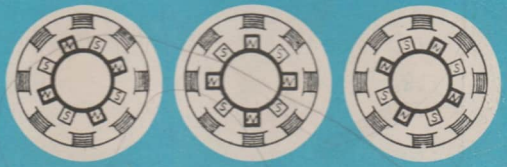
PHYSIK



NEUNTES SCHULJAHR

PHYSIK

EIN LEHRBUCH FÜR DAS NEUNTE SCHULJAHR

Mit 295 Abbildungen · Ausgabe 1960

VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1960

Verfaßt von Wolfgang Brunstein, Max Liebscher und Wolfgang Rzymski

Redaktionsschluß: 1. 2. 1960
Zeichnungen: Kurt Dornbusch und Eberhard Graf
Umschlag: Günter Klaus

ES 11 H · Bestell-Nr. 02 922-1 · 2,30 DM · Lizenz Nr. 203 - 1000/60 (E)
Gesamtherstellung: VEB Druckhaus „Maxim Gorki", Altenburg

INHALTSVERZEICHNIS

I. Elektrizitätslehre

1. Die Elektrolyse 5
2. Anwendungen der Elektrolyse 9
3. Die chemischen Spannungsquellen 13
4. Die elektrischen Batterien 21
5. Das elektrische Feld 27
6. Der Kondensator 38
7. Die elektromagnetische Induktion 47
8. Die Selbstinduktion — Wirbelströme 55
9. Die Erzeugung von Wechselstrom 59
10. Die Gesetze des Wechselstromkreises 68
11. Dreiphasenstromgeneratoren 81
12. Drehstrommotoren 88
13. Gleichstromgeneratoren 91
14. Gleichstrommotoren 96
15. Transformatoren 100
16. Die elektrische Energieversorgung 111

II. Mechanik

17. Die Kraft 125
18. Die Zusammensetzung von Kräften 128
19. Die Zerlegung von Kräften 134
20. Parallele Kräfte 137
21. Das Drehmoment 138
22. Der Schwerpunkt 141
23. Die Gleichsgewichtsanlagen — Die Standfestigkeit 142
24. Die verschiedenen Arten der Bewegung — Die Geschwindigkeit 146
25. Die gleichförmige Bewegung 148
26. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung 152
27. Der freie Fall 157
28. Zusammengesetzte Bewegungen 160
29. Die Bewegung gegen hemmende Kräfte 166
30. Grundeigenschaften der Körper — Die Masse 171
31. Das Grundgesetz der Mechanik 173
32. Maßsystem derMechanik — Die dynamische Kraftmessung 176

33. Das Gegenwirkungsprinzip 179
34. Die mechanische Arbeit 181
35. Die mechanische Energie 182
36. Die Drehbewegung 185
37. Kräfte bei der kreisförmigen Zentralbewegung 187
38. Die Keplerschen Gesetze — Das Gravitationsgesetz von Newton 194
39. Grundfragen der Kosmonautik 200

Zusammenstellung der wichtigsten Gleichungen der Mechanik . 206
Namen- und Sachverzeichnis 209
Quellenverzeichnis der Abbildungen 212

I. Elektrizitätslehre

1. Die Elektrolyse

1. Die Leitfähigkeit des Wassers. Jedes Kraftfahrzeug ist mit einer Akkumulatorenbatterie als elektrische Spannungsquelle ausgerüstet. Der Kraftfahrer weiß, daß der Bleiakkumulator mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist und daß in gewissen Zeitabständen destilliertes Wasser nachzufüllen ist. An die Batterie sind mehrere Verbraucher angeschlossen: die Scheinwerfer, der Anlasser, die Zündspule, der Scheibenwischer u. a. Auch am Unterrichtstag in der sozialistischen Produktion kann man diese oder ähnliche Spannungsquellen und ihre Wartung kennenlernen. Bekanntlich wird in einem elektrischen Stromkreis auch die Spannungsquelle selbst, in diesem Falle die Akkumulatorenbatterie, vom Strom durchflossen. Die verdünnte Schwefelsäure im Innern der Batterie leitet also den Strom. Im folgenden soll untersucht werden, ob dies für alle Flüssigkeiten gilt, und welche Erscheinungen dabei auftreten. Einige wichtige Grundtatsachen wurden bereits im Chemieunterricht besprochen.

Bei der in Abbildung 5/1 wiedergegebenen Versuchsanordnung werden als *Elektroden* zwei Metallplatten verwendet. Die mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundene Elektrode heißt bekanntlich *Katode*, die positive Elektrode *Anode*. Füllt man das Gefäß mit destilliertem Wasser, so zeigt das Milliamperemeter keinen Ausschlag. Genaue Untersuchungen haben aber gezeigt, daß ein sehr schwacher Strom fließt, der nur durch einen sehr empfindlichen Strommesser angezeigt wird. Setzt man dem Wasser aber einige Tropfen Schwefelsäure zu, so zeigt nun das Meßinstrument einen elektrischen Strom an. Während also destilliertes Wasser nahezu ein Isolator ist, leitet angesäuertes Wasser den Strom. Führt man den gleichen Versuch mit Laugen und Salzlösungen durch, so erweisen sie sich ebenfalls als elektrische Leiter. Auch Leitungswasser leitet den elektrischen Strom, da in ihm geringe Salzmengen gelöst sind.

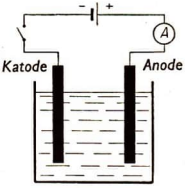


Abb. 5/1. Untersuchung der Leitfähigkeit von Flüssigkeiten

Destilliertes Wasser ist nahezu ein Isolator. Wäßrige Lösungen von Säuren, Hydroxyden und Salzen sind Leiter.

2. Die Zersetzung angesäuerten Wassers durch den elektrischen Strom. An den Elektroden beobachtet man bei Stromfluß eine Gasentwicklung. Fängt man diese Gase getrennt voneinander auf, so ist festzustellen, daß an der Katode erheblich mehr Gas als an der Anode entwickelt wird. Das Gas an der Katode verbrennt mit

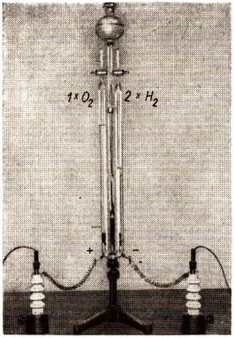


Abb. 6/1. Hofmannscher Wasserzersetzungsapparat

bläulicher Flamme; es ist *Wasserstoff*. Das Gas an der Anode bringt einen glimmenden Span zum hellen Aufglühen; es handelt sich somit um *Sauerstoff*.

Zur genauen Messung der Gasmengen verwendet man den *Hofmannschen Wasserzersetzungsapparat*. (Abb. 6/1). Die beiden seitlichen Röhren enthalten in ihrem unteren Teil je eine Platinelektrode. Oben sind die Röhren durch einen Hahn verschlossen. Zum Messen der Gasmenge sind die Röhren mit Milliliterskalen versehen. Das mittlere Rohr dient zum Einfüllen der Flüssigkeit und nimmt die durch die Gasentwicklung verdrängte Flüssigkeit auf.

Angesäuertes Wasser wird vom elektrischen Strom in die Bestandteile des Wassers, in Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt.

3. Der Begriff der Elektrolyse und des Elektrolyten. Die bisher durchgeführten Versuche zeigen bereits, daß nicht alle Flüssigkeiten Leiter sind. Durch destilliertes Wasser beispielsweise floß praktisch kein Strom. Auch Öl erweist sich als eine gut isolierende Flüssigkeit. Deshalb wird es in manchen Hochspannungsschaltern verwendet, damit sich beim Öffnen der Kontakte kein Lichtbogen bildet. Die Lösungen von Salzen, Hydroxyden und Säuren sowie auch Salzschmelzen und Hydroxydschmelzen leiten dagegen den elektrischen Strom gut.

Mit dem Stromdurchgang durch leitende Flüssigkeiten ist stets eine chemische Zersetzung verbunden. Man bezeichnet sie als **Elektrolyse.** Die leitenden Flüssigkeiten selbst heißen *Elektrolyte.*

Man bezeichnet die Zerlegung einer chemischen Verbindung durch den elektrischen Strom als Elektrolyse. Flüssigkeiten, die den elektrischen Strom leiten, nennt man Elektrolyte.

4. Die Ionenleitung in Flüssigkeiten. a) Dissoziation. Wie bereits aus dem Chemieunterricht bekannt ist, spaltet sich ein Teil der Moleküle jedes Elektrolyten in Ionen auf. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Dissoziation.*

Auch in reinem Wasser spalten sich einige Moleküle (H_2O) in je ein elektrisch positiv geladenes Wasserstoffion (H^+) und ein elektrisch negativ geladenes Hydroxylion (OH^-):

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-.$$

Da aber immer nur sehr wenige Moleküle des Wassers dissoziieren, stellt reines Wasser praktisch einen Isolator dar. In 18 g H_2O sind nur etwa $\frac{1}{10\,000\,000}$ dissoziiert. Die bessere Leitfähigkeit der wäßrigen Lösungen von Säuren, Hydroxyden oder Salzen erklärt sich daraus, daß eine erheblich größere Anzahl von Molekülen des gelösten Stoffes dissoziiert sind. Bei der Dissoziation eines Moleküls einer wäßrigen

Lösung ergeben die Wasserstoff- oder die Metallatome immer die positiven Ionen, die *Kationen*. Die Säurerest- und die OH-Ionen sind dagegen stets negativ geladen. Die Größe der elektrischen Ladung eines Ions entspricht der Wertigkeit des betreffenden Atoms oder der Atomgruppe. Die Beispiele in der folgenden Tabelle verdeutlichen nochmals diese Gesetzmäßigkeit.

Dissoziation wäßriger Lösungen von Säuren, Salzen und Laugen

HCl	$\rightarrow$	H^+	$+$	Cl^-	$AgNO_3$	$\rightarrow$	Ag^+	$+$ NO_3^-
H_2SO_4	$\rightarrow$	$2H^+$	$+$	SO_4^{--}	$NaOH$	$\rightarrow$	Na^+	$+$ OH^-
$NaCl$	$\rightarrow$	Na^+	$+$	Cl^-	$Ca(OH)_2$	$\rightarrow$	Ca^{++}	$+$ $2OH^-$
$CuSO_4$	$\rightarrow$	Cu^{++}	$+$	SO_4^{--}	NH_4OH	$\rightarrow$	NH_4^+	$+$ OH^-

In wäßrigen Lösungen von Säuren, Hydroxyden und Salzen treten durch Dissoziation positive Wasserstoff- oder Metallionen und negative Säurerest- oder OH-Ionen auf. Die Anzahl der jeweiligen Ladungen entspricht der chemischen Wertigkeit des Ions.

b) Der Ionenstrom. Die elektrolytische Wasserzersetzung beruht auf der Dissoziation der Wassermoleküle (7/1). Die Katode als negativer Pol zieht die positiven Wasserstoffionen an. Die negativen OH-Ionen wandern zur Anode. An der Katode herrscht bekanntlich ein Elektronenüberschuß. Gelangt nun ein positives Wasserstoffion an die Katode, so nimmt es ein Elektron aus dem Elektrodenmetall auf, seine positive Ladung wird dadurch aufgehoben. Das vorher geladene Ion scheidet sich als elektrisch neutrales Wasserstoffatom an der Katode ab. Zugleich hat damit die metallische Leitung ein Elektron abgegeben. Sofort liefert die Spannungsquelle ein neues Elektron nach. Das bedeutet aber eine Elektronenbewegung in der äußeren Leitung; *es fließt ein elektrischer Strom.*

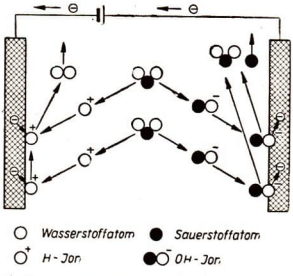


Abb. 7/1
Die elektrolytische Wasserzersetzung

An der Anode geben umgekehrt die Hydroxylionen des dissoziierten Wassers (OH^-) ihre Ladung in Form von Elektronen (e) ab und verbinden sich zu Wasser:

$$2OH^- + 2e \rightarrow H_2O + O.$$

Je zwei Atome Sauerstoff vereinigen sich zu Sauerstoffmolekülen, die an der Anode aufsteigen:

$$2O \rightarrow O_2.$$

Für je zwei Elektronen, die an der Katode zur Entladung der Wasserstoffionen führen, geben an der Anode zwei Hydroxylionen ihre zwei Elektronen an die Anode ab.

