einer Änderung ihres Bewegungszustandes.

Es gibt sehr viele Beispiele für Trägheitswirkungen.

Man kann sie gut in Fahrzeugen bemerken, die schnell anfahren oder abbremsen. Beim Füllen von Säcken mit Schüttgütern (Getreide, Sand, Dünger usw.) benutzt man die Trägheit, um die Stoffe zu verdichten.

● *Geben Sie weitere Beispiele!*

Zusammengefaßt:

Die Masse hat die Eigenschaften, schwer und träge zu sein.

13.3. Der Trägheitssatz

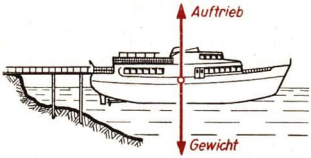
Der Begriff Trägheit stammt von GALILEI, aber erst ISAAC NEWTON erkannte die Trägheit als Eigenschaft aller Körper. Er faßte seine Erkenntnisse in dem als 1. Newtonsches Prinzip bekannten **Trägheitssatz** zusammen:

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

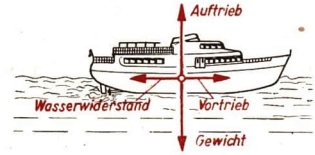
Dieser Satz kann nicht in der gleichen Weise bewiesen werden wie andere Gesetze. Der Zustand der gleichförmigen Bewegung ohne Krafteinwirkung kann genaugenommen nicht verwirklicht werden. NEWTON kam durch die Untersuchung von Bewegungen mit sehr geringer Reibung zum Trägheitssatz. Man nennt einen solchen Satz ein Axiom.[1]
Im erweiterten Sinn besagt der Trägheitssatz:

Heben alle auf einen starren Körper wirkenden Kräfte einander auf, so bleibt der Körper in Ruhe oder in gleichförmiger Bewegung.

Vergleichen Sie dazu die Bilder 206/1 und 206/2.



206/1 Schiff am Landungssteg. Es wirken nur Gewicht G und Auftrieb A. Die Kräfte heben einander auf. Das Schiff bleibt relativ zum Landungssteg in Ruhe



206/2 Schiff während der Fahrt. Es wirken Gewicht G und Auftrieb A, Vortrieb V und Wasserwiderstand W. Die Kräfte heben einander auf. Das Schiff bleibt relativ zum Landungssteg in gleichförmiger Bewegung. Man sagt auch in diesem Beispiel, daß sich der Körper im Gleichgewicht befindet.

[1] axiom: grundlegender Leitsatz, der keines Beweises bedarf und auch nicht zu beweisen ist.

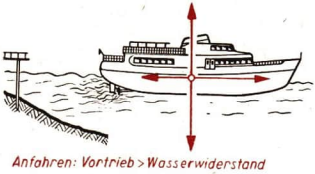
13.4. Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft

Durch Umkehrung des 1. Newtonschen Prinzips erhält man den Satz:

Ein Körper ändert seinen Bewegungszustand, wenn sich die auf ihn einwirkenden Kräfte nicht aufheben.

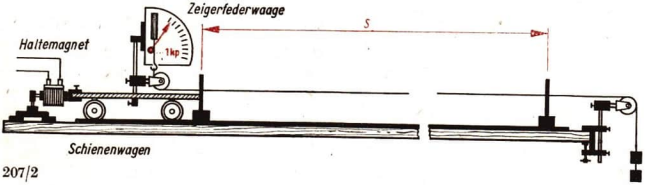
Eine Änderung des Bewegungszustandes erfolgt beispielsweise auch dann, wenn ein Körper beschleunigt wird.

Damit ein Schiff seine normale Fahrgeschwindigkeit erreicht, muß der Vortrieb größer als der Wasserwiderstand sein (Bild 207/1).



207/1 Schiff beim Anfahren.
Es wirken Gewicht und Auftrieb, Vortrieb V und Wasserwiderstand W. Da $V > W$ ist, erfolgt eine Beschleunigung, d. h. Änderung des Bewegungszustandes

Die Ursache einer Beschleunigung oder Verzögerung ist demnach stets eine Kraft. Die quantitativen Zusammenhänge zwischen der Trägheit eines Körpers, den wirkenden Kräften und der Beschleunigung lassen sich durch folgenden Versuch ermitteln (Bild 207/2).

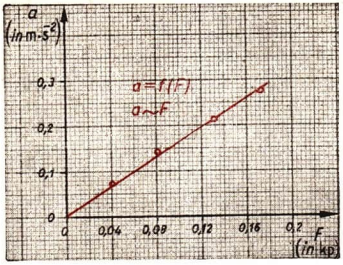


207/2

Tabelle 15: Abhängigkeit der Beschleunigung von der wirkenden Kraft[1] bei konstanter Masse

Wagenmasse m einschl. Federwaage (in kg)	Fahrstrecke s (in m)	Fahrzeit t (in s)	wirkende Kraft F (in kp)	Beschleunigung $a = \frac{2s}{t^2}$ (in $m \cdot s^{-2}$)	Quotient aus a und F $\frac{a}{F}$ (in $m \cdot s^{-2} \cdot kp^{-1}$)
6	2,00	3,8	0,17	0,277	1,63
6	2,00	4,3	0,13	0,216	1,66
6	2,00	5,3	0,09	0,143	1,59
6	2,00	7,6	0,04	0,069	1,73
				Mittelwert	1,65

[1] Die Federwaage zeigt außer der Kraft F auch die zur Überwindung der Reibung notwendige Kraft R an, d. h. insgesamt $F + R$. Die Reibungskraft muß vorher gesondert bestimmt werden.



208/1 Abhängigkeit der Beschleunigung von der wirkenden Kraft (m = const)

Der Quotient aus $\frac{a}{F}$ ist konstant. Zwischen der Beschleunigung und der Kraft besteht also direkte Proportionalität. Die grafische Darstellung ergibt eine Gerade (Bild 208/1).

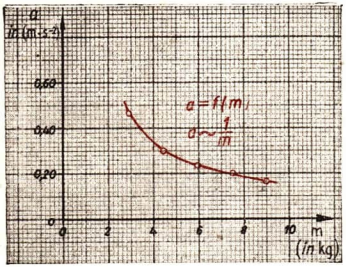
$$a \sim F.$$

13.5. Die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse

Bei einer zweiten Versuchsreihe bleibt die Kraft konstant. Die Gesamtmasse wird durch Auflegen von Zusatzmassen geändert. Die Tabelle 16 enthält die Meßergebnisse.

Tabelle 16: Abhängigkeit der Beschleunigung von der beschleunigten Masse bei konstanter Kraft

Wirkende Kraft F (in kp)	Fahrstrecke s (in m)	Fahrzeit t (in s)	Wagenmasse m (in kg)	Beschleunigung $a = \frac{2s}{t^2}$ (in $m \cdot s^{-2}$)	Produkt von m und a $m \cdot a$ (in $kg \cdot m \cdot s^{-2}$)
0,15	2,00	2,9	3,0	0,48	1,44
0,15	2,00	3,6	4,5	0,31	1,40
0,15	2,00	4,1	6,0	0,24	1,44
0,15	2,00	4,5	7,5	0,20	1,50
0,15	2,00	5,0	9,0	0,16	1,44
				Mittelwert	1,44



Das Produkt aus Masse und Beschleunigung ist konstant. Daraus folgt, daß Beschleunigung und Masse einander umgekehrt proportional sind. Die grafische Darstellung zeigt als Kurvenverlauf einen Hyperbelast (Bild 208/2).

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

208/2 Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse bei konstanter Kraft

13.6. Das Grundgesetz der Mechanik

Aus beiden Versuchen ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

Durch eine Kraft wird eine Beschleunigung verursacht. Sie erfolgt in Kraftrichtung und ist der Kraft direkt, der Masse indirekt proportional.

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

Unter Verwendung eines Proportionalitätsfaktors k erhält man die Gleichung

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

Es ergibt sich daraus durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 16:

$$k = \frac{m \cdot a}{F}$$

$$k = \frac{1{,}44\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{0{,}15\,\mathrm{kp} \cdot \mathrm{s}^2}$$

$$k = 9{,}6\,\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{kp} \cdot \mathrm{s}^2}$$

Aus genaueren Messungen hat man festgestellt, daß diese Konstante den Wert

$$k = 9{,}81\,\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{kp} \cdot \mathrm{s}^2}$$

hat.

Löst man die Gleichung $a = k \cdot \frac{F}{m}$

nach F auf, so erhält man $F = \frac{1}{k} \cdot m \cdot a$.

Diese Gleichung läßt sich besonders einfach benutzen, wenn man die Maßeinheiten der Masse, Beschleunigung und Kraft so festlegt, daß der Faktor $k = 1$ wird. Dann ergibt sich das 2. Newtonsche Prinzip, das **Grundgesetz der Mechanik**, in der folgenden Form:

Kraft = Masse · Beschleunigung	$\boldsymbol{F = m \cdot a}$

(37)

Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung.

Setzt man in der Gleichung $F = m \cdot a$ für die Masse die Einheit 1 kg und für die Beschleunigung die Einheit $1\,\mathrm{m} \cdot s^{-2}$ ein, so ergibt sich eine neue Krafteinheit:

$$1\,\mathrm{kg} \cdot 1\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} = 1\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}.$$

Diese Krafteinheit wurde zu Ehren NEWTONS **1 Newton (N)** genannt.

$$\mathbf{1\,N = 1\,kg \cdot m \cdot s^{-2}}.$$

Beispiel

Hat der Wagen nach Bild 207/2 die Masse 1 kg und wird ihm die Beschleunigung von $1\,m \cdot s^{-2}$ erteilt, so beträgt die wirkende Kraft 1 N.

Die Kraft 1 Newton erteilt einem Körper mit der Masse 1 kg die Beschleunigung $1\,m \cdot s^{-2}$.

Wählt man als Einheit der Masse das Gramm, als Einheit der Beschleunigung $cm \cdot s^{-2}$, so ist die Krafteinheit $1\,g \cdot 1\,cm \cdot s^{-2} = 1\,g \cdot cm \cdot s^{-2}$.
Sie wird als 1 dyn bezeichnet.

$$1\ \text{dyn} = 1\,g \cdot cm \cdot s^{-2}, \qquad 10^5\,\text{dyn} = 1\,N.$$

Da das Newton die gesetzliche Einheit der Kraft ist, muß in vielen Fällen die ebenfalls zulässige Einheit kp in die Einheit N umgerechnet werden.
Zwischen den Maßeinheiten der Kraft bestehen, wie hier nicht näher beschrieben wird, die Beziehungen

$$1\,kp = 9{,}80665\,N \approx 9{,}81\,N, \qquad 1\,N = \frac{1}{9{,}80665}\,kp \approx \frac{1}{9{,}81}\,kp.$$

Beispiele

1. Welche Antriebskraft wirkt bei einem Motorrad, das aus dem Stand in 5 s die Geschwindigkeit von $36\,km \cdot h^{-1}$ erreicht?
   Die Gesamtmasse mit Fahrer beträgt 150 kg. (Die Reibung bleibt unberücksichtigt.)

Gegeben:

$m = 150\,kg$

$v = 36\,km \cdot h^{-1}; \quad \frac{36 \cdot 10^3\,m}{3{,}6 \cdot 10^3\,s} = 10\,\frac{m}{s}$

Gesucht:

F (in N und kp)

Lösung:

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

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

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

$F = 300\,\frac{kg \cdot m}{s^2}$ *Die Antriebskraft beträgt 300* N.

Die Antriebskraft 300 N ist in kp umzurechnen!

$1\,N = 0{,}102\,kp$

$300\,N = 300 \cdot 0{,}102\,kp$

$300\,N = 30{,}6\,kp$ *Die Antriebskraft beträgt 300* N = 30,6 kp.

2. Die Triebwerke eines Verkehrsflugzeuges vom Typ „TU 104“ entwickeln beim Start eine Schubkraft von $F = 13500$ kp. Die Flugzeugmasse beträgt 55000 kg. Welche Beschleunigung wird dem Flugzeug erteilt, wenn man die Reibung und den Luftwiderstand unberücksichtigt läßt?

Gegeben:

$m = 55 \cdot 10^3$ kg

$F = 13{,}5 \cdot 10^3$ kp

Gesucht:

a (in $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$)

Lösung:

Umrechnung der Krafteinheiten

$1\ \mathrm{kp} = 9{,}81\ \mathrm{N}$

$13{,}5 \cdot 10^3\ \mathrm{kp} = \mathrm{x\ N}$

$x = 13{,}5 \cdot 9{,}81 \cdot 10^3\ \mathrm{N}$

$x = 132 \cdot 10^2\ \mathrm{N}$

$F = m \cdot a$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{132 \cdot 10^3\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}}{55 \cdot 10^3\ \mathrm{kg}} \qquad \text{(Anmerkung[1])}$$

$$a \approx 2{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$$

Die Startbeschleunigung beträgt etwa 2,4 $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$, *wenn man die Reibung und den Luftwiderstand vernachlässigt.*

13.7. Die dynamische Kraftmessung

Bei der statischen Kraftmessung wird die verformende Wirkung der Kraft ausgenutzt, zum Beispiel bei der Federwaage.
Soll eine *dynamische Kraftmessung* erfolgen, so bestimmt man die Beschleunigung, die durch die Kraft verursacht wird, und errechnet aus $F = m \cdot a$ die wirkende Kraft.

Beispiel

Läßt man einen Körper mit der Masse 2 kg frei fallen, so wird ihm auf dem 45. Breitengrad in Meereshöhe die Erdbeschleunigung $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ erteilt. Die wirkende Kraft, das heißt das Gewicht, beträgt dann $2\ \mathrm{kg} \cdot 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}} = 19{,}62$ N.
Ein Körper mit der Masse 2 kg hat an diesem Ort das Gewicht 19,62 N.

Gewicht = Masse · Erdbeschleunigung	$G = m \cdot g$

(38)

Da die Erdbeschleunigung g ortsabhängig ist, ändert sich auch das Gewicht des gleichen Körpers mit dem Ort (vgl. Aufgabe 4, S. 215)!

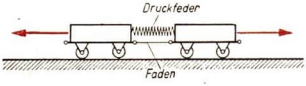
[1] An Stelle N ist in Rechnungen stets $\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}$ zu setzen. Die Maßeinheiten können dann wie allgemeine Zahlen behandelt und gekürzt werden.

Aus der Umrechnung der Krafteinheiten ergibt sich, daß ein Körper mit der Masse 2 kg das Gewicht von 19,62 N = 2 kp besitzt (45. Breitengrad, Meereshöhe). Die Angaben in kp und in kg sind zwar zahlenmäßig gleich. Es handelt sich aber um ganz verschiedene Größen, so daß man niemals für das Gewicht (oder überhaupt für Kräfte) die Einheit kg benutzen darf. Da früher das Kilogramm als Krafteinheit benutzt wurde, findet man an älteren Meßgeräten und Maschinen und in manchen Büchern Kräfte noch in kg angegeben. Beachten Sie, daß dies heute nicht mehr zulässig ist!

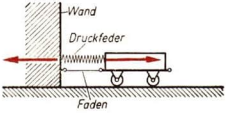
13.8. Das Gegenwirkungsprinzip

Eine *Kraft wirkt* niemals auf einen Körper allein, sondern nur *zwischen zwei Körpern*. Bei jeder Kraftwirkung tritt deshalb eine gleich große Gegenkraft auf (Bilder 212/1 und 2). Die Wirkung der Gegenkraft kann allerdings oft nicht beobachtet werden.