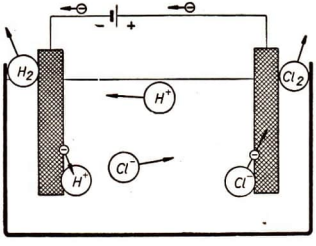


Abb. 8/1
Ionenstrom in Salzsäure

Die Katode gibt also Elektronen ab, während die Anode Elektronen aufnimmt. So entsteht bei angelegter Spannung infolge der Ionenwanderung in der Flüssigkeit im äußeren Stromkreis ein Elektronenstrom. Abbildung 8/1 veranschaulicht diesen Vorgang am Beispiel des Stromflusses durch verdünnte Salzsäure.

Infolge ständig neuer Dissoziation werden die neutralisierten Ionen durch neue ersetzt, die nun ihrerseits wieder zu den Elektroden wandern. Die an den Elektroden entladenen Ionen werden entweder an der Elektrode abgeschieden oder gehen hier eine neue chemische Verbindung ein. Die geschilderten Vorgänge charakterisieren die *chemische Wirkung des elektrischen Stromes.*

Innerhalb eines Elektrolyten ist der elektrische Strom eine Ionenwanderung zu den Elektroden. An den Elektroden geben die Ionen ihre Ladung ab und werden als Zersetzungsprodukte des Elektrolyten frei oder gehen eine neue Verbindung ein.

5. Die Stromstärkeeinheit Ampere und ihre Festlegung durch elektrolytische Vorgänge. Nach dem *Ohmschen Gesetz* ist in einem Stromkreis mit dem Widerstand 1 Ω bei einer Spannung von 1 V die Stärke des Stromes 1 A. Diese Werte zeigen die Meßinstrumente an. Um aber ein Meßinstrument eichen zu können, muß man die Stromstärke 1 A auf Grund bestimmter Wirkungen des Stromes jederzeit darstellen und kontrollieren können. Hierfür eignet sich die chemische Wirkung des elektrischen Stromes. Bekanntlich ist ein elektrischer Strom um so stärker, je mehr Elektronen in 1 s durch den Leiterquerschnitt fließen. Die Anzahl dieser Elektronen steht nun in einem bestimmten Verhältnis zu der Anzahl der in der gleichen Zeit an einer Elektrode ankommenden Ionen des Elektrolyten. Bei einer Silbernitratlösung ist beispielsweise die Anzahl der an der Katode abgeschiedenen Silberatome gleich der Anzahl der durch den Leiterquerschnitt geflossenen Elektronen. Daher hat man in der je Sekunde abgeschiedenen Silbermenge, die man durch Wägung ermitteln kann, ein *Maß für die Stromstärke.* Bei der Stromstärke 1 A wird je Sekunde 1,118 mg Silber abgeschieden.

Durch eine solche Meßvorschrift war lange Zeit die Einheit der Stromstärke gesetzlich festgelegt:

Ein elektrischer Strom hat die Stärke von 1 A, *wenn er in* 1 s *aus einer wäßrigen Silbernitratlösung* 1,118 *mg Silber abscheidet.*

Un die elektrischen Größen an die mechanischen anzuschließen, hat man eine neue Meßvorschrift für das Ampere festgelegt. Sie bezieht sich auf die *Kraftwirkung zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern.* Beide Vorschriften legen dieselbe Einheit, das Ampere, fest. Sie bilden lediglich zwei verschiedene Methoden der Darstellung der Stromstärkeeinheit. Für amtliche Eichzwecke benutzt man die neue Meßvorschrift, die im Jahre 1958 gesetzlich festgelegt wurde.

6. Die stoffliche Natur des elektrischen Stromes. Bekanntlich entsteht der durch metallische Leiter fließende Strom durch freie Elektronen, die bei angelegter Spannung im Metall wandern. *Der elektrische Strom in festen Körpern ist stofflicher Natur.* Mit der Erforschung der *Ionenleitung in Flüssigkeiten* wurde bewiesen, daß auch der elektrische Strom in Flüssigkeiten stofflich ist. Jeder elektrische Strom ist an stoffliche Teilchen gebunden, die elektrisch geladen sind. Die Geschwindigkeit der freien Elektronen im Metall hängt von der Stromstärke, vom Leitermaterial und von seinem Querschnitt ab und beträgt in einem Cu-Draht mit dem Querschnitt 1 mm^2 bei einer Stromstärke von 12 A ungefähr 1 $\frac{mm}{s}$. Während sich also die Elektronen im Stromkreis verhältnismäßig langsam bewegen, läuft der Anstoß für die Bewegung der Elektronen beim Schließen des Stromkreises mit Lichtgeschwindigkeit, also mit etwa 300000 $\frac{km}{s}$, durch die Leiter. Die Anzahl der bewegten Elektronen ist sehr groß. Bei einer Stromstärke von 1 A bewegen sich etwa 6,3 Trillionen Elektronen je Sekunde durch den Leiterquerschnitt.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Erklären Sie, welche Gefahren für den Menschen aus der Leitfähigkeit des Wassers erwachsen können!
2. Welche Schäden können an elektrischen Anlagen infolge Feuchtigkeit entstehen?
3. Leiten Sie durch eine Kochsalzlösung und eine Taschenlampe einen elektrischen Strom, den Sie einer Taschenlampenbatterie entnehmen! Verstärken Sie allmählich die Konzentration! Stellen Sie das Versuchsergebnis fest, und erklären Sie die Vorgänge!
4. Beschreiben Sie die Vorgänge bei der elektrolytischen Abscheidung von Silber aus einer Silbernitratlösung!

2. Anwendungen der Elektrolyse

1. Die Bedeutung der Elektrolyse für die Produktion. Blitzende Chromflächen an Kraftfahrzeugen, Kochtöpfe aus Aluminium, elektrische Kupferleitungen sind heute alltägliche Selbstverständlichkeiten. Diese und viele andere Dinge jedoch gehören noch nicht sehr lange zum gewohnten Alltagsbild. Erst die wissenschaftliche Erforschung der chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes schuf die Grundlage, auf der man neue Produktionsverfahren zur Gewinnung von Aluminium und Reinkupfer und zur Oberflächenveredlung, zum Beispiel mit Chrom, entwickeln konnte. Wie auf allen Gebieten der Technik hängen auch hier Wissenschaft und Produktionspraxis eng miteinander zusammen. Die Wissenschaft erforscht die Gesetze der Natur, die dann zur Verbesserung der Produktion angewandt werden. Andererseits ergeben sich rückwirkend aus der praktischen Tätigkeit heraus immer wieder neue Aufgaben für die wissenschaftliche Forschung. Aus den praktischen Bedürfnissen der Menschen ist ja erst die Wissenschaft entstanden. In enger *Wechselwirkung zwischen Theorie und Praxis* ergeben sich immer neue technische Fortschritte. Zu ihnen zählen auch die elektrolytischen Verfahren zur Reingewinnung von Stoffen, beispielsweise des Aluminiums und des Kupfers.

2. Elektrolyse in der chemischen Industrie zur Reingewinnung von Stoffen. a) Aluminiumgewinnung. Viele Gebrauchsgegenstände, die früher nur aus Eisen oder Messing hergestellt wurden, werden heute aus Aluminium gefertigt. Die Geräte werden

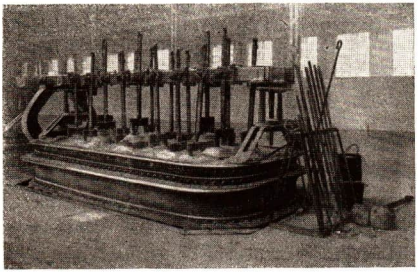


Abb. **10/1.** Aluminiumofen

somit leichter, die Teile rosten nicht, beziehungsweise überziehen sich nicht mit giftigen Grünspanschichten. Außerdem spart man Schwer- und Buntmetalle ein. Vor allem aber ist die Flugzeugindustrie auf leichte Werkstoffe, wie es die Aluminiumlegierungen sind, angewiesen. Auch in der Elektrotechnik und im Maschinen- und Apparatebau spielt das Aluminium eine große Rolle. So ist Aluminium heute einer der wichtigsten Rohstoffe unserer Industrie.

Die Gewinnung des Aluminiums mit Hilfe der *Schmelzflußelektrolyse* ist aus dem Chemieunterricht bekannt. Die elektrische Energie wird dabei zunächst in Wärmeenergie umgewandelt. Dadurch werden die Rohstoffe geschmolzen. Danach setzt die Elektrolyse ein. Ein *Elektrolytofen* mit einer Leistung von 74 kW liefert jährlich 15 bis 20 t Metall (Abb. **10/1**). Für eine Tonne Aluminium ist eine Energieaufwand von 20000 kWh nötig. Das bedeutet einen sehr großen Verbrauch an elektrischer Energie, der durch die außerordentliche Bedeutung des Aluminiums gerechtfertigt ist. Außerdem ist die Schmelzflußelektrolyse das zweckmäßigste Verfahren zur Gewinnung von reinem Aluminium. Der *Siebenjahrplan* unserer Republik sieht eine Steigerung der Aluminiumproduktion auf 65000 t im Jahre 1965 vor. Diese Steigerung kann aber nur dann erreicht werden, wenn die notwendige elektrische Energie zur Verfügung steht. Dieses eine Beispiel zeigt bereits sehr deutlich, welche große Bedeutung die schnelle Steigerung unserer Energieproduktion im Laufe des Siebenjahrplanes hat (vgl. S. 122).

Auch die Metalle Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium und Barium erzeugt man auf ähnliche Weise in reiner Form.

b) Gewinnung von Reinkupfer. In den Kupferhütten gewinnt man mit Hilfe eines Schmelzprozesses das Rohkupfer, das jedoch noch etwa 10% Verunreinigungen in Form von Metallbeimengungen wie Zinn, Nickel, Eisen und anderen enthält. Auch sind teilweise seltene Edelmetalle im Rohkupfer enthalten. Für viele technische Zwecke kann dieses Rohkupfer bereits verwendet werden. Die Elektroindustrie fordert aber einen höheren Reinheitsgrad, da die Verunreinigungen die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers stark herabsetzen. Zur Reinigung des Kupfers wendet man ein elektrolytisches Verfahren an. Auf diese Weise gewinnt man das sogenannte Elektrolytkupfer mit einer Reinheit von 9,9% und darüber. Ein Rohkupferblock wird als Anode in eine Kupfersalzlösung gehängt. In der Lösung bilden sich Kupferionen, die bei angelegter Spannung zur Katode wandern. Dort scheiden sie sich als metallisches Kupfer ab. Gleichzeitig gehen ständig Kupferatome aus der Anode in Lösung. Durch eine richtige Wahl der angelegten Spannung, die nicht zu hoch sein darf, wird verhindert, daß auch die metallischen Verunreinigungen des Rohkupfers mit in Lösung gehen und dadurch sich auch an der Katode abscheiden können. Auf Grund dieser Maßnahme

Abb. 11/1. Gewinnung von Reinkupfer durch Elektrolyse in der Ilsenburger Kupferhütte

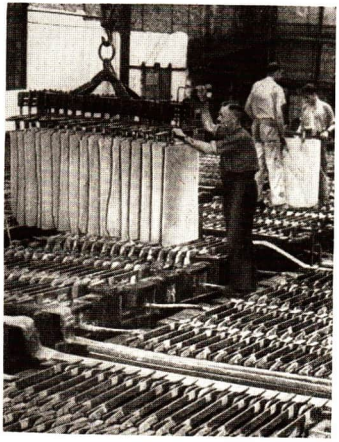
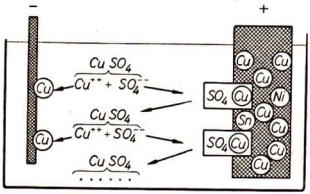


Abb. 11/2. Schematische Darstellung der Gewinnung von Elektrolytkupfer



scheidet sich an der Katode reines Kupfer ab (Abb. 11/1). In der Abbildung 11/2 ist dieser Vorgang schematisch wiedergegeben. Die Verunreinigungen setzen sich als Anodenschlamm am Boden ab.