Stützt man sich zum Beispiel auf den Tisch, so tritt durch die elastische Verformung eine Gegenkraft auf. Zieht man ein Stück Eisen durch einen Magneten an, so zieht das Eisen auch den Magneten an. Springen wir über einen Graben, so wird beim Absprung der Körper und der Grabenrand beschleunigt. Von letzterer Beschleunigung ist aber nichts zu bemerken, da die Masse der Erde sehr groß ist.



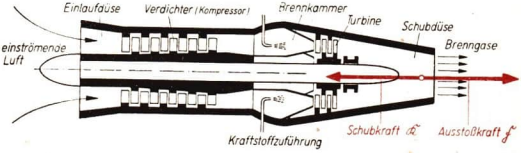
212/1 Brennt man den Faden durch, so erfolgt eine Kraftwirkung auf beide Wagen. Sie legen in der gleichen Zeit gleiche Strecken zurück



212/2 Brennt man den Faden durch, so erfolgt eine Kraftwirkung auf Wagen und Wand. Die Kraftwirkung auf die Wand kann nicht unmittelbar beobachtet werden

212/3 Durch die Kraft der Pulvergase wird das Geschoß aus dem Rohr herausgeschleudert. Die Pulvergase wirken aber auch gegen den Verschluß. Das beweglich gelagerte Rohr gleitet deshalb nach hinten. Nach Abgabe des Schusses wird es durch die Rohrrückzugfedern wieder in die ursprüngliche Lage gebracht. Was würde geschehen, wenn das Rohr mit der Lafette starr verbunden wäre?

213/1 Luftabwehrraketen der NVA bei der Maiparade 1962 auf dem Marx-Engels-Platz in Berlin



213/2 Strahltriebwerk (schematisch). Die vorn einströmende Luft wird verdichtet und gelangt in die Brennkammern. Hier wird kontinuierlich Treibstoff verbrannt. Die Verbrennungsgase treiben die Verdichterturbine an und strömen durch die Schubdüse ins Freie. Der Schub erreicht bei modernen Triebwerken 7000 kp und mehr. Inwiefern gilt auch hier das Gegenwirkungsprinzip?

NEWTON brachte diese Zusammenhänge in dem nach ihm benannten 3. Newtonschen Prinzip, dem **Gegenwirkungsprinzip,** zum Ausdruck.

Zu jeder Kraft gehört eine gleich große Gegenkraft.

Man nennt dieses Prinzip auch den Satz von Wirkung und Gegenwirkung (actio-reactio).

Eine wichtige Anwendung des Gegenwirkungsprinzips finden wir bei Raketen- und Strahltriebwerken, beispielsweise bei den modernen Luftabwehrraketen unserer NVA (Bild 213/1).

Durch die Kraft der unter hohem Druck stehenden Verbrennungsgase strömen diese aus der Düse. Die Gegenkraft wirkt auf die Rakete und beschleunigt sie. Mit solchen verhältnismäßig kleinen 2-Stufen-Raketen werden Höhen von mehr als 20 km erreicht. Die nach dem gleichen Prinzip arbeitenden riesigen Mehrstufenraketen der Sowjetunion trugen die Raumschiffe vom Typ „Wostok" mit den kühnen sowjetischen Weltraumfahrern auf ihre viele hundert Kilometer von der Erde entfernte Bahn.

Die dazu notwendigen mächtigen Triebwerke, die einen Startschub von $6 \cdot 10^5$ kp hatten, zeigen neben vielen anderen Beispielen den hohen technischen Stand der sowjetischen Industrie. Das gilt auch für die Entwicklung und Herstellung von Strahltriebwerken (Bild 213/2).

13.9. Newton — Begründer der klassischen Mechanik

Die zweite Hälfte des 17. Jahrhunderts ist dadurch gekennzeichnet, daß im aufblühenden Kapitalismus eine verstärkte wissenschaftliche Tätigkeit einsetzte, wodurch innerhalb kurzer Zeit das physikalische Wissen in ungeahntem Umfang erweitert wurde. Das Zentrum der Wissenschaft lag vor allem aus zwei Gründen in Westeuropa. Einmal entwickelte sich der damals fortschrittliche Kapitalismus in besonderem Maße in England, Frankreich und Holland. Andererseits hatte die den wissenschaftlichen Fortschritt hemmende katholische Kirche in diesen Ländern nur einen geringen oder überhaupt keinen Einfluß. Unter den vielen bedeutenden Physikern dieser Periode, zum Beispiel Boyle, Hooke, Huygens, Papin usw. nimmt Isaac Newton den hervorragendsten Platz ein.

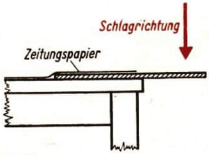
Isaac Newton wurde 1642 in einem kleinen Dorf in Ostengland geboren. Seine Kindheit verbrachte er auf dem Gutshof seiner Eltern. Später besuchte er eine Lateinschule. Mit 18 Jahren wurde Newton als Student an der Universität Cambridge aufgenommen, und zwar als Subserver. Das waren arme Studenten, die gegen Bezahlung ältere Studenten und Lehrkräfte bedienten.
Innerhalb kurzer Zeit erwarb er die wichtigsten Universitätsgrade[1] und wurde 1669 Professor. Die nächsten Jahrzehnte verbrachte Newton fast ausschließlich in Cambridge. Durch die Fürsprache eines Freundes kam er 1699 als Direktor der Münze[2] nach London. 1708 wurde der große englische Gelehrte Präsident der Royal Society, der englischen naturforschenden Gesellschaft. Newton starb 1727 im Alter von 85 Jahren.
Die Grundlagen für seine wissenschaftlichen Arbeiten legte Newton bereits in der Studienzeit. Er flüchtete, wie viele seiner Mitbürger, vor der damals wütenden Pest auf das Land. Hier konnte er sich voller Ruhe auf die Lösung wissenschaftlicher Probleme konzentrieren. Sein berühmtes Werk „Philosophiae naturalis principia mathematica" (Die mathematischen Prinzipien der Physik) entstand erst 20 Jahre später. Der Sekretär Newtons berichtet darüber:
„In diesen Jahren schrieb er seine „Principiae" und seiner Anweisung zufolge schrieb ich dieses prächtige Werk ins reine ... Nach erfolgtem Druck schickte mich Sir[3] Isaac mit den Büchern als Geschenk zu leitenden Persönlichkeiten im College[4] 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."
Die große Bedeutung der „Prinzipien" besteht darin, daß Newton alle bis dahin bekannten mechanischen Probleme und Ergebnisse unter einheitlichen, mathematischen Gesichtspunkten ordnete. Unter Zugrundelegen der berühmten Prinzipien war es ihm möglich, viele mechanische Erscheinungen zu erklären. Wenn die drei Grundgesetze zum Teil auch schon vorher bei Galilei, Descartes, Huygens und

[1] Grad: Titel nach Abschluß einer bestimmten Ausbildung
[2] Münze: Münzstätte, an der Münzen geprägt wurden
[3] Sir: englischer Adelstitel
[4] College: Hochschule

KEPLER in ähnlicher Form auftauchten, so gebührt doch NEWTON das Verdienst, eine allgemeine und klare Formulierung geschaffen zu haben. Besonders wichtig ist aber das in den „Prinzipien" enthaltene Gesetz über die Bewegung der Himmelskörper. Auch auf anderen Gebieten hat NEWTON Hervorragendes geleistet. Hervorzuheben sind vor allem seine optischen und mathematischen Arbeiten.

NEWTON schuf ein in sich abgeschlossenes System der Mechanik, das die Grundlage vieler physikalischer Arbeiten in den folgenden Jahrhunderten bildete. Aber auch in der Physik gibt es keinen Stillstand. Neue Erkenntnisse im 20. Jahrhundert zeigten, daß die sogenannte „klassische Mechanik" NEWTONS zur Erklärung verschiedener Erscheinungen nicht ausreicht. Beispielweise nimmt bei sehr großen Geschwindigkeiten die Masse eines Körpers nennenswert zu. Es wurden daher neue Theorien geschaffen, zum Beispiel die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik, die die Newtonsche Mechanik enthalten. Die „Prinzipien" haben deshalb nach wie vor ihre große Bedeutung nicht verloren.

Versuche, Fragen, Aufgaben



215/1

1. Nennen Sie Beispiele, welche Unfälle im Straßenverkehr durch Trägheitswirkungen entstehen können!
2. Zum Nachweis der Trägheit der Luft dient ein Versuch nach Bild 215/1. Über das Brettchen werden entsprechend der Abbildung einige Bogen Zeitungspapier gelegt. Führt man einen kräftigen Schlag mit einem Stativstab, flach gehaltenem Hammer oder ähnlichem gegen das überstehende Ende, so bricht es ab. Das Papier wird dabei nicht beschädigt. Führen Sie den Versuch selbst aus, und geben Sie eine Erklärung!
3. Wie groß ist Ihr Körpergewicht in kp und in Newton?
4. Welches „Gewicht" hätte eine Versuchsperson, deren Masse 70 kg beträgt, auf der Mondoberfläche? Angabe in kp!

Gegeben:

$m = 70\ \text{kg}$

$a = \frac{g}{6} = \frac{9{,}81}{6}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Gesucht:

„Gewicht" F_M (in kp)

Lösung:

$F_M = m \cdot a$

$F_M = \frac{70\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \text{m}}{6\ \text{s}^2}$

$F_M = \frac{70 \cdot 9{,}81}{6}\ \text{N}.$

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

$F = \frac{70 \cdot 9{,}81}{9{,}81 \cdot 6}\ \text{kp}$

$F = \frac{70}{6}\ \text{kp}$

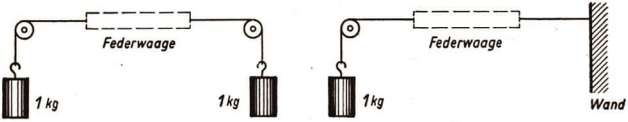
$\underline{\underline{F \approx 11{,}67\ \text{kp}}}.$

Das „Gewicht" der Versuchsperson beträgt nur noch 11,67 kp.

Berechnen Sie auf die gleiche Weise das veränderte „Gewicht" der Versuchsperson für folgende Beispiele:

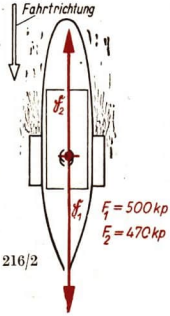
4.1. Raketenstart $a = 5 \cdot g$,
4.2. Raketenschlitten $a = 30 \cdot g$,
4.3. Abfangen aus dem Sturzflug $a = 4 \cdot g$.

5. Welche Kraft wirkt auf einen S-Bahn-Zug mit der Masse 288000 kg, wenn er in 20 s eine Geschwindigkeit von $40\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ erreicht? Reibung und Luftwiderstand werden vernachlässigt.
6. Ein Radfahrer, dessen Masse 60 kg beträgt, wird durch eine konstante Kraft beschleunigt. Nach 10 s hat er einen Weg von 50 m zurückgelegt. Wie groß ist die Kraft? Die Masse des Fahrrades beträgt 25 kg. Hinweis: Eliminieren Sie a mit Hilfe des Weg-Zeit-Gesetzes. Die Reibung bleibt unberücksichtigt. Angabe 6.1. in kp, 6.2. in Newton.
7. Welche Kraft müssen die Bremsen eines Motorrades aufbringen, wenn die (negative) Beschleunigung $5\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ und die Gesamtmasse mit Fahrer 175 kg beträgt? Angabe in N und kp!
8. Münchhausen zog sich am Zopf selbst aus dem Sumpf. Sein „Windmacher" stand auf dem Schiffsdeck und blies in die Segel, dadurch wurde das Schiff vorwärts getrieben. Warum ist das unmöglich?
9. Beim Kleinkaliberschießen tritt ein „Rückstoß" auf. Erklären Sie die Erscheinung!
10. Bei dem berühmten Versuch Otto v. Guerickes mit den Magdeburger Halbkugeln wurden auf jeder Seite 8 Pferde vorgespannt: „Die Kraft von 16 Pferden reichte nicht aus, um die Magdeburger Halbkugeln zu trennen."
Überprüfen Sie die Richtigkeit dieses Satzes auf der Grundlage des 3. Newtonschen Prinzips vom Zusammenhang zwischen Wirkung und Gegenwirkung!
11. Warum müssen die Startblöcke beim Kurzstreckenlauf auf der Aschenbahn starr befestigt werden?
12. Sie springen von einem Ruderboot an Land. Was geschieht? Erklärung!



216/1

13. Welche Kraft zeigt die Federwaage bei einem Versuch nach Bild 216/1 an?
Lösen Sie das Problem durch Überlegung und kontrollieren Sie das Ergebnis durch einen Versuch!
14. Auf ein Flußfahrgastschiff wirken die von Strömung, Wasserwiderstand und Schaufelrädern ausgeübten Kräfte. Bestimmen Sie nach den Angaben des Bildes 216/2 die resultierende Kraft! Weshalb erhöht das Schiff seine Geschwindigkeit?
15. Eine Scherzfrage: Über eine feste Rolle ist ein Seil gelegt. An einem Seilende hängt ein Affe, am anderen ein gleich schweres Gegengewicht. Was geschieht, wenn der Affe nach oben klettert?



216/2

16. Stellen Sie eine Versuchsanordnung nach Bild 217/1 zusammen! Schlägt man mit einem Stativstab *kräftig* auf den trockenen Holzstab (Durchmesser 10 mm), so zersplittert er, ohne daß die Papierschlingen reißen. Geben Sie eine Erklärung!

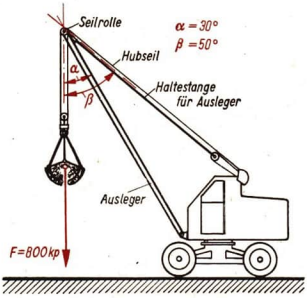
217/1

17. Der selbstfahrende Lader T 170 wird unter anderem zum Zudecken von Kartoffelmieten verwendet. Mit dem Schalengreifer lassen sich 400 kp Erde fassen. Das Schalengewicht beträgt ebenfalls 400 kp, so daß sich eine Gesamtlast von 800 kp ergibt. Nach dem Gegenwirkungsprinzip wirken auf die Seilrolle das Gesamtgewicht und in Richtung des Hubseils eine gleich große Gegenkraft.

17.1. Zeichnen Sie die Resultierende nach Bild 217/2!

Die Resultierende ist wiederum in zwei Komponenten zu zerlegen, die die Haltestange auf Zug und den Ausleger auf Druck beanspruchen!

17.2. Wie groß sind diese Komponenten (Zeichnerische Lösung)?



217/2

18. Bauen Sie aus einem Metallbaukasten einen kleinen Wagen und befestigen Sie darauf einen aufgeblasenen Luftballon. Was geschieht, wenn die Luftballonöffnung freigegeben wird? Geben Sie eine Erklärung!

Zusammenfassung

1. **Eine Maßeinheit der Masse ist das Kilogramm.**

   Welche anderen Maßeinheiten der Masse kennen Sie?

2. **Jeder Körper beharrt in Ruhe oder in gleichförmiger, geradliniger Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.**

   Nennen Sie Beispiele!

3. **Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung.**

   Wie lautet der entsprechende Satz zur Definition des Gewichtes?

4. **Zu jeder Kraft gehört eine gleich große Gegenkraft.**

   Durch welche Versuche läßt sich dieses Gesetz bestätigen?

5. **Eine Maßeinheit der Kraft ist das Newton.**

   Wie ist es definiert?

14. Die Reibung

Unsere Volkswirtschaftspläne enthalten genaue Angaben über die Steigerung der Produktion und damit über die weitere Verbesserung unseres Lebensstandes. Dazu kann und muß jeder beitragen. Die beste Maschine versagt bald ihren Dienst, wenn sie nicht sorgfältig gewartet und gepflegt wird. Viele Arbeiter haben ihre Maschinen deshalb in persönliche Pflege genommen. Dazu gehört beispielsweise das laufende Abschmieren aller Lagerstellen, um die Reibung zu verringern.

14.1. Die Reibungskraft

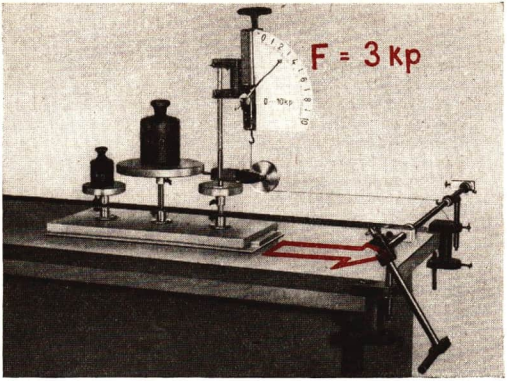
In jeder Maschine treten Energieverluste auf, die ihre Ursache im Wirken einer Kraft, der Reibungskraft, haben. Nach dem Ausschalten des Motors kommt ein Traktor auch auf vollkommen ebener Straße bald zum Stillstand. Ursache ist die Reibungskraft; der Vorgang wird als *Reibung* bezeichnet. Sie tritt stets dann auf, wenn sich zwei Körper berühren und gegeneinander bewegen.

Die Reibung hemmt jede Bewegung eines Körpers.

Die Reibung entsteht zwischen festen Körpern durch Unebenheiten der Oberflächen und durch Adhäsionswirkungen (Kraftwirkungen zwischen Molekülen).
Um die Größe der Reibungskraft zu bestimmen, mißt man zum Beispiel die Kraft, die zur *gleichförmigen* Bewegung des Körpers nötig ist (Bild 219/1). Die Richtung der Reibungskraft ist der Bewegung stets entgegengesetzt. Experimentelle Untersuchungen ergeben, daß bei Körpern mit gleicher Masse die Größe der Berührungsfläche ohne Einfluß auf die Reibungskraft ist (Bild 219/2).
Vergrößert man bei dem Versuch nach Bild 219/1 die Normalkraft[1] F_N durch Auflegen von Wägestücken, so wächst die Reibungskraft im gleichen Verhältnis:

$$F_R \sim F_N .$$

[1] Die Normalkraft F_N ist die senkrecht zur Berührungsfläche wirkende Kraft.

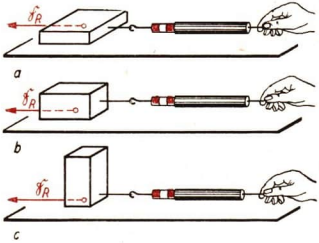


219/1 Versuchsanordnung zum Bestimmen der Reibungskraft
219/2 Die Abhängigkeit der Reibungskraft von der Größe der Berührungsfläche

Außerdem hängt die Reibungskraft vom Stoff und von der Beschaffenheit der sich berührenden Flächen ab. Man nennt den Quotienten aus der Reibungskraft und der Normalkraft den **Reibungskoeffizienten** oder die **Reibungszahl** μ.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}.$$

Damit ergibt sich die Abhängigkeit der Reibungskraft durch die Gleichung



Gleitreibungskraft = Reibungszahl · Normalkraft	$F_{Rg} = \mu \cdot F_N$

(39)

14.2. Gleitreibung, Haftreibung

Wird ein Körper aus der Ruhe in Bewegung gesetzt, so muß die *Haftreibung* überwunden werden. Während der Bewegung tritt die kleinere *Gleitreibung* auf. Die Anzeige der Federwaage in Bild 219/1 ist deshalb bei Bewegungsbeginn am größten. Man unterscheidet die *Haftreibungszahl* μ_0 und die *Gleitreibungszahl* μ_G (Tabelle 17).

Tabelle 17: Haft- und Gleitreibungszahlen

Werkstoffe	Haftreibungszahl μ_0	Gleitreibungszahl μ_G
Stahl auf Stahl	0,15	0,10
Stahl auf Bronze	0,18	0,16
Metall auf Holz	0,5 ··· 0,6	0,2 ··· 0,5
Holz auf Holz	0,65	0,2 ··· 0,4
Leder auf Metall (Dichtungen)	0,60	0,25
Lederriemen auf Metallguß	0,56	0,28
Lederriemen auf Holz	0,47	0,27

Die Haftreibungszahl μ_0 läßt sich durch einen Versuch bestimmen:

Die schraffierten Dreiecke sind ähnlich. Daher gilt

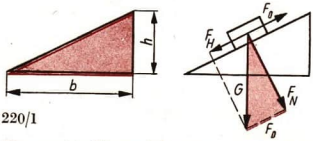
$$\frac{F_0}{F_N} = \frac{h}{b}.$$

Setzt man

$F_0 = \mu_0 \cdot F_N$, so ergibt sich

$$\frac{\mu_0 \cdot F_N}{F_N} = \frac{h}{b} \quad \text{und}$$

$$\mu_0 = \frac{h}{b}.$$



220/1

Eine geneigte Ebene wird so weit geneigt, bis ein darauf befindlicher Körper gerade zu gleiten beginnt. Aus der Neigung kann die Haftreibungszahl berechnet werden.

● *Geben Sie den Inhalt der Gleichung in Worten wieder!*

Ist die Normalkraft eines Körpers gegeben und die Reibungszahl bekannt, so kann die Reibungskraft nach der Gleichung $F_{Rg} = \mu \cdot F_N$ berechnet werden.

Beispiele

1. Eine Holzkiste vom Gewicht 50 kp wird auf einer waagerechten Unterlage aus Holz verschoben. Wie groß ist die Haftreibungskraft?

Gegeben: $G = F_N = 50$ kp, $\mu_0 = 0{,}65$

Gesucht: Haftreibungskraft F_0 (in kp)

Lösung:

$F_0 = \mu_0 \cdot F_N$

$F_0 = 0{,}65 \cdot 50$ kp

$F_0 = 32{,}5$ kp

Die Haftreibungskraft beträgt 32,5 kp.

2. Welche Kraft ist notwendig, um die gleiche Kiste gleichförmig zu bewegen?

Gegeben: $G = F_N = 50$ kp, $\mu_0 = 0{,}4$

Gesucht: Gleitreibungskraft F_{Rg} (in kp)

Lösung:

$F_{Rg} = \mu_G \cdot F_N$

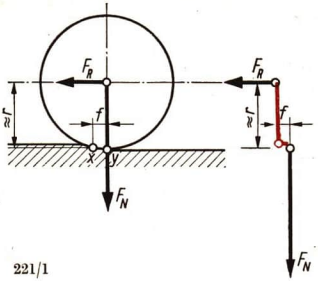
$F_{Rg} = 0{,}4 \cdot 50$ kp

$F_{Rg} = 20$ kp

Die Gleitreibungskraft beträgt 20 kp.

14.3. Die Rollreibung

Rollt ein Körper auf einem anderen ab, so ist die Reibung wesentlich kleiner als beim Gleiten. Diese Erscheinung heißt *Rollreibung*.
Bei der Rollbewegung werden Rad und Unterlage durch die Belastung F_N verformt. Dadurch wälzt sich das Rad nicht auf dem theoretischen Auflagepunkt y, sondern auf dem in der Mitte der Auflagefläche liegenden Abwälzpunkt x (Bild 221/1).
Nach dem Momentensatz gilt:



$$\sum M = 0$$
$$(F_N \cdot f) - (F_R \cdot r) = 0.$$

221/1

$$\boxed{\textbf{Rollreibungskraft} = \textbf{Normalkraft} \cdot \frac{\textbf{Rollreibungszahl}}{\textbf{Rollradius}} \quad \Big| \quad F_R = F_N \cdot \frac{f}{r}} \qquad (40)$$

Die Rollreibungszahl f hat die Maßeinheit einer Länge (meist cm).

Tabelle 18: Rollreibungszahlen f (in cm)

Grauguß auf Grauguß	0,08
Stahlrad auf Schiene	0,05
gehärtete Stahlkugeln (Kugellager)	0,001

Die Gleichung (40) gilt nur für den Fall, daß sich Rad und Unterlage wenig verformen. Zur Bestimmung der Rollreibung von Gummireifen werden komplizierte Gleichungen benutzt.
Nicht immer lassen sich nämlich bei physikalischen Vorgängen alle Einflüsse durch einfache mathematische Beziehungen erfassen. Trotzdem ist es meist möglich, Formeln oder Tabellen beziehungsweise grafische Darstellungen anzugeben, die den praktischen Erfordernissen weitgehend entsprechen.

Das Ersetzen der Gleitreibung durch die Rollreibung stellte in der Entwicklung der Technik einen wichtigen Schritt dar. Schon in der Sklavenhalterordnung war ein entwickeltes Transportwesen von großer Bedeutung. Nahrungsmittel, Handelsgüter und Rohstoffe mußten nicht nur auf dem Wasserweg, sondern auch auf dem Land transportiert werden.
Eines der ältesten Transportmittel war die Stangenschleife. Zum Befördern schwerer Gegenstände (Steine, Obelisken) wurden Schlitten benutzt.

Eine Verminderung der Reibung ergab sich durch untergelegte Rollen. Daraus entstand schließlich vor etwa 4000 bis 5000 Jahren über Zwischenstufen (welche könnten das gewesen sein?) der Scheibenräderwagen. Anfangs waren die Räder fest mit der Achse verbunden und drehten sich in Lederschlaufen. Erst am Ende der Bronzezeit kamen frei drehende Speichenräder auf.
Die Kraftersparnis gegenüber der vorher gebräuchlichen Schleife war sehr groß.

Beispiel

Kraftaufwand bei Schleife (Gleitreibung): $F_{Rg} = \mu_G \cdot F_N$.

Kraftaufwand bei zweirädrigen Wagen (Rollreibung): $F_R = \frac{f}{r} \cdot F_N$.

Bildet man das Verhältnis der zum Transport der gleichen Gesamtlast notwendigen Kräfte, so erhält man

$$\frac{F_R}{F_{Rg}} = \frac{\frac{f}{r} \cdot F_N}{\mu_G \cdot F_N}; \quad \frac{F_R}{F_{Rg}} = \frac{f}{r \cdot \mu_G}.$$

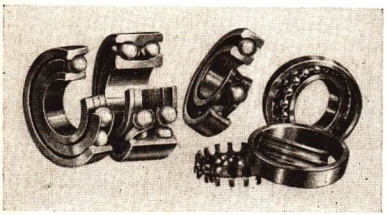
Für $f = 0{,}1$ cm, $\mu_G = 0{,}5$ und $r = 50$ cm ergibt sich $\frac{F_R}{F_{Rg}} = \frac{0{,}1 \text{ cm}}{50 \text{ cm} \cdot 0{,}5} = \frac{1}{250}$.

Der Kraftaufwand bei Rollreibung beträgt bei einem Raddurchmesser von 100 cm *nur* $\frac{1}{250}$ *der Gleitreibung.*

Die Erfindung des Rades ist aber noch in anderer Hinsicht von Bedeutung. Hebel, geneigte Ebene und Rad bildeten die mechanische Grundlage für die Entwicklung aller Maschinen und Geräte bis zum heutigen Tage.

14.4. Veränderung der Reibung

Bei vielen Vorgängen ist die Reibung unerwünscht, weil zu ihrer Überwindung eine zusätzliche Kraft notwendig ist. Die Reibung läßt sich durch Schmiermittel herabsetzen. Häufig werden Öle und Fette verwendet. Sie füllen als dünne Schicht (Ölfilm) die Unebenheiten zwischen den Gleitflächen aus.
In Maschinen vermindert man die Reibung an den Lagerstellen oft durch den Einbau von Wälzlagern (Bild 222/1).
Es gibt aber auch viele nützliche und notwendige Auswirkungen der Reibung. Die Schraubenmutter wird auf dem Schaft durch Reibung gehalten.

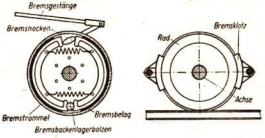


222/1

● *Warum muß zwischen den Antriebsrädern eines Traktors und der Straße stets eine genügend große Reibung vorhanden sein?*

Der Nagel in der Wand wird durch Reibung festgehalten. Den landwirtschaftlichen Hänger bremst man durch eine Klotzbremse. Auch bei Kupplungen von Fahrzeugen ist eine große Reibung notwendig. Als Brems- und Kupplungsbeläge verwendet man daher Stoffe mit großen Reibungskoeffizienten.

223/1 Die Bremsbeläge werden beim Bremsen gegen die Bremstrommel gedrückt und hemmen dadurch die Drehung der Räder. Dabei entsteht, wie bei allen Reibungsvorgängen, Wärme



Versuche, Fragen, Aufgaben

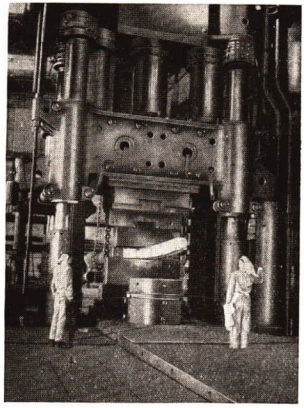
1. Erklären Sie die Begriffe Haftreibung und Gleitreibung an einem Versuch (geneigte Ebene, Holzklotz; beide mit Tuch bespannt).
2. Bei Wintersportgeräten tritt vorwiegend die Gleitreibung auf. Warum lassen sich trotzdem hohe Geschwindigkeiten erreichen? Geben Sie Beispiele an!
3. Welche Schmiermittel werden bei landwirtschaftlichen Geräten und Maschinen verwendet? Geben Sie eine Übersicht!
4. Der Rundfunk bringt in den Wintermonaten Hinweise auf Glatteisbildung. Welche Gegenmaßnahmen müssen ergriffen werden, um den Fahrzeugverkehr unfallfrei zu gestalten?
5. Die Tabelle 19 enthält die Gleitreibungszahlen μ_G zwischen Erdboden und Stahl (Pflugschar usw.) bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 25% und einer Gleitgeschwindigkeit von $v \approx 1\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Berechnen Sie die Reibung zwischen dem Pflugkörper eines Gespannpfluges und dem Erdboden, wenn F_N (hier die Schnittdruckkraft) 67,3 kp beträgt!
   5.1. Für Bodengruppe I!
   5.2. Für Bodengruppe V!
   (Hinweis: Es ist die Gleichung für die Gleitreibung zu benutzen.)