2. Die Galvanotechnik. a) Galvanostegie. Während die meisten Eisenteile des Fahrrades lackiert sind, haben der Lenker und einige andere Teile eine blitzende Chromschicht. Diese schützt, wie auch der Lack, vor dem Oxydieren. Man erreicht durch die Chromschicht zugleich ein gutes Aussehen. Solche Metallüberzüge werden mit Hilfe der Elektrolyse angefertigt. Man nennt dies *Oberflächenveredlung*. Das Verfahren bezeichnet man auch als *Galvanostegie* oder *Galvanisieren*. Man kann beispielsweise Kraftfahrzeugteile verchromen, Bestecke versilbern, andere Gebrauchsgegenstände auch vernickeln, Eisenblech verzinken und sogar Kohlestäbe verkupfern.

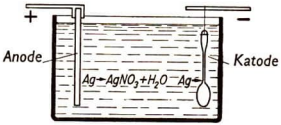


Abb. 11/3. Galvanisierungszelle

In einem Trog aus Holz, Steingut oder Glas befindet sich die Lösung eines Salzes des Metalls, aus dem der Überzug hergestellt werden soll. Als Anoden werden Platten aus diesem Metall in die Lösung gehängt, die Katoden sind die Werkstücke selbst (Abb. 11/3). Nach dem Einschalten des Stromes scheidet sich an den Werkstücken das Metall ab und bildet einen gleichmäßigen Überzug. Da sich die Schicht atomar oder molekular anlagert, haftet sie unter bestimmten Bedingungen sehr fest auf dem Werkstück. Das aus der Lösung abgeschiedene Metall wird dadurch ersetzt, daß von der Anodenplatte immer wieder neues Metall in Lösung geht. Je nach der Stromstärke und der Dauer des Stromflusses kann die Schichtdicke geregelt werden.

b) Galvanoplastik. Man kann als Katode aber auch ein nichtleitendes Werkstück benutzen, das vorher mit Graphitpulver bestäubt wurde und dadurch an der Ober-

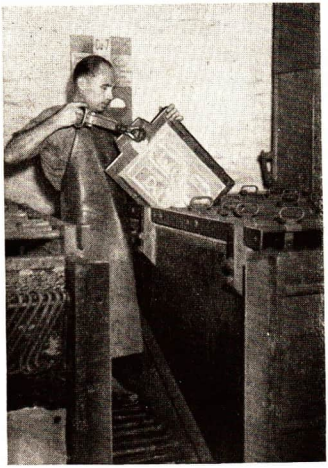


Abb. 12/1. Herausnehmen einer Matrize aus dem Galvanisierungsbad

fläche leitend wird. Läßt man die sich bildende Schicht genügend dick werden, so kann man sie ablösen. Auf diese Weise erhält man negative Nachbildungen der Katode. Jede erhabene Stelle des Vorbildes entspricht einer Vertiefung auf der Nachbildung und umgekehrt. Zur Festigung gießt man die abgehobene Schicht mit Blei aus. Dieses Verfahren nennt man *Galvanoplastik*.

Große Bedeutung hat die Galvanoplastik für die Drucktechnik erlangt. Man fertigt von den gesetzten Druckstöcken zunächst *Matrizen* an. Das sind Abdrücke in einem Plast. Von diesen Abdrücken stellt man galvanoplastische Abzüge, sogenannte *Galvanos*, her. Mit Hilfe dieser Galvanos wird gedruckt. Sie sind wesentlich widerstandsfähiger als die Bleilettern. Während man von diesen nur etwa 10000 Drucke herstellen kann, erreicht man mit einem Galvano 100000 Drucke. Versieht man das Kupfergalvano noch mit einer Chromschicht, so kann man sogar bis zu 300000 Drucke damit herstellen.

Auch zum Pressen von Schallplatten benutzt man galvanoplastisch hergestellte Prägestempel.

3. Das Eloxal-Verfahren. Elektrische Leiter müssen im allgemeinen isoliert sein. Zur Isolierung von Leitern aus Aluminium benutzt man ein elektrolytisches Verfahren. Hängt man die betreffenden Stücke als Anode in ein Säurebad, so bildet sich auf ihrer Oberfläche eine gut isolierende Oxydschicht. Dieses Verfahren heißt *Eloxal-Verfahren: e*lektrisch *ox*ydiertes *Al*uminium. Die Eloxalschicht ist zugleich ein guter Schutz gegen chemische Einflüsse.

Während beim Galvanisieren ein von der Katode verschiedenes Metall von außen auf diese aufgetragen wird, stellt das Eloxal-Verfahren eine Oxydation dar, bei der die erzeugte Schicht in die Oberfläche des Metalls gleichsam hineinwächst. Dadurch ist die Schutzschicht mit dem Grundmetall unlöslich verbunden. Hier kommt es also nicht auf die Veredlung der Katode, sondern auf die „Zerstörung" der Anode an.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man einen Kohlestab verkupfern? Führen Sie den Versuch mit Hilfe einer Taschenlampenbatterie aus!
2. Vergleiche das Eloxal-Verfahren mit der galvanischen Oberflächenveredlung! Stellen Sie Gemeinsames und Unterschiedliches zusammen!

3. An der Batterie eines Kraftfahrzeuges sind die Kennzeichnungen der Pole nicht mehr zu erkennen.
   a) Wie kann man auf elektrolytischem Wege sehr leicht wieder die Pole bestimmen?
   b) Überlegen und untersuchen Sie, was sich zeigt, wenn man zwischen die Pole einer Batterie feuchtes Lackmuspapier hält!
4. Welche Vorgänge spielen sich bei der elektrolytischen Gewinnung von Kupfer ab?

3. Die chemischen Spannungsquellen

1. Die Entdeckung der galvanischen Elemente. Als die Menschen die Naturerscheinungen noch nicht wissenschaftlich erforschten, sahen sie in elektrischen Vorgängen das Wirken geheimnisvoller, übernatürlicher Kräfte. Zwei bahnbrechende Forscher auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre waren die italienischen Wissenschaftler *Luigi Galvani* (1737 bis 1798) und *Alessandro Volta* (1745 bis 1827). *Galvani* beobachtete, daß die Muskeln von Froschschenkeln zuckten, wenn er sie mit Kupferdrähten an einem Eisengitter aufhängte und diese das Eisengitter berührten. Er nahm zunächst an, daß den tierischen Körpern eine, wie er meinte, tierische Elektrizität innewohne, die durch die Metalle in Fluß gebracht wurde. *Volta* wiederholte diese Versuche und stellte fest, daß eine elektrischer Strom aus der leitenden Verbindung der zwei Metalle Kupfer und Eisen mit einem Elektrolyten zustande kommt. Die Froschschenkel waren nur die elektrischen Leiter, die bei der Berührung mit dem Eisengitter den Stromkreis schlossen. Der Elektrolyt ist die Flüssigkeit im Gewebe der Froschschenkel. Ihr Zucken kam durch die Einwirkung der Elektrizität auf die Nerven in den Schenkeln zustande.

Auf Grund dieser Erkenntnis konstruierte *Volta* die ersten brauchbaren Spannungsquellen. Damit begann ein neuer Entwicklungsabschnitt der Forschung. Man konnte jederzeit elektrische Energie gewinnen, um so die elektrischen Vorgänge weiter erforschen zu können. Diese Art der Spannungsquellen nennt man nach ihrem Entdecker *galvanische Elemente*. *Galvani* und *Volta* schufen trotz vieler Schwierigkeiten die Voraussetzungen für eine wissenschaftliche Erforschung der Elektrizität. Später ergab sich, daß alle elektrischen Vorgänge nach bestimmten erkennbaren Naturgesetzen ablaufen und stofflicher Natur sind. Übernatürliche, unerklärbare Erscheinungen gibt es auch bei diesen Vorgängen nicht.

2. Der Aufbau und die Wirkungsweise der galvanischen Elemente. Das Ergebnis des Froschschenkelversuches wirft die Frage auf, ob zwischen allen Metallen, die durch einen Elektrolyten verbunden sind, elektrische Spannungen entstehen.

Stellt man zwei Kupferplatten in ein Becherglas mit verdünnter Schwefelsäure, so läßt sich zwischen ihnen keine Spannung nachweisen. Auch zwischen zwei Eisen-, zwei Zink- oder zwei Bleiplatten, die in einer Säure stehen, entsteht keine Spannung. Taucht man aber eine Kupfer- und eine Zinkplatte in verdünnte Schwefelsäure, so erhält man eine Spannung von etwa 1 V. Diese Spannung verursacht in einem geschlossenen Stromkreis einen Gleichstrom, den man mit einer kleinen Glühlampe oder einem Galvanometer nachweisen kann. Die Kupferplatte stellt den Pluspol, die Zinkplatte den Minuspol dar. Man bezeichnet diese Anordnung als ein *Kupfer-Zink-Element* (Abb. 14/1).

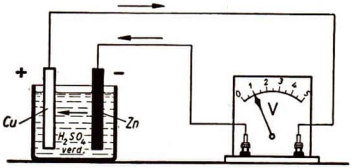


Abb. 14/1. Kupfer-Zink-Element

Auch zwischen je zwei anderen, aber unterschiedlichen Metallen entstehen bestimmte elektrische Spannungen, wenn die Stoffe durch einen Elektrolyten verbunden sind. Alle derartigen Anordnungen sind galvanische Elemente.

Galvanische Elemente sind elektrische Spannungsquellen. Sie bestehen aus zwei verschiedenen Metallplatten oder sonstigen leitenden Stoffen, die sich in einem Elektrolyten befinden.

3. Die elektrochemische Spannungsreihe. Stellt man ein *Kupfer-Blei-Element* zusammen, so hat dieses eine wesentlich geringere Spannung, als das Kupfer-Zink-Element, nämlich etwa 0,5 V. Die Kupferplatte bildet wieder den Pluspol, die Bleiplatte stellt den Minuspol dar (Abb. 14/2). Benutzt man eine Zink- und eine Bleiplatte, dann mißt man eine Spannung von ungefähr 0,6 V. Jetzt ist die Bleiplatte jedoch der Pluspol. Daraus erkennt man, daß ein bestimmtes Metall nicht in jeder Zusammenstellung immer den gleichen Pol bildet. Das richtet sich danach, mit welchem anderen Metall es zusammengestellt wird. Weiterhin fällt auf, daß die Summe der Spannungen des *Kupfer*-Blei- und Blei-*Zink*-Elements gleich der Spannung des *Kupfer-Zink*-Elements ist.

Genau durchgeführte Versuche haben ergeben, daß man die verschiedenen Stoffe, aus denen mit Säuren, Laugen oder Salzen galvanische Elemente zusammengestellt werden können, in einer Reihe anordnen kann. Man bezeichnet diese Reihe als *elektrochemische* oder *galvanische Spannungsreihe:*

+ C Au Ag Hg Cu H Pb Sn Ni Fe Zn Al Mg − .