Tabelle 19: Gleitreibungszahlen zwischen Stahl und Erdboden

Bodenklasse		μ_G
Bodengruppe I	(leichte Böden)	0,377
Bodengruppe II		0,421
Bodengruppe III	(mittelschwere Böden)	0,470
Bodengruppe IV		0,524
Bodengruppe V	(schwere Böden)	0,578

6. Berechnen Sie die Rollreibung an einer Hängebahn zum Dungtransport, wenn deren Raddurchmesser 200 mm und das Gesamtgewicht 600 kp betragen!
7. Wie groß ist die Gleitreibung beim Schleppen mit einer leichten Ackerschleppe vom Gewicht 100 kp, wenn sie auf Ackerboden der Bodengruppe IV geschleppt wird (vgl. Tabelle 19)?
8. Weshalb ist beim Skilauf das Wachsen von großer Bedeutung?
9. Stellen Sie unter Benutzung entsprechender Literatur (Geschichtsbücher, „1000 PS und mehr") die weitere Entwicklung der Landfahrzeuge nach der Erfindung des Karrens zusammen!
10. Warum nimmt die Geschwindigkeit eines Motorrads bei einer Fahrt auf waagerechter Strecke nicht dauernd zu, obwohl ständig die Motorkraft wirkt?

15. Die mechanische Arbeit



In den Betrieben des Schwermaschinenbaues stehen große hydraulische Arbeitsmaschinen. Mit einer Kraft von vielen tausend Megapond wird der Stößel dieser hydraulischen Presse bei jedem Arbeitshub tief in den glühenden Stahlblock gepreßt. Dabei wird trotz des kleinen Arbeitsweges von wenigen Millimetern eine große mechanische Arbeit von einigen hunderttausend Kilopondmetern von der hydraulischen Presse verrichtet.

15.1. Begriff der Arbeit

Das Wort Arbeit wird im täglichen Leben für sehr unterschiedliche Tätigkeiten gebraucht (körperliche und geistige Arbeit, Hand- und Maschinenarbeit, Lernarbeit, gesellschaftlich notwendige Arbeit usw.). Der **physikalische Begriff Arbeit** hat in der Mechanik folgenden Inhalt:

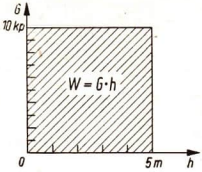
Arbeit wird im physikalischen Sinn stets dann verrichtet, wenn eine Kraft längs eines Weges wirkt.

Man nennt die Arbeit meist nach der Art des Widerstandes, der überwunden wird und unterscheidet beispielsweise Hubarbeit, Spannarbeit und Reibungsarbeit (Tabelle 20).

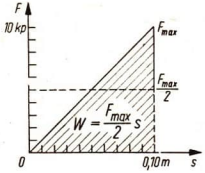
Tabelle 20: Beispiele für Verschiebungsarbeiten
(Voraussetzung: Kraft- und Wegrichtung fallen zusammen)

Begriff	Berechnung	Beispiele
Hubarbeit	Arbeit = Körpergewicht · Hubhöhe $W = G \cdot h$	Heben von Lasten mit Turmdrehkran
Spannarbeit	Arbeit = mittl. Kraft · Weg $W = \frac{F_{max}}{2} \cdot s$	Spannen eines Luftgewehrs oder Expanders
Reibungsarbeit	Arbeit = Reibungskraft · Weg $W = R \cdot s$	Schieben eines Schlittens, Ziehen eines Handwagens

Bei der Hubarbeit ist die wirkende Kraft längs des Weges konstant (Bild 225/1).
Das ist beim Spannen einer Federwaage nicht der Fall. Nach dem Hookeschen Gesetz wächst die Kraft linear mit der Verlängerung (Bild 225/2).



225/1 Arbeitsdiagramm für das Heben einer Last
Auf der Ordinatenachse ist die nach oben wirkende Kraft abgetragen, auf der Abszissenachse der Hubweg h. Der Betrag der Hubarbeit W wird durch die Rechteckfläche mit den Seiten G und h wiedergegeben



225/2 Arbeitsdiagramm für das Spannen einer Feder
Auf die Ordinatenachse wird die jedem Punkt des Weges entsprechende Kraft abgetragen. Der Betrag der Spannarbeit W wird durch die Fläche des Dreiecks mit der Basis s und der Höhe F_{max} wiedergegeben

Bei den genannten Beispielen wurde vorausgesetzt, daß die Verschiebung des Angriffspunktes gleichförmig erfolgt. Diese Arten von Arbeit nennt man *Verschiebungsarbeit*. Es tritt keine Beschleunigung ein. Nur der Angriffspunkt der Kraft verschiebt sich. Wirkt auf eine sich im Weltenraum (nahezu) reibungsfrei bewegende Rakete eine Kraft ein, so hat die Kraft nur den durch die Masse bedingten Trägheitswiderstand zu überwinden. Man spricht von *Beschleunigungsarbeit*. Sie wird nach der Gleichung $W = F \cdot s$; $W = m \cdot a \cdot s$ berechnet, wenn man voraussetzt, daß Kraft- und Wegrichtung zusammenfallen. Auch beim Bremsen eines Fahrzeuges wird (negative) Beschleunigungsarbeit verrichtet, da die Geschwindigkeit abnimmt.

Reine Beschleunigungs- und reine Verschiebungsarbeit sind selten. Meist treten beide gleichzeitig auf. Man vernachlässigt oft eine der beiden Arbeiten, um übersichtliche Verhältnisse zu bekommen. Das ist aber nur möglich, wenn der Betrag der einen Arbeit viel kleiner als der der anderen ist.

Fallen bei einer Arbeit Kraft- und Wegrichtung zusammen, so ergibt sich die Arbeit als Produkt aus der Kraft und dem zurückgelegten Weg (Bild 225/3).
Bilden Kraft und Wegrichtung dagegen einen Winkel miteinander, so kommt für die Arbeit nur die Kraftkomponente F_s in der Wegrichtung zur Wirkung (Bild 225/4).

225/3 Die Schubkraft der Schraube wirkt in Bewegungsrichtung des Bootes, d. h. in Richtung des Weges

225/4 Schubkraft des Außenbordmotors und Bewegungsrichtung fallen nicht zusammen. In Bewegungsrichtung wirkt die Komponente $\mathfrak{F}'$

Kraft und Wegrichtung schließen vor allem bei Bewegungen auf einer vorgeschriebenen Bahn einen Winkel miteinander ein, beispielsweise bei Verschiebungen auf Gleisen, auf einer geneigten Ebene usw.

15.2. Die Arbeit — Arbeitseinheiten

Berücksichtigt man auch Bewegungen auf vorgeschriebener Bahn, so läßt sich die mechanische Arbeit allgemein bestimmen.

Arbeit = Kraftkomponente in Wegrichtung · Weg	$W = F_{\varsigma} \cdot s$	(41)

Die *Maßeinheit der Arbeit* ergibt sich als Produkt aus einer Krafteinheit und einer Wegeinheit. Die Einheit der Arbeit ist das **Newtonmeter** (Nm), das auch **Joule** (J), genannt wird. Es ist gleich einer Wattsekunde (Ws).

$$1\ \text{Nm} = 1\ \text{N} \cdot 1\ \text{m} = 1\ \text{J} = 1\ \text{Ws}.$$

Eine Arbeit von 1 Nm wird verrichtet, wenn eine Kraft von 1 N längs eines Weges von 1 m wirkt.

Weitere Einheiten sind:

$1\ \text{kpm} = 1\ \text{kp} \cdot 1\ \text{m}$ (Kilopondmeter),

$1\ \text{erg} = 1\ \text{dyn} \cdot \text{cm}$.

Für Umrechnungen gelten folgende Beziehungen:

$1\ \text{Nm} = 0{,}102\ \text{kpm} = \frac{1}{9{,}81}\ \text{kpm}$,

$1\ \text{kpm} = 9{,}81\ \text{Nm} = 9{,}81\ \text{Ws}$.

Beispiele

1. Welche Arbeit wird verrichtet, wenn ein Betonfertigteil von 2 t beim Häuserbau durch einen Kran 12 m hoch gehoben wird?

Gegeben:
$m = 2000\ \text{kg}$
$h = 12\ \text{m}$
$g = 9{,}81\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Gesucht:
Hubarbeit W (in Nm)

Lösung:
$W = m \cdot g \cdot h$
$W = 2000\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 12\ \text{m}$
$W = 236 \cdot 10^3\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}$
$W = 236 \cdot 10^3\ \text{Nm}$

Die Arbeit beträgt $236 \cdot 10^3$ Nm, das sind etwa $24 \cdot 10^3$ kpm.

2. Welche physikalische Arbeit wird verrichtet, wenn wir einen Kohleneimer in der Hand halten, *ohne ihn aufwärts zu bewegen?*

Lösung:

Die *physikalische* Arbeit ist Null, da sich der Angriffspunkt unserer Muskelkraft theoretisch nicht verschiebt. Trotzdem spricht man auch in diesem Fall von einer Arbeit im allgemeinen Sinne, da das Festhalten ein vom Nervenzentrum geregelter Vorgang ist, der außerdem noch mit komplizierten physiologischen Erscheinungen verbunden ist und die Muskulatur beansprucht.

3. Eine Last von 500 p soll mit Hilfe einer losen Rolle, beziehungsweise durch einen Flaschenzug (4 Rollen), um 25 cm gehoben werden. Von der Reibung ist abzusehen. Wird bei Anwendung des Flaschenzuges Arbeit gespart?

Lösung:

Die Arbeit ist in beiden Fällen gleich groß:

$W = G \cdot h$

$W = 500\,\text{p} \cdot 25\,\text{cm}$

$W = 12\,500\,\text{p} \cdot \text{cm}$

bzw.

$W = G \cdot h$

$W = 125\,\text{p} \cdot 100\,\text{cm}$

$W = 12\,500\,\text{p} \cdot \text{cm}$

Durch die Anwendung kraftumformender Einrichtungen läßt sich keine Arbeit sparen.

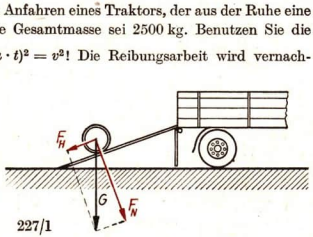
Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Bestimmen Sie die Beschleunigungsarbeit beim Anfahren eines Traktors, der aus der Ruhe eine Geschwindigkeit von $10\,\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ erreicht. Die Gesamtmasse sei 2500 kg. Benutzen Sie die Gleichungen $W = m \cdot a \cdot s$; $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ und $(a \cdot t)^2 = v^2$! Die Reibungsarbeit wird vernachlässigt.

1.1. Berechnen Sie die Arbeit in Nm,

1.2. in kpm!

2. Ein leeres Treibstoffaß soll auf einen Hänger befördert werden. Das Gewicht des Fasses beträgt 45 kp (Bild 227/1).



227/1

2.1. Das Faß wird 1,2 m gehoben. Berechnen Sie die Arbeit!

2.2. Das Faß wird mittels einer Schrotleiter hinaufgerollt. Die Komponente F_H entnehmen Sie einer anzufertigenden Zeichnung. Die Länge der Schrotleiter sei 3,90 m. Wie groß ist jetzt die Arbeit?

2.3. Welche Gesetzmäßigkeiten erkennen Sie?

3. Bestimmen Sie die reine Hubarbeit eines Bergsteigers, der einen Höhenunterschied von 1000 m überwindet! Körpergewicht mit Ausrüstung 80 kp.

3.1. Geben Sie das Ergebnis in kpm und in Nm an!

3.2. Wieviel „kostet" diese Arbeit, wenn Sie berücksichtigen, daß 1 Nm = 1 Ws ist? 1 kWh kostet 0,08 DM.

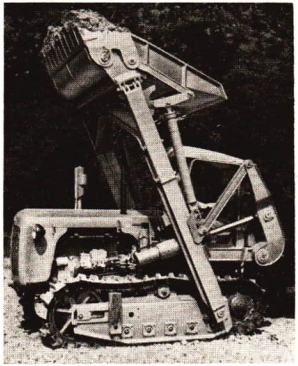
4. Welche Arbeit verrichtet man bei 30 Kniebeugen, wenn der Schwerpunkt des Körpers jedesmal um 40 cm gehoben wird (Körpergewicht 60 kp)?

5. Das erg ist eine sehr kleine Arbeitseinheit. Veranschaulichen Sie sich das erg an folgendem Beispiel:

Eine Fliege „transportiert" einen Wassertropfen mit einem Volumen von $1\,\text{mm}^3$ an einer Wand 1 cm lotrecht empor. Das Heben ihres Körpergewichtes soll unberücksichtigt bleiben. Wie groß ist die verrichtete Hubarbeit?

Hinweise: $1\,\text{mm}^3$ Wasser hat die Masse von 10^{-3} g (Begründung?). Setzen Sie für $g = 981\,\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$! Beachten Sie, daß $1\,\text{g} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = 1\,\text{dyn}$ ist!

16. Die Leistung und der Wirkungsgrad



Um drei Lastkraftwagen mit je 3 m³ Kies zu beladen, brauchen 4 Arbeiter etwa eine Stunde reine Arbeitszeit. Die gleiche Arbeit würde ein Überkopflader KT 50 Ük verrichten, der von einem Arbeiter bedient wird. Die benötigte Zeit beträgt nur 18 Minuten. Die Mechanisierung bringt also neben der Entlastung von schwerer körperlicher Arbeit auch eine erhebliche Zeiteinsparung. Damit wird die Leistung wesentlich gesteigert.

16.1. Die Leistung

In der Produktion kann um so mehr produziert werden, je geringer die Zeit ist, in der eine Arbeit durchgeführt wird.
Man bezeichnet den Quotienten aus der Arbeit und der Zeit, in der die Arbeit verrichtet wird, als **Leistung**.

$$\boxed{\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}} \quad \boxed{P = \frac{W}{t}} \tag{42.1}$$

Die *Maßeinheit der Leistung* ergibt sich als Quotient aus einer Arbeitseinheit und einer Zeiteinheit.

Leistungseinheiten: $\frac{1\,\text{kpm}}{1\,\text{s}} = 1\,\text{kpm} \cdot \text{s}^{-1}$,

$$\frac{1\,\text{Nm}}{1\,\text{s}} = 1\,\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = 1\,\text{W}.$$

Für die Umrechnungen gelten die Beziehungen

$$1\,\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = 0{,}102\,\text{kpm} \cdot \text{s}^{-1} = 1\,\text{W},$$
$$1\,\text{kpm} \cdot \text{s}^{-1} = 9{,}81\,\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = 9{,}81\,\text{W}.$$

Bei Fahrzeugen und Maschinen erfolgt die Leistungsangabe des Triebwerkes noch oft in Pferdestärken (PS). Es gilt $1\,\text{PS} = 75\,\text{kpm} \cdot \text{s}^{-1} = 735{,}5\,\text{W}$.

Tabelle 21: Leistungsangaben einiger Fahrzeuge und Maschinen (Durchschnittswerte)

Geräteträger RS 09	18 PS	Bohrmaschine	2,5 kW
Famulus RS 14/30	33 PS	Drehmaschine	7,5 kW
Urtrak KS 30	63 PS	Fräsmaschine	4,2 kW
Maschinensatz für		Waagerechtstoßmaschine	3,5 kW
Impulsweidemelkstand	6,5 PS	Schiffsmaschinen	10000 kW

Beispiele

Bei Erdarbeiten wird eine Kipplore unter einem Kraftaufwand von 40 kp mit einer Geschwindigkeit von $0{,}2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ auf waagerechter Bahn 120 m weit geschoben. Wie groß ist die Leistung?

Gegeben:

$F = 40\ \mathrm{kp}$

$v = 0{,}2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$s = 120\ \mathrm{m}$

Gesucht:

Leistung P (in $\mathrm{kp \cdot m \cdot s^{-1}}$)

Lösung:

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

$$P = \frac{F \cdot s}{t}$$

$$P = \frac{F \cdot s}{\frac{s}{v}}$$

$$P = F \cdot v$$

$$P = 40\ \mathrm{kp} \cdot 0{,}2\ \mathrm{m}\ \ \mathrm{s^{-1}}$$

$$\underline{\underline{P = 8\ \mathrm{kp \cdot m \cdot s^{-1}}}}.$$

Die Zeit kann aus der Angabe der Geschwindigkeit bestimmt werden:

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

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

Die Leistung beträgt 8 $\mathrm{kpm \cdot s^{-1}}$.

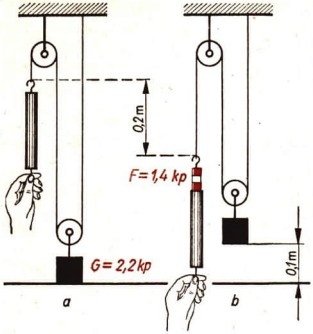
Der Aufgabe ist zu entnehmen: Die Leistung ist auch als Produkt der Kraft und der Geschwindigkeit zu berechnen.

Leistung = Kraft · Geschwindigkeit	$P = F \cdot v$

(42.2)

16.2. Der Wirkungsgrad

Die experimentelle Bestimmung der Arbeit bei einer kraftumformenden Einrichtung ergibt zwischen zugeführter Arbeit und abgegebener Arbeit unterschiedliche Werte (Bild 230/1).



230/1 Das Gewicht $G = 2{,}2$ kp wird um 0,1 m gehoben. Die Hubarbeit beträgt $W = G \cdot h = 0{,}22$ kpm. Die zugeführte Arbeit beträgt dagegen $W = G \cdot h = 1{,}4 \text{ kp} \cdot 0{,}2 \text{ m} = 0{,}28$ kpm

Die zugeführte Arbeit ist größer als die abgegebene nutzbare Arbeit. Diese Gesetzmäßigkeit trifft auf alle kraftumformenden Einrichtungen, alle Maschinen und Motoren zu. Der zusätzliche Arbeitsaufwand ist auf Reibungsarbeit zurückzuführen. Da die Reibung bei keinem Vorgang vollständig ausgeschaltet werden kann, ist stets

$$W_i > W_e.$$

W_i: zugeführte (hineingeschickte, indizierte) Arbeit
W_e: abgegebene (herausgeführte, effektive) Arbeit

Für praktische Zwecke ist es günstiger, statt der zugeführten und abgegebenen Arbeit die entsprechenden Leistungen miteinander zu vergleichen.

Beispiel

Die Motorenleistung des Geräteträgers RS 09 beträgt 18 PS, die Zapfwellenleistung dagegen nur 14 PS. Die Verluste sind auf die Reibung im Getriebe zurückzuführen.
Um den Anteil der Verluste übersichtlich darzustellen, benutzt man den Begriff **Wirkungsgrad:**

$$\textbf{Wirkungsgrad} = \frac{\textbf{abgegebene Leistung}}{\textbf{zugeführte Leistung}} \qquad \eta = \frac{P_e}{P_i} \tag{43}$$

Da $P_e < P_i$ ist, nimmt der Wirkungsgrad stets Werte an, die kleiner als 1 sind. Man gibt den Wirkungsgrad auch oft in % an und setzt dann für $\eta = 1$ den Wert 100%.

Der Wirkungsgrad im genannten Beispiel beträgt demnach

$$\eta = \frac{P_e}{P_i}$$

$$\eta = \frac{14 \text{ PS}}{18 \text{ PS}} = \frac{7}{9}$$

$$\underline{\underline{\eta = 0{,}78 \quad \text{oder} \quad 78\,\%}}.$$

Der (mechanische) Wirkungsgrad liegt bei Maschinen meist zwischen 0,7 und 0,9.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Bestimmen Sie nach dem auf Seite 228 genannten Beispiel (KT 50 Ük) die Hubarbeit beim Beladen des Wagens! Ladehöhe ungefähr 1,80 m. Ermitteln Sie die Leistung in $kp \cdot m \cdot s^{-1}$
   1.1. je Arbeiter,
   1.2. des Überkopfladers.
   Anleitung: Setzen Sie zur Vereinfachung nur *einen* LKW voraus, der mit 9 m^3 Kies beladen wird. Die Dichte von Kies beträgt $\varrho = 2{,}3\ g \cdot cm^{-3}$.
   Beachten Sie, daß $G = m \cdot g$ und $\varrho = \frac{m}{V}$ ist!

2. Rechnen Sie die PS-Angaben der Tabelle 21 in kW um!

3. Die Dauerleistung eines Menschen beträgt etwa 75 W = 7,64 $kpm \cdot s^{-1}$. Bei sportlicher Tätigkeit wird kurzfristig dieser Wert weit überschritten. Berechnen Sie die Leistung im folgenden Beispiel:
   Ein Gewichtheber bringt eine Hantel von 132 kp durch Reißen zur Hochstrecke. Hubhöhe: 2,10 m, Zeitdauer des Hebens: 1,5 s. (Es ist nur die reine Hubarbeit zu berücksichtigen.)

4. Ermitteln Sie ihre Leistung bei sportlichen Übungen:
   4.1. Klettern an Kletterstange,
   4.2. Schnelles Hinauflaufen auf einer Treppe,
   4.3. 10 Kniebeugen.
   Es ist nur die reine Hubarbeit zu berechnen. Geben Sie die Ergebnisse in $kpm \cdot s^{-1}$, PS und W an! Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Leistung eines Mopeds (1,8 PS) und der Leistung einer Glühlampe (60 W)! Wer ist der größere „Leistungssportler"?

5. Die Triebwerke des sowjetischen Raumschiffes „Wostok I", mit dem Major Gagarin als erster Mensch einen Raumflug durchführte, hatten bei einer bestimmten Geschwindigkeit eine Gesamtleistung von 20 Millionen PS. Vergleichen Sie diesen Wert mit der Leistung P
   5.1. des Kraftwerkes Lübbenau (1300000 kW),
   5.2. eines PKW „Wartburg" (45 PS),
   5.3. eines Flugzeuges TU 114 (48000 PS),
   5.4. eines Traktors RS 14/30 (33 PS)!

Beispiel

Das FDGB-Urlauberschiff „Fritz Heckert" hat einen Diesel-Gasturbinenantrieb von 10000 PS.

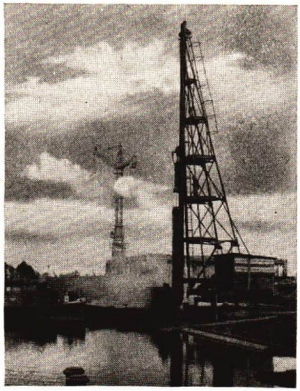
$$\frac{P_{Wostok}}{P_{Schiff}} = \frac{20 \cdot 10^6\ PS}{10^4\ PS} = 2000.$$

Die „Wostok I" hatte die gleiche Leistung wie 2000 Triebwerke von der Größe des Triebwerkes der „Fritz Heckert"!

6. Berechnen Sie die Leistung an den antreibenden Hinterrädern des Geräteträgers RS 09, wenn der Wirkungsgrad der Übertragung 0,735 beträgt. Die Motorenleistung sei 18 PS.

7. Wie groß ist der Wirkungsgrad eines Elektromotors, der eine Leistung von 10 kW dem Netz entnimmt? An eine Transmission wird von ihm eine Leistung von 8,5 kW abgegeben!

17. Die mechanische Energie



Der Mensch muß sich heute genauso wie auch früher mit den Naturkräften auseinandersetzen. Die verschiedensten Kraftmaschinen stehen ihm dabei zur Verfügung. Beim Bau von Spundwänden zur Befestigung von Hafenanlagen wird dabei die Möglichkeit der Speicherung von Arbeitsvermögen in dem hochgehobenen Rammbär ausgenutzt. Das Arbeitsvermögen ist vom Gewicht des Rammbärs und von seiner Höhe abhängig.

17.1. Die potentielle Energie

Bild 232/1 zeigt eine Versuchsanordnung, die die Wirkungsweise einer Pfahlramme veranschaulicht. Hebt man den Rammbär, der das Gewicht G besitzt, um die Höhe h, so wird dabei die Arbeit

$$W = G \cdot h$$

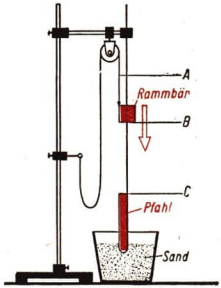
verrichtet.

Der gehobene Rammbär hat einen besonderen Zustand erlangt: Er besitzt gespeicherte Arbeit oder *potentielle*[1] *Energie*.

Beim Niederfallen wird diese Arbeit wieder frei, indem der Pfahl in den Sand getrieben wird.

Die aufgespeicherte Arbeit braucht nicht durch den Menschen oder durch Maschinen verrichtet worden zu sein. Beispielsweise erlangte das Wasser eines Stausees seine potentielle Energie durch die Sonneneinstrahlung.

● *Beschreiben Sie den Kreislauf des Wassers!*



232/1 Modell einer Ramme
Als Rammbär dient der Fuß einer Holtzschen Klemme, der auf einem Stativstab gleitet

[1] potentiell, von potentia (lat.): Können, Fähigkeit

Nicht nur gehobene Körper besitzen potentielle Energie.
Beim Spannen einer Uhrfeder wird Spannarbeit verrichtet, bei der Betätigung einer Luftpumpe Kompressionsarbeit. Auch eine gespannte Feder besitzt potentielle Energie.

Es gilt allgemein:

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

Die potentielle Energie läßt sich durch die Arbeit angeben, die zum Heben oder Spannen notwendig war:

potentielle Energie eines gehobenen Körpers[1]:	$W_{pot} = G \cdot h$ $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$	(44.1)
potentielle Energie einer Feder:	$W_{pot} = \frac{1}{2} F \cdot s$	

Die Maßeinheiten der Energie sind das Kilopondmeter und das Newtonmeter. Obwohl Arbeit und Energie die gleiche Maßeinheit besitzen, handelt es sich um verschiedene physikalische Begriffe. Die Energie ist durch den *Zustand* eines Körpers festgelegt. Arbeit dagegen ist das *Ergebnis* eines Vorganges.

17.2. Die kinetische Energie

Nicht nur gehobene Körper und gespannte Federn besitzen Energie. Auch jeder sich bewegende Körper hat die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Man nennt diesen Zustand *Bewegungsenergie* oder *kinetische*[2] *Energie:* Das strömende Wasser treibt die Turbinen des Kraftwerks an; die rollende Kugel wirft die Kegel um.

● *Nennen Sie Beispiele dafür, daß die auftretende Wirkung von der Masse und der Geschwindigkeit des sich bewegenden Körpers abhängig ist!*

Berechnung der kinetischen Energie

Um einen Körper in Bewegung zu versetzen, ist die Beschleunigungsarbeit $W = F \cdot s$ nötig. Sie ist im bewegten Körper als kinetische Energie aufgespeichert.

$$W_{kin} = F \cdot s = m \cdot a \cdot s.$$

Setzt man für $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ und beachtet, daß $v = a \cdot t$ ist, so ergibt sich

$$W_{kin} = m \cdot a \cdot \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} m (a \cdot t)^2,$$

$$W_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

[1] Mit h bezeichnet man den Höhenunterschied zwischen dem gehobenen Körper und einer Bezugsfläche, deren Energie man willkürlich gleich Null setzt.
[2] kinetisch, von kinesis (griech.): Bewegung

Die kinetische Energie eines Körpers ist der Masse des Körpers und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit proportional.

$$\boxed{W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2} \tag{44.2}$$

Beispiel

Welche kinetische Energie besitzt ein Eisenbahnzug mit einer Masse von $8 \cdot 10^5$ kg bei einer Geschwindigkeit von $20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$?

Gegeben:

$m = 8 \cdot 10^5\ \mathrm{kg}$

$v = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Gesucht:

W_{kin}

Lösung:

$$W_{kin} = \frac{1}{2}\, m \cdot v^2$$

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 10^5\ \mathrm{kg} \cdot (20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}})^2$$

$$\underline{\underline{W_{kin} = 16 \cdot 10^7\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m} = 16 \cdot 10^7\ \mathrm{Nm}}}$$

Die kinetische Energie des Zuges beträgt $16 \cdot 10^7$ Nm.

Geben Sie den Wert in kpm an!

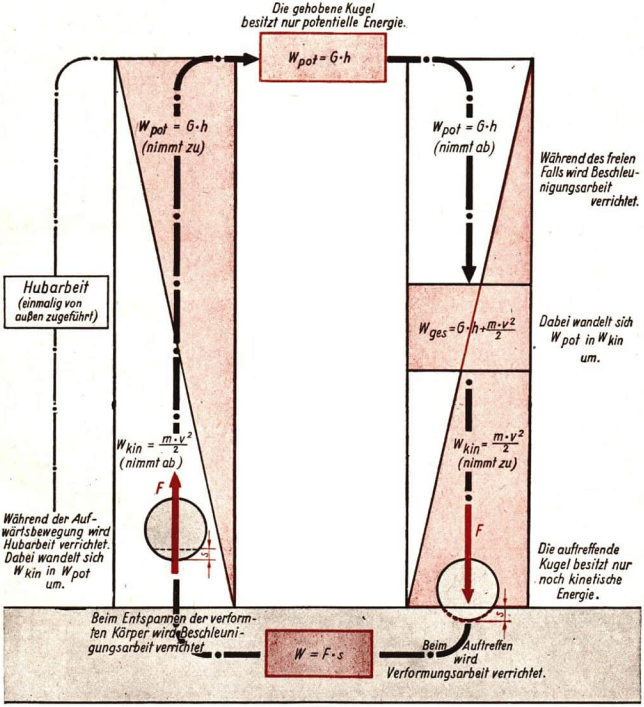
17.3. Der Satz von der Erhaltung der Energie

Gibt man bei dem Versuch nach Bild 232/1 den Rammbär frei, so wird an ihm Beschleunigungsarbeit verrichtet. Die potentielle Energie wandelt sich dabei nach und nach in kinetische Energie um.