Bringt man zwei Stoffe aus dieser Reihe in einen Elektrolyten, so entsteht zwischen ihnen eine elektrische Spannung. Diese ist um so höher, je weiter die beiden Stoffe in der Reihe auseinanderstehen. Der in der Reihe links stehende Stoff bildet den Pluspol und der rechts stehende den Minuspol, des Elements. Auch Wasserstoff ist in dieser Reihe enthalten, da bei elektrochemischen Vorgängen auch Wasserstoff an einer Elektrode auftreten kann und dann für die Größe der Spannungsdifferenz maßgebend ist. Im Kupfer-Blei-Element ist Blei also Minuspol, da es in der Reihe rechts vom Kupfer steht. Im Blei-Zink-Element dagegen

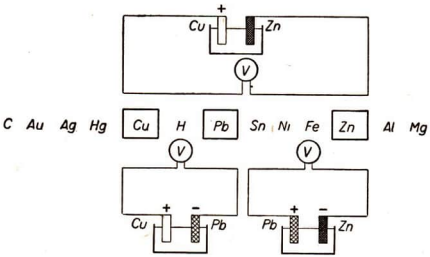


Abb. 14/2. Vergleich von galvanischen Elementen

bildet Blei den Pluspol, weil es in der Reihe links vom Zink steht. Hier schlägt somit eine Eigenschaft, die Polarität der Bleielektrode, unter bestimmten Bedingungen in das Gegenteil um.

Die Gesetzmäßigkeit zeigt anschaulich, wie Eigenschaften von Dingen, die Polarität einer Elektrode, nicht immer nur von dem Ding allein abhängen, sondern auch von dem Zusammenhang, in dem diese Dinge stehen. Deshalb muß man alle Erscheinungen der Welt in ihren Zusammenhängen sehen und beurteilen.

4. Das gebräuchliche Kohle-Zink-Element. Die meisten Taschenlampenbatterien enthalten *Kohle-Zink-Elemente*. Der Minuspol eines solchen Elements besteht aus einem Zinkzylinder, der oben durch eine Pappscheibe und eine Vergußmasse fest verschlossen ist (Abb. **15**/1). In der Mitte befindet sich ein Kohlestab, der den Pluspol bildet. Er ist von einem Beutel umhüllt, der Braunstein und Füllstoffe enthält. Der Beutel und sein Inhalt sind mit einer verdickten Salmiaksalzlösung durchtränkt. Man bezeichnet derartige Elemente als *Trockenelemente*. Ihre Spannung beträgt bei Verwendung von Kohle- und Zinkelektroden ungefähr 1,5 V. Früher benutzte man Kohle-Zink-Elemente mit flüssigem Elektrolyten vielfach für elektrische Klingeln u. a.

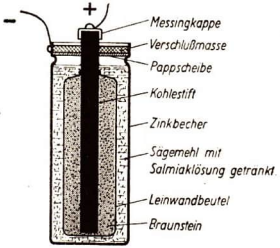


Abb. **15**/1 Kohle-Zink-Element

Bei der Stromentnahme entsteht durch elektrolytische Vorgänge Wasserstoff, der sich entsprechend der Stromrichtung im Innern des Elements am Kohlestab abscheidet. Hätte der Kohlestab keine Braunsteinumhüllung, so würde er sich mit einer dünnen Wasserstoffschicht überziehen. Statt einer Kohleelektrode würde dann eine Wasserstoffelektrode dem Zink gegenüberstehen. Wasserstoff ist aber dem Zink in der galvanischen Spannungsreihe näher als der Kohlenstoff. Folglich würde die Spannung sinken. Diesen störenden Einflüssen wirkt der Braunstein entgegen. Er gibt Sauerstoff ab, der sich mit Wasserstoff wieder zu Wasser verbindet. So wird der Wasserstoff am Kohlestab beseitigt und die Feuchtigkeit im Element erhalten. Während der Stromlieferung geht der Zinkbecher allmählich in Lösung, so daß sich das Element mit der Zeit verbraucht.

5. Die elektrolytische Korrosion. Bei einer verzinnten Konservendose kann man an den Stellen, an denen die Zinnschicht beschädigt ist, mitunter Löcher feststellen. Diese Erscheinung ist auf eine elektrolytische Zersetzung zurückzuführen, da die beiden Metalle, wenn sie beide in einer Flüssigkeit stehen, ein galvanisches Element bilden. So wie bei diesem Beispiel können galvanische Elemente bei Konstruktionen aus verschiedenen Metallen als unerwünschte Begleiterscheinungen auftreten und Schäden anrichten. So führen zum Beispiel in Wasserleitungen und Kühlwasserräumen von Verbrennungsmotoren elektrolytische Vorgänge zur Zersetzung der Materialien. Wenn in eine eiserne Wasserleitung ein Messinghahn eingesetzt ist, bildet sich ein galvanisches Element. Auch in einem Verbrennungsmotor entsteht unter bestimmten Bedingungen zwischen dem gußeisernen Zylinderblock und der stählernen Zylinderlaufbuchse eine elektrische Spannung. Durch die Berührung der

Metallteile sind diese Elemente praktisch kurzgeschlossen, so daß trotz geringer Spannungen eine verhältnismäßig starker Strom fließt. Wenn eine Elektrolyt vorhanden ist, treten infolge dieses Stromes elektrolytische Zersetzungen des Stoffes auf, der in der Spannungsreihe weiter rechts steht, da dieser in Lösung geht. Diese sind in den genannten Beispielen das Eisenrohr und die stählerne Laufbuchse. Besonders auf Schiffen, bei denen salzhaltiges Seewasser zur Kühlung verwendet wird, können nach kurzer Zeit starke Zerstörungen des Materials auftreten, die man als *elektrolytische Korrosion* bezeichnet.

Um die Korrosion zu verhindern, werden die gefährdeten Leitungen oder Kühlräume von Zeit zu Zeit mit einem Schutzöl durchspült. Auf den Metalloberflächen bildet sich dann ein dünner Ölschutzfilm. Die Korrosion wichtiger Maschinenteile kann auch dadurch verhindert werden, daß man an gefährdeten Stellen Zinkschutzstücke einsetzt, zum Beispiel dicke Zinkschrauben oder kurze Stücke aus Zink. Das Zink ist in diesem Fall das unedlere Material und wird zuerst aufgelöst. Die Zinkschutzstücke müssen häufig gegen neue ausgewechselt werden.

In den Dampfkesseln, die aus hochwertigen legierten Stählen hergestellt sind, besteht noch eine andere Gefahr. Im Kristallgefüge des Stahls liegen Kristallkomplexe aus unterschiedlichen Stoffen mikroskopisch dicht nebeneinander. Mit dem Kesselwasser als Elektrolyten bilden sich hier winzig kleine galvanische Elemente, die man als *Lokalelemente* bezeichnet. So tritt hier im mikroskopischen Maßstab elektrolytische Korrosion auf, bei der Eisenionen in Lösung gehen. Diese Korrosion kann auf die Dauer einen erheblichen Umfang annehmen, so daß die ganze Kesselwandung zerstört wird. Als Schutzmaßnahme setzt man dem Kesselspeisewasser Trinatriumphosphat zu. Dadurch überzieht sich das Kesselinnere mit einer dünnen, schwarzen Eisenphosphatschicht, so daß das Wasser einen anderen einheitlichen Stoff berührt. Diese Lokalelementbildung spielt bei allen Metallegierungen, die der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind, ebenfalls eine unerwünschte Rolle. Man verhindert diese Vorgänge durch einen Oberflächenschutz mit Hilfe eines Farbanstrichs oder einer anderen Oberflächenbehandlung. Diesem Zweck dient beispielsweise beim Aluminium das Eloxal-Verfahren (vgl. S. 12).

Wenn Bauteile aus zwei verschiedenen Metallen von Wasser berührt werden, auch im Kristallgefüge legierter Stähle, bilden sich kurzgeschlossene galvanische Elemente. Die dadurch entstehenden Ströme bewirken die elektrolytische Korrosion des unedleren Metalls.

6. Die Umwandlung von latenter chemischer Energie in elektrische Energie. Die elektrische Spannung in den galvanischen Elementen hat ihre Ursache in der chemischen Beschaffenheit der Bestandteile. Während bei der Elektrolyse der elektrische Strom chemische Wirkungen verursacht, entsteht umgekehrt in den galvanischen Elementen aus chemischen Umsetzungen eine elektrische Spannung. Die chemische Energie ist in den Stoffen, aus denen das Element zusammengesetzt ist, in einer äußerlich nicht wahrnehmbaren, man sagt, in einer *latenten Form* vorhanden. Man kann die latente chemische Energie in den galvanischen Elementen mit der Lageenergie eines Körpers vergleichen. Dann entspricht der Umwandlung der latenten chemischen Energie in elektrische Energie die Umwandlung von Lageenergie in Bewegungsenergie. Ein Stein, der auf einem Tisch liegt, besitzt in bezug auf die Tischplatte keine Lageenergie, die sich in Bewegungsenergie umwandeln könnte.

So zeigt auch eine Kupferplatte gegenüber einer anderen Kupferplatte in einem Elektrolyten keine latente chemische Energie, die sich in elektrische Energie umsetzen könnte. Der Stein auf dem Tisch besitzt aber bezüglich des Fußbodens eine bestimmte Energie der Lage, die sich beim Herabfallen des Steines in Bewegungsenergie umwandelt. Ähnlich wird durch chemische Vorgänge eine Kupferplatte gegenüber einer andersartigen, beispielsweise einer Zinkplatte, in einem Elektrolyten elektrisch geladen. Es besteht eine Spannung zwischen den beiden Platten, und es kann, wenn der Stromkreis geschlossen wird, elektrische Arbeit verrichtet werden.

Wie für alle Energieumwandlungen gilt der **Satz von der Erhaltung der Energie** auch für die Umwandlungen zwischen elektrischer und chemischer Energie. *Die Summe aller Energien vor der Umwandlung ist gleich der Summe aller Energien nach der Umwandlung.*

Bei der Elektrolyse wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt; dabei werden durch den elektrischen Strom chemische Verbindungen verändert. Umgekehrt wandeln die galvanischen Elemente chemische Energie in elektrische Energie um. Zwischen Stoffen der elektrochemischen Spannungsreihe, die von einem Elektrolyten umgeben sind, tritt eine elektrische Spannung auf.

7. Die physikalischen Grundlagen des Akkumulators. Die galvanischen Elemente haben den Nachteil, daß sie durch die Zersetzung einer ihrer Elektroden nach einer gewissen Zeit verbraucht sind und nicht mehr verwendet werden können. Dies wäre nur dann möglich, wenn die verbrauchten Elektroden durch neue ersetzt werden können. Das ist aber, beispielsweise bei den Taschenlampenbatterien, meistens praktisch nicht durchführbar.

Es gibt aber auch chemische Spannungsquellen, die diesen Nachteil nicht haben. Zwei Bleiplatten werden als Elektroden in verdünnte Schwefelsäure gestellt. Während die eine Platte aus reinem Blei besteht, enthält die andere an ihrer Oberfläche Bleidioxyd. Ein Voltmeter zeigt eine Spannung von etwa 2 V zwischen den Platten an. Die Bleiplatte ist der Minuspol, die Bleioxydplatte der Pluspol. Schließt man eine Kleinspannungsglühlampe an, so kann man dem Element einen Strom entnehmen. Nach einer gewissen Zeit geht der Spannungsunterschied zwischen den Polen zurück. Die Polplatten haben sich an ihrer Oberfläche durch chemische Reaktionen mit der Schwefelsäure und dem Wasser in Bleisulfat ($PbSO_4$) verwandelt. Sie sind chemisch gleichartig.

Läßt man nun, statt einen Strom zu entnehmen, einen Strom durch das Element fließen, so wird nach einiger Zeit der ursprüngliche Zustand der Platten, Blei und Bleidioxyd, wieder hergestellt. Nach Abklemmen der angelegten Spannungsquellen kann man das Element selbst als Spannungsquelle benutzen.

Eine solche elektrochemische Anordnung, in der elektrische Energie gesammelt wird, nennt man *Sammler* oder *Akkumulator*. In einem Sammler werden durch die Elektrolyse zwei gleichartige Elektroden zu zwei chemisch verschiedenen Polplatten eines galvanischen Elements. *Elektrische Energie wandelt sich in chemische Energie um.* Dieser erste Schritt stellt den *Ladevorgang* dar. *Die elektrische Energie wird gespeichert.*

Beim zweiten Schritt erfolgt die *Entladung. Die latente chemische Energie verwandelt sich wieder in elektrische Energie.* Nach der Entladung des Sammlers hat sich wieder die anfänglich stofflich gleichartige Beschaffenheit der Elektroden eingestellt; der Akkumulator muß abermals aufgeladen werden und ist dann erneut als Spannungs-

quelle verwendbar. Bei sorgfältiger Behandlung kann er viele Jahre hindurch geladen und entladen werden. Darin besteht der große Vorteil der Akkumulatoren gegenüber den galvanischen Elementen.

Akkumulatoren sind Spannungsquellen, in denen elektrische Energie durch Umwandlung in chemische Energie gespeichert wird. Durch Elektrolyse werden zwei chemisch gleichartige Elektroden in zwei verschiedene Polplatten eines galvanischen Elements verwandelt. Liefert der Akkumulator einen Strom, so spielt sich der umgekehrte Vorgang ab.

8. Die Bleiakkumulatoren. Die gebräuchlichsten *Bleiakkumulatoren* bestehen aus einem säurefesten Gefäß aus Glas oder einem Plast, in dem sich verdünnte Schwefelsäure befindet (Abb. **18**/1). In die Säure sind zwei Plattengruppen eingetaucht, die ineinander greifen. Die einzelnen Platten einer Gruppe sind durch Polbrücken miteinander verbunden. Durch diese Anordnung der Platten kann man eine große Plattenoberfläche auf kleinem Raum unterbringen. Je größer die elektrochemisch wirksame Oberfläche der Platten ist, desto mehr elektrische Energie kann gespeichert werden, und desto länger kann der Strom bis zu einer bestimmten Höchststromstärke entnommen werden. Die Platten bestehen aus Bleigittern, in deren Feldern sich im entladenen Zustand eine Bleisulfatmasse befindet. Bei neuen Akkumulatoren ist nur ein Gitter mit $PbSO_4$, das andere mit PbO_2 ausgefüllt. Zur Vergrößerung der Oberfläche, die von der Flüssigkeit berührt wird, ist die eingefüllte Masse porös.

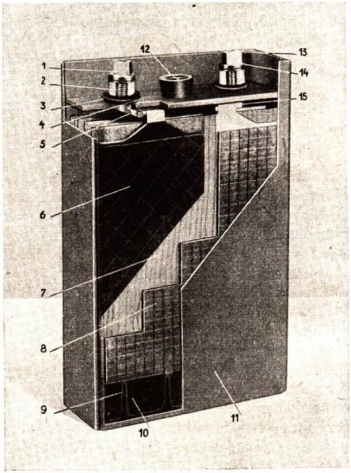


Abb. **18**/1. Akkumulatorzelle

1 Positive Polschraube, 2 Gewindebuchse, 3 Polring, 4 Zellendeckel, 5 Positive Polbrücke, 6 Positive Platte, 7 Mikroscheider, 8 Negative Platte, 9 Bodenprismen, 10 Bodenschlammraum, 11 Zellengefäß, 12 Gummistopfen, 13 Negative Polschraube, 14 Unterlegscheibe, 15 Negative Polbrücke

9. Die Wartung von Bleiakkumulatoren. Bleiakkumulatoren müssen, wie alle technischen Geräte, sorgfältig gepflegt werden, damit sie lange gebrauchsfähig bleiben. Zum Laden des Akkumulators darf nur Gleichstrom benutzt werden. Man entnimmt ihn einem besonderen Ladegerät, das im wesentlichen aus einem Transformator und einem Gleichrichter besteht und an das örtliche Wechselstromnetz angeschlossen wird. Die positiven Platten des Akkumulators müssen am Pluspol des Ladegeräts und die negativen Platten am Minuspol liegen (Abb. **19**/1). Die *Ladestromstärke* wird mit einem Amperemeter überwacht. Sie ist für jeden Akkumulator

entsprechend seiner Plattengröße festgelegt und kann sehr verschiedene Werte annehmen. Zu starke Lade- bzw. Entladestromstärken müssen vermieden werden, da sonst die Platten beschädigt werden; es lösen sich kleine Teilchen aus der porösen Masse heraus.

Die Bleisulfatmasse der positiven Platten verwandelt sich beim Laden in Bleidioxyd, das eine braune Farbe hat, die Bleisulfatmasse der negativen Platten in reines Blei mit einer silbergrauen Farbe. Der Säurerest SO_4 aus dem Bleisulfat beider Plattenarten verbindet sich beim Laden mit dem Wasserstoff aus dem Wasser zu Schwefelsäure, so daß die Konzentration der Säure steigt. *Die Dichte der Säure ist somit ein Maß für den Ladungszustand des Akkumulators.* Sie kann mit einem *Aräometer*, auch *Säureprüfer* (Abb. **19**/2) genannt, gemessen werden:

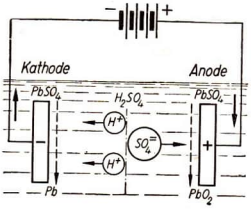


Abb. **19**/1
Laden eines Akkumulators

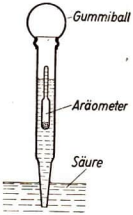


Abb. **19**/2
Säureprüfer

Dichte der Säure: im geladenen Akkumulator etwa 1,24 bis 1,25 g · cm^{-3};
im entladenen Akkumulator etwa 1,17 bis 1,18 g · cm^{-3}.

Gegen Ende des Ladevorganges setzt eine starke Entwicklung von Wasserstoff und Sauerstoff an den Platten ein. Es bildet sich Knallgas. Daher besteht in Akkumulatoren-Ladestationen Explosionsgefahr. *Der Gebrauch von Feuer und offenem Licht ist hier streng verboten.*

Der Akkumulator ist geladen, wenn die chemische Umwandlung der Platten beendet ist. Dies stellt man durch eine Spannungsmessung fest. Die Spannung einer frisch geladenen Akkumulatorenzelle beträgt etwa 2,4 V. Beim Entladen hält die Zelle längere Zeit eine Spannung von 2 V. Dann fällt diese merklich ab. Ist sie auf 1,8 V gesunken, so muß der Akkumulator neu geladen werden. Beide Platten gehen bei der Entladung wieder in Bleisulfat über (Abb. **19**/3). Dabei sinkt die Konzentration der Schwefelsäure. Nichtbenutzte Bleiakkumulatoren müssen etwa monatlich nachgeladen werden, weil auch während der Betriebsruhe eine Rückverwandlung der Platten von Blei zu Bleisulfat erfolgt, das sich allmählich aus dem Plattengerüst herauslöst und als Schlamm absetzt.

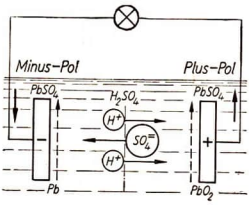


Abb. **19**/3
Entladen eines Akkumulators

Da ein Teil des gebildeten Wasserstoffs und Sauerstoffs entweicht, sinkt der Flüssigkeitsspiegel allmählich. Außerdem steigt dadurch die Konzentration der Säure an. Von Zeit zu Zeit muß daher destilliertes Wasser nachgefüllt werden.

Die Bleiakkumulatoren sind sehr empfindlich. Ihre Platten können durch mechanische Erschütterungen leicht zerfallen.

10. Stahlakkumulatoren. Wesentlich unempfindlicher als Bleiakkumulatoren gegenüber mechanischen und elektrischen Beanspruchungen sind dagegen die *Stahlakkumulatoren* (Abbildung **20**/1). Sie werden daher beispielsweise bei Eisenbahnwagen verwendet. Bei Stahlakkumulatoren laufen die chemischen Umsetzungen zwischen Nickel- und Cadmiumverbindungen oder zwischen Nickel- und Eisenverbindungen ab. Der Elektrolyt ist Kalilauge. Das Gehäuse und die Plattengerüste, welche die aktiven Verbindungen aufnehmen, sind aus Stahlblech hergestellt. Die Höchstspannung einer Zelle liegt mit 1,85 V etwas niedriger als beim Bleiakkumulator. *Man darf nicht versehentlich Schwefelsäure in einen Stahlakkumulator füllen.* Dies würde zu einer Zerstörung des Akkumulators führen.

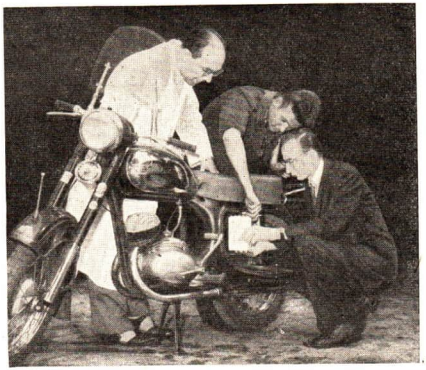


Abb. **20**/1. Stahlakkumulator eines Motorrades

11. Die technischen Daten eines Akkumulators. Wie groß die Elektrizitätsmenge ist, die ein Akkumulator speichern kann, hängt von der Menge der chemisch umwandelbaren Stoffe in den Plattengerüsten ab. Die vom Akkumulator aufgenommene Elektrizitätsmenge kann jedoch nicht völlig wieder von ihm abgegeben werden. Wasserstoff und Sauerstoff entweichen; der Akkumulator erwärmt sich. Von großer Bedeutung ist die Kenntnis der Elektrizitätsmenge, die von dem Akkumulator wieder abgegeben werden kann. Man spricht in diesem Zusammenhang von der *Kapazität eines Akkumulators.* Die Kapazität ergibt sich einerseits aus der Stromstärke, die dem Akkumulator entnommen wird, und zum anderen aus der Zeit der Stromentnahme. Die Einheit der Kapazität ist daher die **Amperestunde** (Ah). Die Kapazität von Akkumulatoren beträgt beispielsweise 12 Ah oder 27 Ah.

Gewöhnlich wird ein Akkumulator aber nicht in einem Zuge mit einer immer gleichbleibenden Stromstärke entladen. Man muß dann die den einzelnen Schritten entsprechenden Teilprodukte aus Stromstärke und Zeit addieren. Ein geladener Akkumulator mit einer Kapazität von 12 Ah wird zum Beispiel mit den folgenden Stromstärken entladen: 4 Stunden lang fließen 1,5 A (6 Ah), 0,5 Stunde lang wird er mit 2 A belastet (1 Ah), und nach 15 Stunden Entladung mit einer Stromstärke von 0,33 A (5 Ah) ist er entladen. Im ganzen hat der Sammler also 12 Ah abgegeben.

Bildet man den Quotienten aus der abgegebenen Elektrizitätsmenge und der aufgenommenen Elektrizitätsmenge, so erhält man den **Ah-Wirkungsgrad.** Bei genauer Einhaltung der Betriebsvorschriften ist der Ah-Wirkungsgrad ungefähr 0,9.