Tabelle 22: Angaben über die potentielle und kinetische Energie des fallenden Rammbärs für drei Bahnpunkte

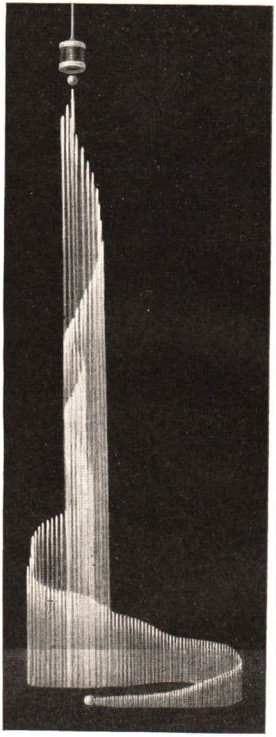
Beobachtungspunkt		Höhe über Erde H	Geschwindigkeit v	$W_{pot} = m \cdot g \cdot h$	$W_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$	$W_{pot} + W_{kin}$
A	Beginn des Fallens (nur W_{pot} vorhanden)	h	0	$m \cdot g \cdot h$	0 (da $v = 0$)	$m \cdot g \cdot h + 0 = m \cdot g \cdot h$
B	Punkt B wird durchlaufen (W_{pot} und W_{kin} vorhanden)	$h - h_1$	$\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1}$	$m \cdot g(h - h_1) = m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h_1$	$\frac{1}{2} m (\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1})^2 = m \cdot g \cdot h_1$	$m \cdot g \cdot h - m \cdot g \cdot h_1 + m \cdot g \cdot h_1 = m \cdot g \cdot h$
C	Moment des Auftreffens (nur W_{kin} vorhanden)	0	$\sqrt{2 g \cdot h}$	0 (da $h = 0$)	$\frac{1}{2} m (\sqrt{2 \cdot g \cdot h})^2 = m \cdot g \cdot h$	$0 + m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot h$

Der Tabelle ist zu entnehmen, daß sich die potentielle Energie am Ende der Fallstrecke vollständig in kinetische Energie umgewandelt hat. Die letzte Spalte zeigt, daß die *Summe der beiden Energien* zu jedem Zeitpunkt *gleich groß* ist.
Die potentielle Energie ist also nicht verschwunden, sondern hat sich nur von einer Form in eine andere umgewandelt.



235/1 Umwandlung mechanischer Energieformen bei einer springenden Stahlkugel (ohne Berücksichtigung der Reibung und des Luftwiderstandes). Verfolgen Sie die Vorgänge von links aus den Pfeilen folgend!

236/1 Das Bild enthält die Bahnspur einer hüpfenden Stahlkugel über einen längeren Zeitraum. Die Sprunghöhe nimmt dabei ab, da eine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie erfolgt



Was geschieht aber nun mit der kinetischen Energie? Darüber gibt ein Versuch Aufschluß, bei dem eine kleine Stahlkugel auf eine dicke Glasplatte fällt (Bilder 235/1 und 236/1).

Der Kugel wird von außen einmalig Energie zugeführt, in diesem Falle durch Heben um die Strecke h. Läßt man die Kugel fallen, so wird Beschleunigungsarbeit verrichtet. Die Kugel erhält kinetische Energie. Beim Auftreffen wird dadurch Verformungsarbeit auftreten. Kugel und Unterlage erhalten potentielle Energie. Da Unterlage und Kugel nahezu elastisch sind, nehmen sie ihre alte Gestalt wieder an. Die Kugel wird dadurch wiederum nach oben geschleudert, das heißt, durch die potentielle Energie wird Beschleunigungsarbeit verursacht. Die Kugel erlangt kinetische Energie. Mit zunehmender Höhe wandelt sich die kinetische Energie immer mehr in potentielle Energie um. Die Vorgänge wiederholen sich dann wieder. Der Zeichnung kann man entnehmen, daß die einmal zugeführte Energie erhalten bleibt. Sie ändert aber mehrmals ihre Erscheinungsform. Bei den Energieumwandlungen wird stets Arbeit verrichtet, im genannten Beispiel Beschleunigungs- und Verformungsarbeit.

Es gilt ganz allgemein:

Jede Arbeit ist eine Energieumwandlung.

Treten bei den Umwandlungen nur mechanische Energieformen auf, so gilt folgender **Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie:**

Bei der Umwandlung potentieller in kinetische Energie und umgekehrt bleibt die gesamte mechanische Energie gleich groß, wenn es sich um reibungsfreie Vorgänge handelt.

$$W_{pot} + W_{kin} = \textbf{konstant}$$

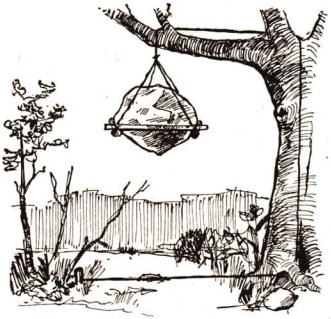
Bei der Darstellung nach Bild 235/1 wurde vorausgesetzt, daß die Stahlkugel stets wieder die ursprüngliche Höhe erreicht. Das ist in Wirklichkeit nicht der Fall (Bild 236/1). Durch die Reibung und den Luftwiderstand wird Wärme erzeugt.
Die mechanische Energie nimmt daher ab und im äquivalenten[1] Betrag tritt Wärmeenergie auf. Der Energieerhaltungssatz der Mechanik gilt also nur in einem sogenannten *abgeschlossenen System*.

Die Summe aller Energien bleibt jedoch immer konstant.
Es gilt das **Gesetz von der Erhaltung der Energie:**

> Energie kann nicht verschwinden, Energie kann nicht von selbst entstehen. Es treten nur Energieumwandlungen auf. Die Summe aller Energien ist konstant.

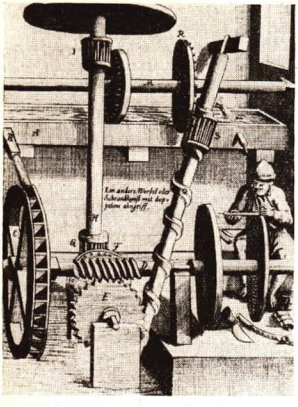
17.4. Die Entwicklung des Energiebegriffs

Die bewußte Ausnutzung der potentiellen Energie zählt zu den ältesten Erfahrungen der Menschen. Schon in der Urgemeinschaft wurde bei Schwerkraftfallen und beim Bogen aufgespeicherte mechanische Arbeit angewandt. Selbstverständlich wußten damals die Menschen über die Gesetzmäßigkeiten der physikalischen Zusammenhänge noch nicht Bescheid. Unsere heutigen Erkenntnisse wurzeln aber letztlich alle in den Erfahrungen und Erkenntnissen, die die Menschen im Laufe der Entwicklung sammelten. Es konnte dabei keine Stufe übersprungen werden.
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*[2]. Trotz jahrhundertelangem Suchen konnte eine solche Maschine nicht geschaffen werden. Das ist nach dem Energieerhaltungsgesetz auch nicht möglich. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie wurde erst im 19. Jahrhundert formuliert. Unter den Wegbereitern im 17. und 18. Jahrhundert sind besonders DESCARTES, LEIBNIZ und LOMONOSSOW zu erwähnen. Die gewaltige Triebfeder auch der physikalischen Entwicklung ist die Produktion. Anfang des



237/1 Schwerkraftfalle

[1] äquivalent: soviel wie gleichwertig
[2] perpetuus (lat.): unaufhörlich, mobilis (lat.): beweglich



238/1 Erklären Sie diesen Versuch, ein Perpetuum mobile herzustellen!

19. Jahrhunderts eroberte die Dampfmaschine immer mehr Industriezweige. Dadurch war es notwendig, die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Energieformen zu erkennen, um einen hohen Wirkungsgrad der Maschinen zu erreichen. Unter den vielen Gelehrten, die diese Zusammenhänge aufdeckten, sind vor allem JULIUS ROBERT MAYER (1814 bis 1874), JAMES PRESCOTT JOULE (1818 bis 1889) und HERMANN VON HELMHOLTZ (1821 bis 1894) zu nennen. Unabhängig voneinander gelangten sie zu der Erkenntnis, daß die Energie unerschaffbar und unzerstörbar ist. Sie wird nur von einer Form in eine andere umgewandelt. HELMHOLTZ schrieb 1847: „In allen Fällen der Bewegung . . . ist der Verlust an Quantität der Spannkraft stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft, und der Gewinn der ersteren gleich dem Verlust der letzteren. Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkräfte constant.“[1]

Die Entdeckung des Energieerhaltungsgesetzes war von überragender Bedeutung. Dadurch kam klar zum Ausdruck, daß sich die Entwicklung in der Natur entsprechend unserer dialektisch-materialistischen Weltanschauung vollzieht und nicht durch das Wirken göttlicher „Kräfte“, die von außerhalb unserer materiellen Welt wirksam würden.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Erklären Sie die Begriffe potentielle und kinetische Energie!
2. Stellen Sie die Tabelle 22 für den besonderen Fall auf, daß $h = 1\ \mathrm{m}$, $h_1 = 0{,}3\ \mathrm{m}$, $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ und $m = 10\ \mathrm{kg}$ sind!
3. Die kinetische Energie schneller Kraftfahrzeuge ist beträchtlich. Der PKW „Wartburg“ hat eine Masse von etwa 1200 kg, wenn er mit 4 Personen besetzt ist. Bei einer Geschwindigkeit von $40\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ beträgt seine kinetische Energie

$$W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \qquad W_{kin} \approx 74\,100\ \mathrm{Nm}$$

$$W_{kin} = \frac{1\,200\ \mathrm{kg} \cdot 40^2 \cdot 10^6\ \mathrm{m^2}}{2 \cdot 36^2\ 10^4\ \mathrm{s^2}} \qquad W_{kin} \approx 7\,550\ \mathrm{kpm}.$$

Beim plötzlichen Abbremsen (Zusammenstoß!) wird diese Energie als („Verformungs-“) Arbeit frei! Diese Energie könnte den Wagen aber auch 6,3 m hochschleudern!

3.1. Bestimmen Sie die kinetische Energie bei einer Fahrgeschwindigkeit von $80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$.

3.2. Wie hoch könnte mit der frei werdenden Energie der Wagen gehoben werden?

3.3. Vergleichen Sie die Ergebnisse miteinander! Beachten Sie dabei, daß sich die Geschwindigkeit nur verdoppelt hat.

[1] Das Wort Energie wurde erst um 1853 durch den englischen Ingenieur RANKINE eingeführt. Vorher sprach man von der kinetischen Energie als „lebendige Kraft“. Unter „Spannkraft“ ist hier die potentielle Energie zu verstehen.

4. Es wird folgende Anordnung vorgeschlagen: Das Wasser eines Hochbehälters treibt eine Turbine an, die mit einem Generator gekoppelt ist. Die gesamte von dem Generator erzeugte elektrische Energie wird einem Pumpenaggregat (Motor, Wasserpumpe) zugeführt, welche das gesamte herabgeflossene Wasser in den Hochbehälter zurückpumpt. Stellen Sie die Energieumwandlungen zusammen! Äußern Sie sich über die Ausführbarkeit der Anordnung!

5. Auf einem Schultisch liegt eine Ledertasche mit einer Masse von 3 kg. Die Tischhöhe beträgt 1,1 m. Der Tisch steht im 2. Stock des Schulgebäudes, der sich 8 m über dem Schulhof befindet. Die Höhe des Schulhofes beträgt 125 m über NN. Wie groß ist die potentielle Energie der Tasche (Angabe in kpm)? Erläutern Sie Ihre *drei* Lösungen!

6. Das Geschoß einer Kleinkaliberpatrone, Kaliber 22 (5,6 mm) hat eine Masse von 2,55 g. Die Anfangsgeschwindigkeit beträgt $330\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
   6.1. Welche kinetische Energie besitzt das Geschoß?
   6.2. Ein aus 10 m Höhe herabfallender Bleiblock von 1,4 kg besitzt beim Aufschlag auf den Boden die kinetische Energie von 14 kpm. Vergleichen Sie den Wert mit dem von 6.1.

7. Weisen Sie durch einen Versuch die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie nach, indem Sie ein Massestück mit einer langen Schnur am Haken einer „Lumpenwaage" befestigen. Das Massestück wird gehoben und dann fallengelassen. Die maximale Spannkraft F und die Federverlängerung s werden durch ein Korkstück markiert, das durch den Zeiger verschoben wird.
   7.1. Berechnen Sie die potentielle Energie des gehobenen Körpers im höchsten Punkt.
   7.2. Berechnen Sie die kinetische Energie des fallenden Körpers im tiefsten Punkt.
   7.3. Berechnen Sie die dadurch verursachte Spannarbeit und vergleichen Sie die Ergebnisse!

8. Die „Erzeugung" von Elektroenergie in der DDR nahm seit 1946 folgende Entwicklung: 1946: $11{,}1 \cdot 10^9$ kWh, 1950: $18{,}3 \cdot 10^9$ kWh, 1958: $34{,}9 \cdot 10^9$ kWh, 1965: $63 \cdot 19^9$ kWh (geplant).
   8.1. Rechnen Sie mit der Beziehung $1\ \mathrm{kWh} = 367{,}2 \cdot 10^3$ kpm die elektrische Energie in mechanische Energie um!
   8.2. Welches Gewicht besitzt ein Stahlwürfel mit der Kantenlänge 1 km ($\varrho_{Stahl} = 7{,}8\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$)?
   8.3. Wie hoch könnte der Stahlwürfel mit der nach 8.1. errechneten mechanischen Energie jeweils gehoben werden?
   8.4. Warum wurde „Erzeugung" von Elektroenergie in Anführungsstriche gesetzt?

Zusammenfassung

1. **Jede Bewegung eines Körpers wird durch die Reibung gehemmt.**
   Wovon hängt die Reibung zwischen zwei Körpern ab?
   Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Wälzlagers!

2. **Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn eine Kraft längs eines Weges wirkt.**
   Welche verschiedenen Formen der physikalischen Arbeit kennen Sie?

3. **Die Leistung ist der Quotient aus Arbeit und Zeit.**
   Welche Maßeinheiten der Leistung sind gebräuchlich?

4. **Die Fähigkeit eines Körpers, auf Grund seiner Lage oder seines Zustandes Arbeit zu verrichten, heißt mechanische Energie.**
   Erläutern Sie an Beispielen die beiden mechanischen Energieformen!

5. **In einem abgeschlossenen System ist die Summe aus potentieller und kinetischer Energie konstant.**
   Warum ist der Zusatz „abgeschlossenes System" notwendig?

ANHANG

1. Bemerkungen zu den physikalisch-technischen Einheiten

In früheren Jahrhunderten bestanden zwischen den einzelnen Ländern nicht so umfangreiche Handelsbeziehungen wie heute. Wissenschaft und Technik waren nur schwach entwickelt, und Produktion und Konsumtion[1] besaßen noch stark örtlichen Charakter. Unter diesen Umständen entstanden in den meisten Ländern verschiedene Maßsysteme für Längen-, Flächen-, Raum- und Zeitmessungen und für Gewichtsbestimmungen. Maßeinheiten aus diesen alten, uneinheitlichen Systemen sind die Elle, die Meile, das Lot und das Pfund.
Im Laufe des 19. Jahrhunderts entwickelten sich die Industrie und der Handel zwischen den Ländern immer mehr. In der gleichen Zeit erfolgte auch eine bedeutende Weiterentwicklung der Naturwissenschaften, besonders der Physik und der Chemie. Zur Entdeckung und mathematischen Formulierung der Naturgesetze wurden genaue Messungen und Berechnungen vieler Größen notwendig. So begann aus wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Gründen das Streben nach einem einheitlichen Maßsystem. Dabei waren viele Schwierigkeiten — größtenteils gesellschaftlicher Art — zu überwinden, die auch heute noch nicht alle aus dem Wege geräumt sind. In der damals fortschrittlichen Gedankenwelt der französischen bürgerlichen Revolution von 1789 tauchte zuerst der Plan auf, ein neues, einfaches Maßsystem zu schaffen. Es wurden als Einheiten der Länge und der Masse das Meter und das Kilogramm festgelegt und Körper angefertigt, durch die diese Einheiten dargestellt werden. Man nennt solche Körper Prototypen (Vergleiche Seite 204).