Mitunter ist auch das Verhältnis zwischen der aufgenommenen und der abgegebenen elektrischen Energie von Interesse. Wird eine Akkumulatorzelle bei einer Spannung von 2,5 V 20 Stunden lang mit 0,6 A geladen, so hat sie eine elektrische Energie von 30 Wh aufgenommen. Diese Zelle gibt nun beispielsweise 10 Stunden lang 1 A bei einer durchschnittlichen Spannung von 2 V ab. Das sind 20 Wh. Das Verhältnis von 20 Wh zu 30 Wh ist $\frac{2}{3}$. Man bezeichnet das Verhältnis von abgegebener Energie zur aufgenommenen Energie als **kWh-Wirkungsgrad**. Er liegt im allgemeinen zwischen 0,7 und 0,75. Die Ladungsmengen betragen 12 Ah beziehungsweise 10 Ah.

Die Energieverluste sind also größer als der Verlust an der Ladungsmenge. Das liegt daran, daß beim Laden und Entladen die bewegten Ionen elektrische Energie verlieren, die in Wärmeenergie übergeht. Das widerspricht nicht, sondern bestätigt nur wieder den *Satz von der Erhaltung der Energie*; denn die elektrische Energie hat sich in Wärmeenergie umgewandelt und ist keineswegs verschwunden.

12. Fragen und Aufgaben:

1. Zerlegen Sie eine verbrauchte Taschenlampenbatterie in ihre Bestandteile! Woran erkennt man, daß die Elemente verbraucht sind?
2. Stellen Sie aus Kohlestäben, Kupferdrähten, Blei und Zinkplatten unter Verwendung von verdünnter Schwefelsäure (20%) galvanische Elemente zusammen!
   a) Überprüfen Sie ihre Wirksamkeit mit einer Kleinspannungsglühlampe!
   b) Messen Sie die jeweiligen Spannungen mit einem Voltmeter! (Man kann auch ein selbstgebautes Galvanometer benutzen!)
   c) Stellen Sie die jeweilige Stromrichtung und damit die Polarität der Elemente fest! Wie ist das mit einfachsten Mitteln möglich?
   d) Lassen Sie kurzgeschlossene Elemente längere Zeit stehen, um feststellen zu können, welche Polplatte sich allmählich auflöst. Wie nennt man diese Zersetzungsvorgänge?
   e) Vergleichen Sie die Versuchsergebnisse mit der elektrochemischen Spannungsreihe!
3. Ein Akkumulator hat eine Ladekapazität von 27 Ah.
   a) Wie lange muß er geladen werden, wenn ein durchschnittlicher Ladestrom von 1,2 A fließt?
   b) Wie lange kann der geladene Akkumulator einen Strom von $\frac{1}{2}$ A liefern, wenn sein Ah-Wirkungsgrad 0,9 beträgt?
4. Welche elektrische Energie mußte einer Akkumulatorenzelle erst zugeführt werden, wenn sie bei einer durchschnittlichen Entladungsspannung von 2 V 9 h lang 3 A abgibt? Ihr kWh-Wirkungsgrad beträgt 0,7.

4. Die elektrischen Batterien

1. Der Aufbau elektrischer Batterien. Eine *Taschenlampenbatterie* besteht nicht nur aus einem Kohle-Zink-Element, sondern aus mehreren derartigen Elementen (Abb. 22/1). In der Flachbatterie sind drei Elemente nebeneinander, in der Stabbatterie zwei Elemente übereinander angeordnet. Auch aus Akkumulatorenzellen werden Batterien zusammengestellt. Mit Hilfe solcher Zusammenstellungen von Elementen oder Zellen kann man höhere Spannungen beziehungsweise größere Stromstärken erreichen als mit Einzelelementen beziehungsweise -zellen. Je nachdem, ob man die Spannungen erhöhen, die Stromstärke vergrößern oder beides erreichen will, muß man die Elemente in verschiedener Weise zusammenschalten.

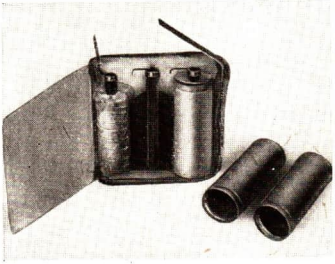


Abb. 22/1. Zerlegte Taschenlampenbatterie

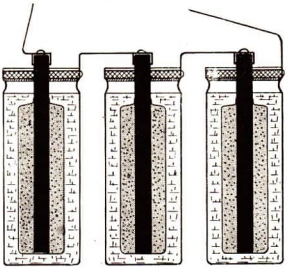


Abb. 22/2. Schematische Darstellung der Taschenlampenbatterie

Um höhere Spannungen zu erhalten oder auch größere Stromstärken entnehmen zu können, werden mehrere Elemente oder Zellen zu einer Batterie zusammengeschlossen.

2. Die Hintereinanderschaltung. In den flachen Taschenlampenbatterein sind die drei Kohle-Zink-Elemente so zusammengeschaltet, daß der Kohlestab des einen Elements mit dem Zinkbecher des nächsten verbunden ist usw. (Abb. 22/2). Während die einzelnen Elemente eine Spannung von 1,5 V haben, ist die Gesamtspannung der Batterie 4,5 V (Abb. 22/3). Bekanntlich addieren sich bei der Hintereinander- oder Reihenschaltung die Einzelspannungen zu der Gesamtspannung der Batterie. Da sich der Strom nicht verzweigt, kann man jedoch nur dieselbe Stromstärke wie bei einem Element entnehmen.

Diese Gesetzmäßigkeit entspricht völlig derjenigen bei der Hintereinanderschaltung von Widerständen. Da jede Spannungsquelle einen inneren Widerstand hat, kann man auch die Gesamtspannung wie bei der Hintereinanderschaltung von Widerständen berechnen:

$$U_{ges.} = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n \; (I = \text{konst.}).$$

Abb. 22/3. Hintereinanderschaltung von Elementen

Abb. 22/4. 12 V-Akkumulatorenbatterie, hergestellt im VEB Berliner Akkumulatoren- und Elementefabrik

Bei einer *Akkumulatorenbatterie* sind die in Reihe geschalteten Zellen durch Bleibrücken miteinander verbunden (Abb. 22/4). Diese liegen über der Vergußmasse und verbinden immer den Pluspol der einen mit dem Minuspol der nächsten Zelle. Die Reihenschaltung von 6 Bleiakkumulatorenzellen ergibt eine Gesamtspannung der Batterie von 12 V.

3. Die Parallelschaltung. Man kann mehrere Elemente oder Akkumulatorenzellen gleicher Spannung parallelschalten, indem man die Pluspole und die Minuspole untereinander verbindet (Abb. 23/1). 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. Auch hier liegt wieder eine Übereinstimmung mit den Gesetzmäßigkeiten bei der Parallelschaltung von Widerständen vor.

$$I_{ges.} = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n$$
$$(U = \text{konst.}).$$

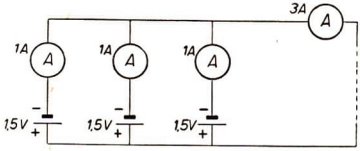


Abb. 23/1. Parallelschaltung von Elementen

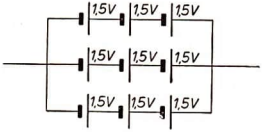


Abb. 23/2. Gruppenschaltung von Elementen

4. Die Gruppenschaltung. In großen Batterien sind *mehrere Gruppen von in Reihe geschalteten Elementen oder Zellen parallelgeschaltet.* Bei einer *Gruppenschaltung* erhält man sowohl höhere Spannungen als auch höhere Stromstärken, als sie die Einzelzelle beziehungsweise das Einzelelement liefert (Abb. 23/2).

5. Die Verwendung der Akkumulatorenbatterien. Bei einer Gruppe von *Fahrzeugen* wird die Energie für den Antrieb Akkumulatorenbatterien entnommen. Auf großen Bahnhöfen werden Pakete und Gepäckstücke durch Elektrokarren befördert. Die Abbildung 23/3 zeigt eine elektrische Grubenlokomotive mit Akkumulatoren als Energiequelle. Diese Fahrzeuge

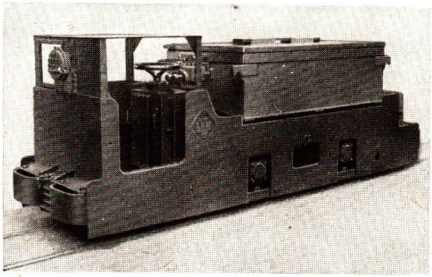


Abb. 23/3
Elektrische Grubenlok

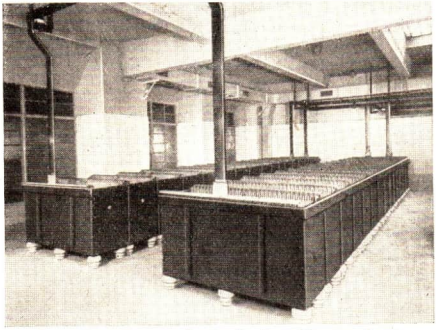


Abb. 24/1. Akkumulatoren-Station in einem Fernsprechamt

haben entweder auswechselbare Batterien, von denen sich eine immer in der Ladestation befindet, oder ihre Batterien werden nachts bei Betriebsruhe aufgeladen.

Für *Fernsprech-* und *Uhrenanlagen* wird die Betriebsspannung ebenfalls meist Akkumulatorenbatterien entnommen, damit bei Unterbrechung des Versorgungsnetzes keine Störungen auftreten. Die Batterien sind über Gleichrichter an das Netz angeschlossen und werden automatisch immer wieder aufgeladen (Abb. 24/1).

Auch überall dort, wo bei Ausfall des elektrischen Versorgungsnetzes sofort elektrische Energie benötigt wird, benutzt man Akkumulatorenbatterien. In Kinos, Theatern und Krankenhäusern speisen leistungsfähige Batterien die *Notbeleuchtung*. Oft sind automatische Schalter eingebaut, die den Notstromkreis sofort einschalten, wenn die Netzspannung ausfällt. Dadurch vermeidet man Betriebsstörungen und Unfälle.

6. Die Batterie des Kraftfahrzeugs. Alle Kraftfahrzeuge, die von Verbrennungsmotoren angetrieben werden, sind mit zwei Spannungsquellen ausgerüstet. Während

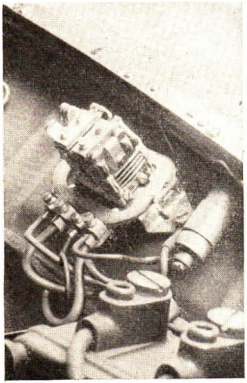
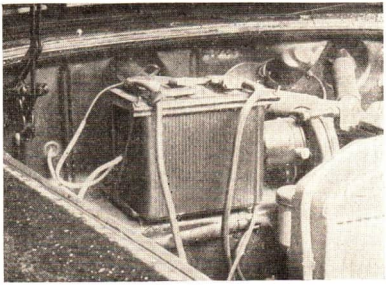


Abb. 24/2. Reglerschalter

Abb. 24/3
Akkumulatoren-Batterie in einem PKW „Wartburg“



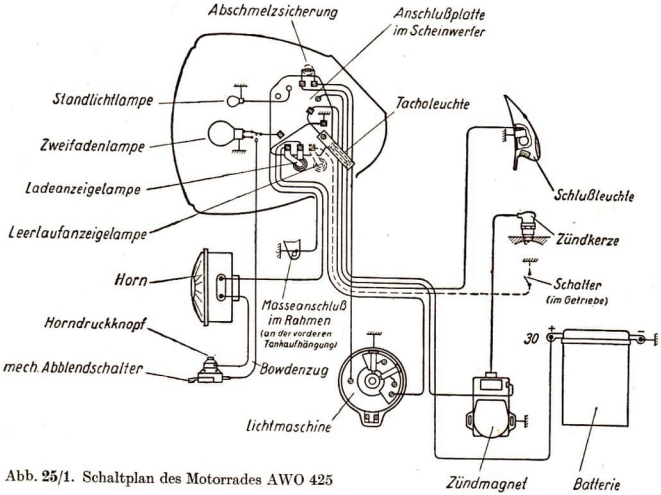


Abb. 25/1. Schaltplan des Motorrades AWO 425

der Fahrt werden die zahlreichen elektrischen Einrichtungen des Kraftfahrzeugs von einem kleinen Gleichstromgenerator, der *Lichtmaschine*, versorgt. Wenn aber der Motor des Fahrzeugs nicht in Betrieb ist, werden die entsprechenden Ströme, insbesondere der Strom für den Anlasser, einer Akkumulatorenbatterie entnommen (Abbildung 24/3). Die beiden Spannungsquellen sind über einen *Reglerschalter* mit dem Leitungsnetz des Fahrzeugs verbunden (Abb. 24/2).