Die neuen Einheiten wurden 1837 in Frankreich gesetzlich eingeführt. 1875 übernahmen dann eine Reihe von Staaten dieses Maßsystem. In der Physik, besonders in der Elektrizitätslehre, wurden noch Maßsysteme entwickelt, die für die entsprechenden Teilgebiete der Physik zwar zweckmäßig, aber uneinheitlich waren.

1.1. Die Grundeinheiten

Erst vor kurzer Zeit wurde auf der X. Generalkonferenz für Maß und Gewicht ein einheitliches Maßsystem für alle Belange der Wissenschaft, der Technik und des Handels vorgeschlagen. An dieser Konferenz waren alle bedeutenden Staaten beteiligt. In der Deutschen Demokratischen Republik ist dieses neue „Internationale praktische Einheitssystem“ durch eine Verordnung vom 14. August 1958 gesetzlich

[1] Konsumtion: Verbrauch

als verbindlich eingeführt worden. Mit der Verordnung wurde die Tafel der gesetzlichen Einheiten veröffentlicht. Ein Auszug aus dieser Tafel ist in der Logarithmentafel (VWV Best.-Nr. 00915, S. 38 bis 40) abgedruckt.

In dem Maßsystem sind **sechs Grundeinheiten** festgelegt:

Meßgröße	Maßeinheit	Kurzzeichen
Länge	das Meter	m
Zeit	die Sekunde	s
Masse	das Kilogramm	kg
elektrische Stromstärke	das Ampere	A
Temperatur	der Grad Kelvin	°K
Lichtstärke	die Candela	cd

Nach den vier wichtigsten Grundeinheiten wird das Maßsystem auch als MKSA-System bezeichnet.
Diese Grundeinheiten sind genau definiert, das heißt festgelegt oder bestimmt.

Beispiel

Das Meter ist der Abstand der Mittelstriche der auf dem Internationalen Meter-Prototyp (Urmeter) angebrachten Strichgruppen bei der Gleichgewichtstemperatur zwischen Eis und reinem luftgesättigten Wasser unter dem Druck einer physikalischen Atmosphäre. Ursprünglich sollte ein Meter der 10millionste Teil eines Erdmeridianquadranten sein. Die Vermessung erfolgte Anfang des 19. Jahrhunderts. Spätere Messungen ergaben für die Länge eines Erdmeridianquadranten aber den Wert 10000856 m! Der Abstand der Markierungsstriche auf dem Urmeter entsprach also nicht mehr der ursprünglichen Definition. Das Urmeter wurde als Längeneinheit beibehalten, da es unzweckmäßig ist, nach jeder Erdvermessung eine Korrektur vorzunehmen. Im Laufe längerer Zeit entstehen aber auch Veränderungen im Gefüge des Urmeters, so daß sich dessen Länge ändern würde.
Auf der XI. Generalkonferenz für Maß und Gewicht wurde deshalb wieder ein Naturmaß festgelegt, das die Länge des Meters ausdrückt. Es ist die Wellenlänge des gelben Lichtes, das von dem Edelgas Krypton ausgestrahlt wird. 1650763,73 Wellenlängen dieses Lichtes entfallen auf einen Meter. Diese Festlegung wird in der Deutschen Demokratischen Republik erst gesetzlich eingeführt, wenn eine entsprechende Meßapparatur entwickelt ist.

1.2. Abgeleitete Einheiten

Die Maßeinheiten aller anderen Meßgrößen sind aus den sechs Grundeinheiten abgeleitet (Tabelle 23). Man kann sie in zwei Gruppen einteilen.
Kohärente Einheiten werden als Produkte und Quotienten aus den Grundeinheiten gebildet.

Die Krafteinheit Newton ist z. B. eine kohärente Einheit, denn sie wird aus den Grundgrößen 1 kg, 1 m und 1 s hergeleitet. Kraft = Masse · Beschleunigung.

$$1\,\mathrm{kg} \cdot 1\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} = 1\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} = 1\,\mathrm{N}$$

Der Zahlenwert kohärenter Maßeinheiten ist stets 1.

Beispiele

Das Newton ist die Kraft, die der Masse von 1 kg die Beschleunigung $1\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ erteilt.

Das Joule, die Wattsekunde oder das Newtonmeter ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn sich der Angriffspunkt einer Kraft von 1 N in der Richtung der Kraft um 1 m verschiebt.

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{Ws} = 1\ \mathrm{Nm} = 1 \cdot \mathrm{m^2} \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s^{-2}}$$

Das Watt ist die Leistung von $1\ \mathrm{J \cdot s^{-1}}$.

$$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{J \cdot s^{-1}} = 1\ \mathrm{m^2} \cdot \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s^{-3}}.$$

Tabelle 23: Wichtige Einheiten der Mechanik

Größe	Formelzeichen	kohärente Einheit	Herleitung
Länge	l, s	m	Grundgröße
Masse	m	kg	Grundgröße
Zeit	t	s	Grundgröße
Geschwindigkeit	v,	$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$	$v = \frac{s}{t}$
Beschleunigung	a	$\mathrm{m \cdot s^{-2}}$	$a = \frac{v}{t}$
Kraft	F	$\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}$	$F = m \cdot a$
Drehmoment	M	$\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m}$	$M = F \cdot s$
Arbeit	W	$\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m}$	$W = F \cdot s$
Leistung	P	$\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m \cdot s^{-1}}$	$P = \frac{W}{t}$
Energie	W	$\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m}$	$W_{pot} = m \cdot g \cdot h$

Nach der Verordnung sind noch einige andere Maßeinheiten zugelassen. Sie heißen **inkohärente Einheiten**, da sie nicht unmittelbar aus den Grundeinheiten abgeleitet werden können. Sie enthalten bei der Definition stets einen Zahlenwert, der nicht gleich eins ist. Die vielbenutzte Krafteinheit Kilopond ist zum Beispiel eine inkohärente Einheit. Sie wird folgendermaßen definiert:

Das Kilopond ist gleich 9,80665 Newton.

Weitere Beispiele

$1\ \mathrm{Ar} = 100\ \mathrm{m^2}$,

$1\ \mathrm{at} = 10^4\ \mathrm{kp \cdot m^{-2}} = 98066{,}5\ \mathrm{m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}}$,

$1\ \mathrm{cal} = 4{,}1868\ \mathrm{J}$.

Diese inkohärenten Einheiten sind Einheiten aus anderen, älteren Maßsystemen, die so häufig verwendet werden, daß man auf sie vorläufig nicht verzichten will.

4. Lösungen

Anmerkung: Die Berechnungen sind mit dem Rechenschieber ausgeführt. Tabellenwerte wurden aus der Logarithmentafel VWV Best.-Nr. 00915 entnommen.

4.1. Elektrizitätslehre

Seite 23

1. $U = 214$ V
2. 16 Lampen
3. $R = 50\ \Omega$
4. $U_1 = 55$ V; $U_2 = 73{,}3$ V;
   $U_3 = 91{,}7$ V
   $I = 3{,}67$ A
5. $R_v = 124\,950\ \Omega$

Seiten 32 bis 33

1. $I = 10$ A
2. 1. $U = 216$ V
   2. $I_g = 7{,}29$ A
   3. $R_g = 29{,}6\ \Omega$
3. $R = 5{,}72\ \Omega$
4. 2 Lampen: $R_g = 600\ \Omega$ $I_g = 0{,}367$ A
   3 Lampen: $R_g = 400\ \Omega$ $I_g = 0{,}550$ A
   4 Lampen: $R_g = 300\ \Omega$ $I_g = 0{,}733$ A
5. $I_1 = 1{,}4$ A $I_2 = 0{,}6$ A
   $U = 21$ V $R_g = 10{,}5\ \Omega$
6. $I_1 = 0{,}97$ mA $I_2 = 0{,}65$ mA
   $I_3 = 0{,}39$ mA $U = 19{,}4$ mV
   $R_g = 9{,}7\ \Omega$
7. 1. $R_g = (119{,}9 \pm 1{,}1)\ \Omega$
      $\delta = 0{,}0093$
      $\delta\,\% = 0{,}93\,\%$
   2. $I = (1{,}83 \pm 0{,}033)$ A
8. $R_N = 0{,}02\ \Omega$

Seite 36

2. $U = 80$ V
3. $U = (11{,}98 \pm 0{,}104)$ V
   $\delta = 0{,}0087$, $\delta\,\% = 0{,}87\,\%$
4. $I = (1{,}332 \pm 0{,}0104)$ A
   $\delta = 0{,}0078$, $\delta\% = 0{,}78\%$
5. $R = 2{,}26\ \Omega$
8. $R = (9{,}0 \pm 0{,}015)\ \Omega$
9. $l = (1210 \pm 17)$ m

Seite 42

4. $Q = 655$ C

Seite 51

3. Tabelle der Feldstärke in $\frac{\text{V}}{\text{m}}$

U (in V) \ d (in m)	0,15	0,25
4,5	30	18
220	1470	880
600	4000	2400
400000	2670000	1600000

U (in V) \ d (in m)	0,4	1,2
4,5	11,2	3,75
220	550	183
600	1500	500
400000	1000000	333000

4. $E = \frac{F}{0{,}102 \cdot Q}$

E	F	Q
$\frac{V}{m}$	kp	As

5. $E = 87\,300\ \frac{V}{m}$

Seite 55

6. $s = 4{,}65$ km

Seiten 63 bis 64

3. $C = 7{,}1$ pF
6. $A = 68000\ cm^2$

Seite 67

3.

P (in W)	15	25	40	75	100
I (in A)	0,068	0,114	0,182	0,34	0,455

4. $P = 1320$ W

Seite 72

1. $t = 450$ s
2. 1. $W = 16{,}4$ kWh
   2. $P = 1{,}37$ kW
   3. Die elektrische Heizung kostet täglich 1,32 DM
      Die Kohlenheizung kostet täglich 0,45 DM

Seite 84

3. 94,7% Stromausnutzung
4.1. $W = 26{,}2$ kWh
   2. $m = 10^6$ kg
5.1. $t = 4480$ s
   2. $Q = 896$ As

Seiten 97 bis 99

5. 1. $t_1 = 22{,}5$ h
   2. $t_2 = 60$ h
6. $W = 112$ Wh

Seite 107

2. 6 Elemente; 15 Elemente
3. 6 Elemente
4. $U_B = 6$ V
5. $U_{tB} = 1{,}02$ V
   $U_L = 0{,}42$ V
   $U_{tG} = 0{,}64$ V
   $I_Z = 0{,}5$ A
   $E_B = 26{,}4$ V
   $E_G = 28{,}48$ V
   $U_{kB} = 27{,}42$ V
   $U_{kG} = 27{,}84$ V

4.2. Mechanik

Seiten 143 bis 144

1. $k = 40\ kp \cdot m^{-1}$
2. $E_{Al} \approx 7{,}3 \cdot 10^3\ kp \cdot mm^{-2}$
3. $\sigma_B \approx 20\ kp \cdot mm^{-2}$

Seite 147

1. Die Kräfte haben die gleiche Wirkungslinie
2. $F_R = 770$ kp
4. $F_R = 36{,}117$ kp
5. $F_R \approx 8$ kp

Seiten 153 bis 155

1. $F_R = 7{,}211$ kp
2. $F_1 = F_2$; 577 kp
3. $F_R \approx 88$ kp
4. $F_G \approx 36$ kp
8. $F_H \approx 139$ kp; $F_N \approx 788$ kp
9. $F_H \approx 16{,}4$ kp; $F_V \approx 11{,}5$ kp
10.2. Die Beträge der Komponenten wachsen mit zunehmendem Winkel.
11. $F_2 \approx 85$ kp; $\sphericalangle(F, F_2) \approx 40°$
13.2. $F_1 \approx 28{,}4 \cdot 10^2$ p;
   $F_2 \approx 25{,}8 \cdot 10^2$ p

Seiten 159 bis 160

2. 1. $G_G = 180$ Mp
   2. $l = 3{,}33$ m
   3. Die Lok müßte in der Zeichnung um etwa 4 mm nach links verschoben werden.
      Der Tender ragt dann über die Drehscheibe hinaus.

3. $F_r = 390$ kp
4. $F_A \approx 295{,}8$ kp; $F_B \approx 254{,}2$ kp
5. $F_1 \approx 1270$ kp; $F_2 \approx 830$ kp
6. $F_1 \approx 20{,}6$ kp; $F_2 \approx 34{,}4$ kp

Seite 163

3.1. kein Gleichgewicht
2. $M_6 = -170$ p · cm

Seite 167

6. Schwerpunkt liegt unter dem Unterstützungspunkt (stabiles Gleichgewicht)

Seiten 170 bis 173

1. $F = 35$ kp
4. $F \approx 380$ p
5. $s_F = 8$ m; $F = 18{,}75$ kp
8. lose Rolle
9. $U \approx 27{,}6$ cm

Seite 180

1. $t = 20$ s

Seiten 189 bis 191

3.1. $v \approx 40{,}1\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
2. $v \approx 20{,}1\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
3. $v \approx 39{,}3\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
4. $v \approx 26{,}4\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
5. $v \approx 14{,}7\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
6. $v \approx 4{,}3\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
7. $v \approx 27{,}4\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$

4.1. $1{,}48\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
2. $4{,}63\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
3. ohne Schirm: $a \approx -1{,}30\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
mit Schirm: $a \approx -1{,}79\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$
4. $s \approx 166{,}5$ m; $s \approx 83{,}3$ m;
$s \approx 1500$ m; $s \approx 1094$ m
5. reine Bremsstrecke bei trockener Straße: $s = 41{,}2$ m

9.1. $v_1 \approx 14{,}14\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $v_2 \approx 10\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$;
$v_3 \approx 7{,}75\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
2. $v_1 \approx 50{,}9\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$;
$v_2 \approx 36\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$;
$v_3 \approx 27{,}9\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
10. Einfluß ist zu gering; er wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit.
11. $h \approx 14{,}45$ m
12. Erstes, drittes und fünftes Beispiel dürfen nicht mit den gegebenen Gleichungen berechnet werden (Luftwiderstand!)
13. Vorsprung etwa 9,7 km
14. Er überholt ihn etwa um 10.03 Uhr
16.3. $t \approx 6{,}12$ s

Seite 195

1.1. $v_r \approx 13{,}7$ kn; $\varphi \approx 219°$
2. $s_r \approx 4{,}2$ km
3. $v_r \approx 0{,}62\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
5. $a_r \approx -0{,}06\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ (d. h., die Geschwindigkeit verringert sich)
6. Man läßt das Band schneller abrollen

Seiten 202 bis 203

2.1. $v = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $10\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; 0;
$-10\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $-20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$;
$-30\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $-40\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
2. Hat hier keinen Sinn, würde aber gelten, wenn der Körper weiter fällt (z. B. in einen Schacht).
3. $v_0 = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
4. Der Winkel nähert sich dem Wert 90°.
5. Beide erreichen gleichzeitig den Erdboden.
6. $h \approx 15{,}0$ m