Bei stehendem Motor ist die Batterie an das Leitungsnetz des Fahrzeugs angeschlossen. Läuft der Motor an, so steigt die Spannung der Lichtmaschine. Sobald diese höher ist als die Spannung der Batterie, schaltet der Reglerschalter die Lichtmaschine parallel zur Batterie an das Leitungsnetz. Dadurch wird

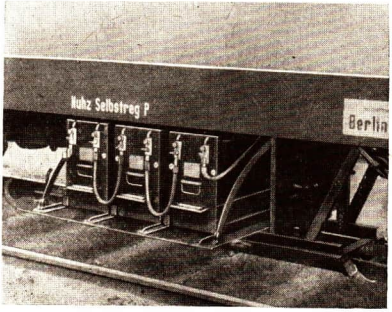


Abb. 25/2. Akkumulatorenbatterie an einem Personenwagen der Deutschen Reichsbahn

die Batterie von der Lichtmaschine aufgeladen und gleichzeitig das Netz gespeist. Der Reglerschalter ist so konstruiert, daß er bei höheren Drehzahlen des Motors die Spannung der Lichtmaschine auf einem konstanten Wert hält. Dadurch bekommen die elektrischen Einrichtungen des Fahrzeugs keine Überspannungen und die Batterie keinen zu großen Ladestrom. Sinkt die Drehzahl des Motors so weit ab, daß die Spannung der Lichtmaschine unter der Spannung der Batterie liegt, so schaltet der Reglerschalter die Lichtmaschine ab, damit sich die Batterie nicht über die Lichtmaschine entladen kann.

Im Versorgungsnetz des Fahrzeugs spart man eine Leitung zu den Verbrauchern dadurch ein, daß man den Strom über das Metallgestell des Fahrzeugs zur Spannungsquelle zurückleitet. Man sagt auch: die Rückleitung wird „*an Masse*" gelegt (Abbildung 25/1 und 26/1).

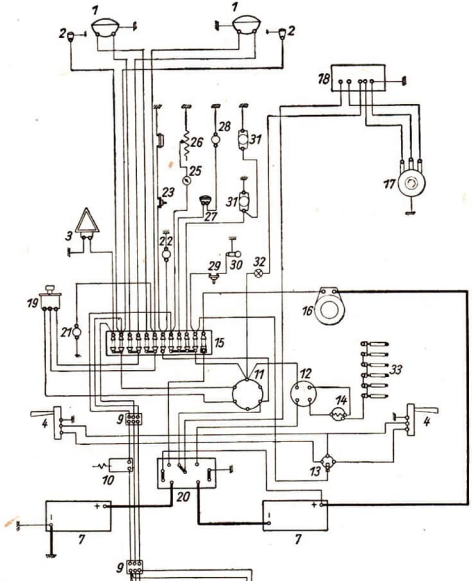


Abb. 26/1
Prinzipschaltbild der elektrischen Anlage des LKWs Horch H 6

1 Scheinwerfer links und rechts
2 Begrenzungsleuchte links und rechts
3 Dreieckzeichen
4 Fahrtrichtungsanzeiger
5 Brems-, Schluß- und Kennzeichenleuchte
6 Brems-Schluß-Leuchte
7 Bleisammler (Batterie)
8 Steckdose für Anhänger
9 Kabelplatte
10 Bremslichtschalter
11 Schaltkasten
12 Glühanlaßschalter
13 Schalter für Fahrtrichtungsanzeiger mit Kontroll-Leuchte
14 Glühüberwacher
15 Sicherungsdosen
16 Anlasser
17 Lichtmaschine
18 Reglerschalter
19 Fußabblendschalter
20 Anlaßumschalter
21 Anzeigeleuchte für Fernlicht
22 Steckdose für Handleuchte
23 Schalter für Deckenleuchte
24 Deckenleuchte
25 Kraftstoffanzeiger
26 Schwimmer für Kraftstoffanzeiger
27 Signalhorn
28 Druckknopf für Signalhorn
29 Schalter für Instrumenten-Beleuchtung
30 Instrumenten-Beleuchtung
31 Scheibenwischer
32 Ladekontroll-Leuchte
33 Glühkerzen

Die Betriebsspannungen von Batterien für verschiedene Fahrzeugarten sind genormt und betragen:

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

Ähnlich wie bei Kraftfahrzeugen wird das Netz der Personenwagen der Deutschen Reichsbahn von einem Akkumulator und einer Lichtmaschine versorgt (Abb. 25/2).

7. Fragen und Aufgaben:

1. Für einen batteriegespeisten Rundfunkempfänger wird eine sogenannte Anodenspannung von 90 V benötigt. Wieviel Kohle-Zink-Elemente müssen in der zugehörigen Anodenbatterie hintereinandergeschaltet sein?
2. Die Abb. 27/1 stellt eine Gruppenschaltung von Bleiakkumulatorzellen dar.
   a) Ermitteln Sie die Gesamtspannung der Batterie!
   b) Welche Stärke hat der jeweils durch eine Zelle fließende Strom?
3. Entwerfen Sie in Anlehnung an Abb. 26/1 das grundsätzliche Schaltbild der elektrischen Anlage eines Personenwagens der Deutschen Reichsbahn!

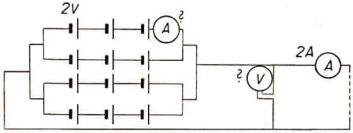


Abb. 27/1. Aufgabenskizze zur Gruppenschaltung

5. Das elektrische Feld

1. Die Trennung elektrischer Ladungen. Die *Ladungsmenge*, die ein elektrischer Strom transportiert, hängt von der Stromstärke und der Zeit ab, in der der Strom fließt. Man hat festgelegt:

Ladung = Stromstärke · Zeit.

Die Einheit der Ladung ist das **Coulomb** (C). Es wird bestimmt durch die Gleichung

$$1\ \mathrm{C} = 1\ \mathrm{A} \cdot 1\ \mathrm{s} = 1\ \mathrm{As}.$$

Aus dem Physikunterricht im 8. Schuljahr ist bekannt, daß *elektrisch geladene Körper Kräfte aufeinander ausüben*. Gleichnamig elektrisch geladene Körper stoßen einander ab, während ungleichnamig geladene einander anziehen. Auf ursprünglich elektrisch neutralen Hartgummi- beziehungsweise Glasstäben können negative beziehungsweise positive Ladungen angehäuft werden, indem man die Stäbe mit einem Woll- beziehungsweise Lederlappen reibt. Die negativen Ladungen beruhen auf einem Überschuß an Elektronen. Positive Ladungen werden durch einen Mangel an Elektronen verursacht. Das Elektron hat bekanntlich die kleinste in der Natur vorkommende negative Ladung. Schon im Altertum war den Griechen bekannt, daß geriebene Bernsteinstücke andere leichte Körper anziehen. Die Ursachen dieser Kraftwirkungen wurden aber erst im 18. und 19. Jahrhundert näher erforscht.

Die Reibung ist bei diesem Vorgang nicht das Entscheidende, sondern die dadurch verursachte innige Berührung zwischen dem geriebenen Körper und dem Reibzeug.

Infolge dieser innigen Berührung längs einer großen Oberfläche gibt der Wollappen Elektronen an den Hartgummistab ab, so daß auf dem Lappen ein Elektronenmangel, also eine positive Ladung, und auf dem Stab ein Elektronenüberschuß, eine negative Ladung, entstehen. Die Aufladung eines geriebenen Körpers ist also ohne die entgegengesetzte Aufladung des Reibzeuges nicht möglich. Andererseits wissen wir auf Grund von Versuchen, daß Ladungen von einem geladenen Körper auf einen elektrisch neutralen Körper übertragen werden können.

Die von den elektrischen Ladungen ausgehenden Krafterscheinungen nennt man *elektrostatische Kräfte*. Sie treten in der Umgebung, das heißt im Raum um die elektrisch geladenen Körper, auf, ohne daß eine unmittelbare Verbindung zwischen den Körpern besteht. Die Versuche laufen auch im luftleeren Raum ebenso ab wie im lufterfüllten Raum.

2. Der Begriff des elektrischen Feldes. Die elektrostatischen Kräfte wirken in einem elektrischen Feld. Ebenso wie magnetische Kräfte in der Umgebung der Magnetpole wirksam sind, wirken auch elektrostatische Kräfte in der Umgebung elektrischer Ladungen. Dem magnetischen Feld zwischen zwei Magnetpolen entspricht das elektrische Feld zwischen zwei elektrischen Ladungen.

Elektrische Felder bilden sich um jeden elektrisch geladenen Körper. Sie bestehen auch im Vakuum.

Die elektrischen Felder sind unstofflich, weil sie sich nicht aus Stoffteilchen aufbauen, weil sie keine Körper verdrängen und nicht undurchdringlich sind. Trotzdem sind sie materiell, weil sie wirkliche Naturerscheinungen darstellen, die physikalisch nachweisbar und meßbar sind. Die Materie tritt also einerseits in Form der Stoffe, andererseits in Form der Felder auf. Die physikalische Forschung beweist immer wieder, daß alle Erscheinungen in der Natur materiell sind. Alle Naturvorgänge lassen sich nach erkennbaren Gesetzmäßigkeiten erklären.

Im Raum um eine elektrische Ladung befindet sich ein elektrisches Feld. In ihm wirken die elektrostatischen Kraftwirkungen, die von elektrischen Ladungen ausgehen. Das elektrische Feld ist eine Zustandsform der Materie.

3. Die Feldlinien eines elektrischen Feldes. Zwei isoliert aufgestellte Metallkörper stehen in einem Abstand von etwa 20 cm parallel einander gegenüber. Sie werden durch einen Bandgenerator entgegengesetzt aufgeladen (Abb. 29/1). Zwischen die Platten stellt man kleine Papierzeiger, die sich wie Magnetnadeln auf Nadelspitzen drehen können. Jeder Zeiger stellt sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes in einer bestimmten Richtung ein. Verschiebt man einen Zeiger in der von ihm angezeigten Richtung, so beschreibt man mit dem Zeiger eine die beiden Platten verbindende Linie. Man nennt sie eine *Feldlinie*. Auf die beschriebene Weise kann man viele Feldlinien ermitteln und so ein Bild von der Form des Feldes erhalten.

Die Zeiger geben in jedem Punkt des elektrischen Feldes die Richtung der wirkenden elektrostatischen Kraft an. Da in jedem Punkt eines Feldes die elektrostatische Kraft immer nur in einer ganz bestimmten Richtung wirken kann, *verläuft durch jeden Punkt nur eine Feldlinie*. Daraus folgt, daß sich Feldlinien niemals schneiden. Man hat festgelegt, daß *die Richtung der Feldlinien von den positiven zu den negativen Ladungen verläuft*.

Die mit den Papierzeigern dargestellten Feldlinien geben nur ein grobes Bild von der Form des Feldes. Durch jeden möglichen Punkt des elektrischen Feldes kann man sich eine Feldlinie denken. Die Feldlinien sind nicht zählbar und liegen unendlich dicht beieinander.