9.1. Abweichung $x \approx 0{,}83$ m

Seiten 215 bis 217

4.1. $F = 350$ kp
2. $F = 2100$ kp
3. $F = 280$ kp

5. $F = 16 \cdot 10^4$ N

6.1. $F \approx 8{,}67$ kp
2. $F \approx 85$ N

7.1. $F \approx 875$ N
$F \approx 89$ kp

8. Eine Kraft wirkt niemals auf einen Körper allein.

13. In beiden Fällen 1 kp!

14. $F_r = 30$ kp

15. Das Gegengewicht hebt sich ebenfalls!

17.1. $F_r \approx 1450$ kp
2. $F_1 \approx 1790$ kp
$F_2 \approx 370$ kp

Seite 223

2. Der Reibungskoeffizient zwischen Holz bzw. Metall und Schnee ist sehr klein.

5.1. $F_{Rg} \approx 25{,}37$ kp
2. $F_{Rg} \approx 38{,}9$ kp

6. $F_R \approx 3$ kp

7. $F_{Rg} \approx 52{,}4$ kp

10. Es besteht Gleichgewicht zwischen Zugkraft und Reibungskraft + Luftwiderstand.

Seite 227

1.1. $W = 9{,}65 \cdot 10^3$ Nm
2. $W = 984$ kpm

2.1. $W = 54$ kpm
2. $W = 54$ kpm

3.1. $W = 8 \cdot 10^4$ kpm; $7{,}85 \cdot 10^5$ Nm
2. Preis: etwa 2 Pfg. („1,75 Pfg.“)

4. $W = 720$ kpm

5. $W = 0{,}981$ erg

Seite 231

1.1. $P = 2{,}59$ kpm $\cdot$ s^{-1}
2. $P \approx 34{,}5$ kpm $\cdot$ s^{-1}

2.1. 13,24 kW
2. 24,30 kW
3. 46,40 kW
4. 4,78 kW

3. $P = 185$ kpm $\cdot$ s^{-1}

5.1. 11,3
2. $4{,}4 \cdot 10^5$
3. 417
4. $6{,}1 \cdot 10^5$

6. $P = 13{,}2$ PS

7. $\eta = 85\,\%$

Seiten 238 bis 239

3.1. $W_{kin} = 297 \cdot 10^3$ Nm; $30{,}2 \cdot 10^3$ kpm
2. $h \approx 25{,}2$ m

5. $W_{pot} = 3{,}3$ kpm
$W_{pot} = 27{,}3$ kpm
$W_{pot} = 402{,}3$ kpm

6.1. $W_{kin} \approx 14{,}15$ kpm

8.1. $W \approx 4{,}07 \cdot 10^{15}$ kpm
$W \approx 6{,}72 \cdot 10^{15}$ kpm
$W \approx 12{,}8 \cdot 10^{15}$ kpm
$W \approx 23{,}1 \cdot 10^{15}$ kpm
2. $G = 7{,}8 \cdot 10^{12}$ kp
3. $h \approx 522$ m
$h \approx 862$ m
$h \approx 1640$ m
$h \approx 2960$ m

4. Energie kann nicht „erzeugt“ werden. Sie wird von einer Energieform in eine andere umgewandelt!

Addition, vektorielle 145
Ah-Wirkungsgrad 93
Akkumulator, Wartung 90, 93, 105
Anionen 74
Äquivalent, elektrochemisches 76
Arbeit 224
—, elektrische 49, 65
—, Maßeinheiten der 226
—, mechanische 224
ARCHIMEDES 174
ARISTOTELES 174
Atomgewicht 78
Augenblicksgeschwindigkeit 181

Ballistik 201
Ballistische Kurve 201
Bandgenerator 39
Batterien, elektrische 94
Beschleunigung 184
Beschleunigungsarbeit 225
Bewegung, gleichförmige 177
—, gleichmäßig beschleunigte 183
—, Relativität der 177
—, Satz von der Unabhängigkeit der 193
—, ungleichförmige 181
—, zusammengesetzte 192
Bleiakkumulator 91
Blitz 53
Blitzschutzanlagen 53
BOHR, NIELS 9

COULOMB, CHARLES DE 39

Dehnung 138
Diamagnetisch 113
Dielektrikum 59
Dielektrizitätskonstante 59
Dissoziation 73
Doppelschicht, elektrische 86
Drehmoment 161
Drehmomentensatz 162
Drehspulmeßwerk 116
Drehwaage 47
Durchschnittsgeschwindigkeit 181
Dynamische Kraftmessung 211
— Kraftwirkung 132

Einheiten, inkohärent 242
—, kohärent 241
Einrichtungen, kraftumformende 168
Eisenkristallwürfel 114
Elastische Formung 136
Elastizitätsmodul 139
Elektrische Arbeit 49, 65
— Batterien 94
— Energie 50
— Stromrichtung 11
Elektromotor 118
Elektromotorische Kraft 101
Elektroenergie 81
Elektrofilterschlot 52, 53
Elektrometer, Braunsches 52
Elektrolyse 75
Elektrolyt 73
Elektronen, freie 10
Elektrostatik 37
Elektrizitätsmenge 39
Elektrochemisches Äquivalent 76
Elementarladung 39
Elementarmagnet 114
Elemente, galvanische 85
ELOXAL-Verfahren 83
Energie, chemische 91
—, elektrische 50
Energie, Gesetz von der Erhaltung 237
—, kinetische 233
—, mechanische 119
—, potentielle 232
Energieumwandlung, elektrochemische 90
Entladen 92

Fallbeschleunigung 186
Farad 58
FARADAY, MICHAEL 43, 58, 79
Faradaysches Gesetz 75
Federkonstante 138
Feld, elektrisches 43, 120
—, magnetisches 120
Feldkraft, elektrische 45
Feldlinien 43
Feldstärke, elektrische 45
Ferrite 113
Flaschenzug 169
Formung, elastische 136
FRANKLIN, BENJAMIN 55
Freie Elektronen 10
Freier Fall 186

GALVANI, LUIGI 85
Galvanisches Element 85
Galvanoplastik 82
Galvanostegie 81
Galvanotechnik 81
Generator 118
Gegenwirkungsprinzip 212
Geschwindigkeit 177
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz 184
Gesetz, Hookesches 139
— von der Erhaltung der Energie 237
— von der Erhaltung der Arbeit 170

Gewitter 53
Gleichförmige Bewegung 177
Gleichgewichtslage 164
Gleichmäßig beschleunigte Bewegung 183
Gleichrichten 62
Gleitreibung 219
Grundeinheiten 240

Haftreibung 219
Halbleiter 34
Hebel 169
Hookesches Gesetz 139

Influenz 41
Influenzkonstante 49
Inkohärente Einheiten 242
Innenwiderstand 100
Ionen 73
Ionenstrom 74

Joule 226
JOULE, JAMES PRESCOTT 67
Joulesches Gesetz 67

Kalorimeter 68
Kapazität 57, 93
Kapazitivgeber 63
Kationen 74
Kilogramm 204
Kinetische Energie 233
KIRCHHOFF, G. ROBERT 20
Kohärente Einheiten 241
Kondensator 58
—, Elektrolyt 61
—, Platten 56, 61
—, Wickel 61
Konduktor 40
Korrosion, elektrolytische 89
Kraft 132
Kraftarm 162
Kraftmessung 135
—, dynamische 211
—, statische 135
Kraftumformende Einrichtungen 168
Kraftwirkung 109, 110
—, dynamische 132
—, statische 132
Kraft, Zerlegung 151
Kräftedreieck 150
Kräfteparallelogramm 148
Kräftepolygon 150
Kurbel 109
Kurven, ballistische 201

Laden 92
Ladung 39
Ladungstrennung 37, 38
Lasthebemagnet 115
Leidener Flasche 56
Leistung 228
—, elektrische 66
Leistungsmesser 117
Leiter, metallischer 34
Leitwert 12
Lichtmaschine 105
Lokalelement 89
Lotrechter Wurf 196

Magnetfeld 108, 120
Magnetismus, permanent 112
—, remanent 112
Maßeinheit der Arbeit 226
— der Masse 204
Materie 44
Mechanik, Goldene Regel 170
—, Grundgesetz 209
Mechanische Arbeit 224
— Energie 119
Meßbereich, Erweiterung 21, 26
Meßbrücke 31
Meßfehler, systematischer 12, 16, 28
—, zufälliger 12
—, durchschnittlicher 12
Meßgerät, elektrostatisches 10

Nebenwiderstand 26
NERNST, WALTER 86
Newton 210
NEWTON, ISAAC 214
Newtonmeter 226

Ohmsches Gesetz 15, 105
Orientierungspolarisation 42

Parallelogramm der Kräfte 148
Parallelschaltung 24, 105
Paramagnetisch 113
Physikalisch-technische Einheiten 240
Pond-, Mega-, Milli- 135
Potentiometer 28
Proportionalität, direkte 137
—, indirekte 137
Pumpspeicherwerk 71

Rechte-Faust-Regel 108
Reglerschalter 106
Reibung 218
Reibungskoeffizient 219
Reihenschaltung 20, 103
Relativität der Bewegung 177
Resultierende 147
Richtung des Elektronenstromes 11
Rolle 169
Rollreibung 221
Rollreibungszahl 221

Satz von der Erhaltung der Energie 234
— — — Unabhängigkeit der Bewegung 193
Scholastik 176
Schräger Wurf 200
Schwerkraft 187
Schwerpunkt 164
Shunt 26
Skalar 133
Spannung 138
—, elektrische 10
Spannung-Dehnung, Diagramm 140
Spannungsabfall 16
—, innerer 101
Spannungsquellen, Reihenschaltung 103
—, Parallelschaltung 105
Spannungsreihe, galvanische 88
Spannungsteilerschaltung 27

Spannungsverteilungsgesetz 19, 104
Spitzenbelastungszeit 71
Stahlakkumulatoren 95
Standfestigkeit 166
Statische Kraftmessung 132
— Kraftwirkung 135
STEVIN, SIMON 176
Strommesser, ballistische 40
Strommeßgerät 11, 26
Stromstoß 40
Stromrichtung, elektrische 11
Stromstärke, elektrische 11
Stromverzweigungsgesetz 24

Temperatur 34
Trägheit 205
Trägheitssatz 206
Trimmer 42

Überlagerung von Bewegungen 192
Umformen, spanloses 142
Ungleichförmige Bewegung 181
Urspannung 101
UVW-Regel 110

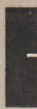
Vektor 134
Vektorielle Addition 145
Veränderung der Reibung 222
Verschiebungsarbeit 225
Verschiebungspolarisation 42
Verzögerung 185
VINCI, LEONARDO DA 175
VOLTA, ALESSANDRO 85
Voltasche Säule 86
Vorschaltwiderstand 20

Wasserstoffnormalelektrode 87
Wärmeäquivalent 67
Wärmemenge 68
Wertigkeit 78
Weißsche Bezirke 114
Wellrad 169
WHEATSTONE, CHARLES 31
Wh-Wirkungsgrad 94
Widerstand, elektrischer 12
Widerstandsbestimmung 30
Widerstandsgesetz 34
Widerstand, spezifischer 34
Widerstandsthermometer 36
Wirkungsgrad 69, 93
Wurf, lotrechter 196
—, schräger 200
—, waagerechter 199

Zerlegung einer Kraft 151
Zink-Kohle-Element 88
Zugfestigkeit 141
Zusammengesetzte Bewegung 192
Zusammensetzen paralleler Kräfte 156
— von Kräften 145

Quellennachweis der Bilder

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen von Kurt Dornbusch, Leipzig, Fritz Hampel, Hangelsberg, Heinrich Linkwitz, Berlin, Rudolf Schultz-Debowski, Berlin, und Erich E. Wenzel, Berlin angefertigt.
Titelbild: Brüggemann · Brunstein: 21/3; 52/1; 115/1; 117/1; 117/3; 118/3; 122/1 · Brückner: 201/3 · Brüggemann: 108 · Bunschuh: 9; 43/1; 187/1 · DAM Berlin: 204 · Deutscher Militärverlag: 83/2; 196; 212/1 · DEWAG Berlin: 119/1; 140/1; 141/1 · EKB Bitterfeld: 98/1 · VEB Elite Diamant: 98/3 · EMW Eisenach: 81/2 · PGH Fotostudio Leipzig: 73 · Fuhr: 178/2 · Goltz: 131/1; 228 · Grabow: 124/1; 124/2; 125/1; 126/1; 127/1; 175/2 · Hacker: 115/2 · Heinrich: 154/4 · Held: 47/2 · Ittenbach: 165/2; 193 · Krüger: 92/1 · Kube: 178/1 · Kunert: 219/1 · LEW Hennigsdorf: 95/2 · VEB Mähdrescherwerk Weimar: 168 · Meyer: 98/4; 98/5; 99/1; 154/2; 161 · Murza: 8 · Röhnert: 174/1; 204/1 · Seifert: 62/1; 95/1; 100; 133/2; 156; 164; 218 · Storm: 118/1 · Stöhr: 177 · Volk und Wissen Archiv: **7**; 10/2; 28/2; 31/3; 32/1; 37; 43/2; 44/1; 45/1; 45/2; 45/3; 55/1; 56/1; 61/1; 61/2; 62/2; 65; 83/1; 90/1; 94/1; 96/2; 98/2; 106/1; 115/3; 118/2; 132; 168/1; 175/1; 176/1; 188/1; 197; 201/2; 222/1; 224; 238/1 · Zentralbild: 15/1; 81/1; 82/1; 85; 85/1, 85/2; 116/1; 119/2; 129; 130/1; 136; 145; 167/1; 176/2; 192; 213/1; 232



Oben, von links nach rechts

Galvanische Spannungsquelle

Galvanische Spannungsquelle, 20 V

Galvanische Spannungsquelle, mehrere Elemente

Wechselstrom

Gleichstrom

Leitungskreuzung

Leitungsabzweigung

Schalter

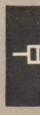
Gleichstromgenerator

Gleichstrommotor

Buchse und Stecker

Steckdose

Meßinstrument



Unten, von links nach rechts

Leistungsmesser

Schmelzsicherung

Elektrometer

Spannungsmesser

Strommesser

Widerstand

Heizwiderstand

Widerstand, verstellbar

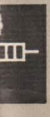
Kondensator

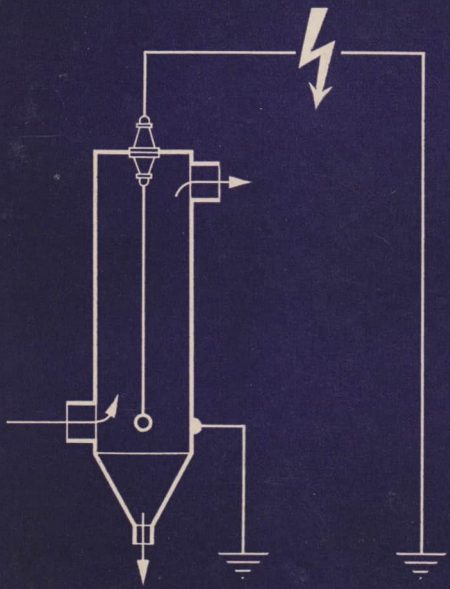
Spannungsteiler

Kondensator, verstellbar

Lampe

Elektrolytkondensator





02 09 54-3
5.80 MDN