Das elektrische Feld zwischen den beiden Platten existiert so lange, wie die Platten geladen sind. Verbindet man die Platten jedoch durch einen elektrischen Leiter, so entladen sie sich, wobei für kurze Zeit ein elektrischer Strom fließt. Diese Entladung zeigt sich meist in einem Funken beim Schließen des Kontakts. Danach wirken keine elektrostatischen Kräfte mehr, da kein Feld mehr vorhanden ist, so daß man die Papierzeiger in beliebige Richtungen einstellen kann.

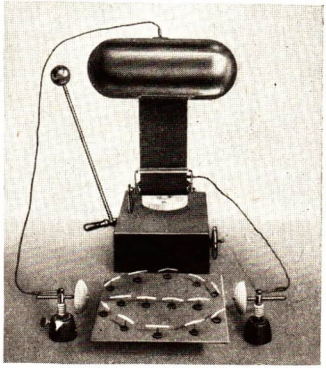


Abb. 29/1. Elektrisches Feld mit Papierzeigern

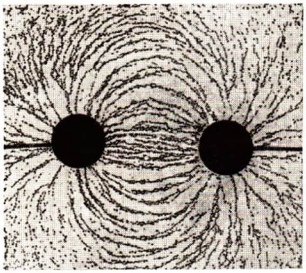
Bei Magnetfeldern kann man bekanntlich die Feldlinien durch Eisenfeilspäne veranschaulichen. Bei elektrischen Feldern erreicht man dies mit Hilfe von Grießkörnern. In Glycerin aufgeschwemmte Grießkörner richten sich unter dem Einfluß der elektrischen Kräfte im elektrischen Feld aus. Man kann daher zur Veranschaulichung des elektrischen Feldes aufzuladende Metallkörper in eine Glycerin-Grieß-Aufschwemmung setzen und so das Feldbild beobachten.

Auf die Glasplatte gestreute Sägespäne oder Pulver von kristallinischem Gips eignen sich ebenfalls zur Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien. Zu diesem Zweck schneidet man Modelle der zu untersuchenden Körper aus einer Metallfolie aus und klebt sie auf die Glasplatten. Ein solches Bild zeigt aber immer nur einen ebenen Schnitt durch das an sich räumliche Feld.

Elektrische Felder werden durch Feldlinien veranschaulicht. Die Feldlinien geben die Richtung an, in der die elektrostatischen Kräfte wirken. Die Feldlinien verlaufen von den positiven Ladungen zu den negativen.

4. Die Formen elektrischer Felder — Feldlinienbilder. Man legt zwei gleichgroße Metallstäbchen parallel zueinander in eine Glycerin-Grieß-Aufschwemmung. Diese Stäbchen entsprechen einem horizontalen Ebenenschnitt durch zwei parallele, senkrechtstehende Metallplatten. Bei entgegengesetzter Aufladung entsteht ein Feldlinienbild, wie es in Abbildung 29/2 wiedergegeben ist. Die Feldlinien verlaufen zwischen den Platten geradlinig und parallel zueinander. Ein Feld, dessen Feldlinien parallel zueinander verlaufen, wird als *homogenes Feld* bezeichnet.

Abb. 29/2. Homogenes Feld und nichthomogenes Feld



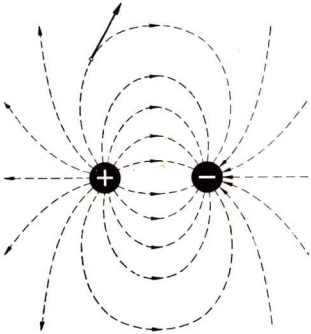
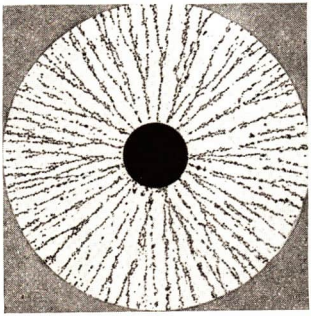


Abb. 30/1. Feldlinien zwischen ungleichartig geladenen Metallzylindern

Die Wirkung der von den Ladungen ausgehenden Kräfte beschränkt sich aber nicht auf den Raum zwischen den Platten. Auch außerhalb dieses Zwischenraumes erkennt man Feldlinien, die aber weder geradlinig noch parallel sind. Sie verlaufen bogenförmig von einer Platte zur anderen. Ein Feld, dessen Feldlinien nicht parallel zueinander verlaufen, wird *inhomogenes Feld* oder Streufeld genannt.

Man erkennt weiterhin, daß dort, wo im Streufeld die Feldlinien auseinanderlaufen, die Grießteilchen nicht so deutlich den Linienverlauf anzeigen. Die Kraftwirkungen sind hier anscheinend geringer. Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Feldlinien und der Stärke des Feldes. Auseinanderlaufende Feldlinien zeigen ein Schwächerwerden des Feldes in dieser Richtung an.



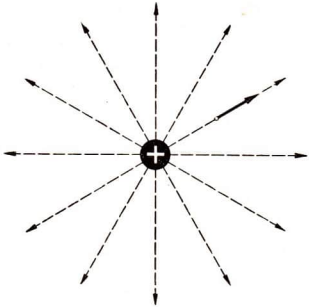
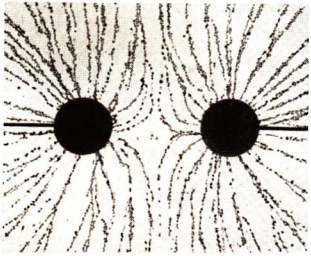


Abb. 30/2. Radiales Feld (Feldlinienbild einer Kreisscheibe)

Benutzt man als Träger entgegengesetzter Ladungen zwei kleine Metallzylinder, dann entsteht das in Abbildung **30**/1 wiedergegebene Feldlinienbild. Das gesamte Feld ist inhomogen. Man erkennt bei diesem Versuch außerdem, daß die Feldlinien immer senkrecht auf der Oberfläche der Ladungsträger stehen.

Das Feldlinienbild, wie es die Abbildung **30**/2 zeigt, ist durch einen elektrisch geladenen einzelnen Metallzylinder oder eine metallische Kreisscheibe entstanden. Es stellt gleichzeitig einen Schnitt durch das elektrische Feld eines einzelstehenden kugelförmigen Ladungsträger dar. Die Feldlinien stehen ebenfalls senkrecht auf der Kugeloberfläche. Denkt man sich die Feldlinien ins Innere des Ladungsträgers verlängert, so treffen die Verlängerungen wie Radien im Mittelpunkt zusammen. Man bezeichnet deshalb dieses Feld als *radiales Feld*. Hieran erkennt man, daß ein elektrisches Feld bereits um eine einzelne elektrische Ladung zu beobachten ist. Die Feldlinien laufen von dem geladenen Körper nach allen Seiten auseinander. Da sie auseinanderstreben, nimmt die Stärke des Feldes mit zunehmender Entfernung sehr schnell ab. Die Feldlinien enden aber auch bei diesem Feld in entgegengesetzten Ladungen, die sich jedoch oft in verhältnismäßig weiter Entfernung rings um den geladenen Körper befinden, beispielsweise an Wänden.



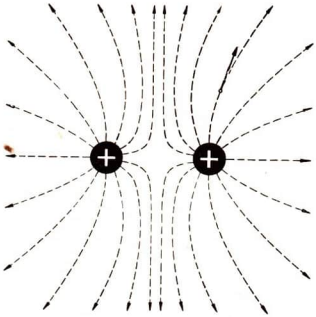


Abb. **31**/1. Feld zwischen gleichartig geladenen Kugeln

Das in der Abbildung **31**/1 gezeigte Feldlinienbild ist dadurch entstanden, daß zwei Metallscheiben gleichartig geladen wurden. Die abstoßende Wirkung der Kräfte bei gleichartigen Ladungen wird besonders im mittleren Teil des Feldes deutlich. Die zunächst von den beiden Ladungen her aufeinander zulaufenden Feldlinien biegen scharf voneinander ab und laufen in den umgebenden Raum hinaus.

Die Anzahl verschiedenartiger Feldlinienbilder läßt sich noch vermehren. Mit Hilfe von Metallfolien kann man den Modellen vielerlei Formen geben, die den in der Praxis vorkommenden Ladungsträgern entsprechen. Die Versuche zeigen, daß je nach der Form und der Anordnung elektrisch geladener Körper und je nach der Art der sich gegenüberstehenden Ladungen die Feldlinien unterschiedlichen Verlauf zeigen.

In einem homogenen Feld verlaufen die Feldlinien geradlinig und parallel zueinander. Ist das nicht der Fall, so liegt ein inhomogenes Feld vor.
Eine besondere Art des inhomogenen Feldes ist das radiale Feld, bei dem die Feldlinien strahlenförmig auseinanderlaufen.
Die elektrischen Feldlinien stehen immer senkrecht auf der Oberfläche des geladenen Körpers und gehen auf Grund einer genormten Festlegung von den positiven Ladungen aus. Dort, wo sie auseinanderstreben, wird das Feld schwächer. Sie enden an negativen Ladungen.

5. Vergleich elektrischer und magnetischer Felder. Die elektrischen Felder haben manche Ähnlichkeit mit den magnetischen, sie unterscheiden sich aber auch in wesentlichen Punkten von ihnen. Ein Vergleich ergibt folgende gemeinsame Merkmale. Alle Felder sind materielle Erscheinungen. In ihnen sind Anziehungs- beziehungsweise Abstoßungskräfte wirksam. Die in jedem Punkt eindeutigen Kraftrichtungen werden durch die Feldlinien veranschaulicht. Diese stellen die Form des Feldes bildlich dar.

Es bestehen aber auch grundsätzliche Unterschiede zwischen beiden Arten von Feldern. Die magnetischen Felder sind an magnetische Stoffe oder an die Wirkung elektrischer Ströme gebunden. Kraftwirkungen treten nur an magnetisierbaren Körpern oder zwischen zwei magnetischen Polen auf. *Die beiden verschiedenartigen Pole sind nicht voneinander zu trennen. Die magnetischen Feldlinien verlaufen als geschlossene Linien, und zwar außerhalb und innerhalb eines Magneten von Pol zu Pol.* Wird das Magnetfeld von einem elektrischen Strom hervorgerufen, so bilden die Feldlinien geschlossene Linien um die elektrischen Leiter. Im elektrischen Feld dagegen können die *beiden Pole voneinander getrennt werden.* Ein Körper kann nur positiv geladen sein, das heißt, er hat einen Mangel an Elektronen, ein anderer Körper ist nur negativ geladen, er hat einen Überschuß an Elektronen. Die elektrischen Felder bilden sich demnach zwischen verschiedenen Körpern aus.

Ihre Feldlinien verlaufen von einer Ladung zu einer ihr entgegengesetzten, *sie haben also im allgemeinen Anfang und Ende.* Stets stehen sie senkrecht auf der Oberfläche des geladenen Körpers.

6. Anwendungen der Wirkung elektrischer Felder.
a) Das Elektroskop. Auf Grund der elektrostatischen Kraftwirkung in elektrischen Feldern kann man Ladungen nachweisen und Spannungen messen. So kann man mit einem *elektrischen Doppelpendel* elektrische Ladungen nachweisen (Abb. 32/1). Je größer die Ladungen sind, um so weiter entfernen sich die Kugeln voneinander. Die nach diesem Prinzip gebauten Ladungszeiger nennt man *Elektroskope.* Das Feldlinienbild eines solchen Gerätes zeigt

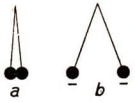


Abb. 32/1. Elektrisches Doppelpendel a) ungeladen, b) geladen

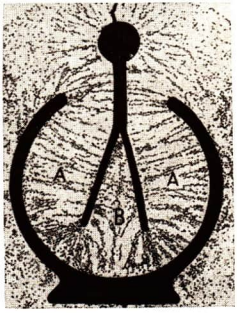


Abb. 32/2. Feldlinienbild eines Elektroskops

die Abbildung **32**/2. Das Feld ist inhomogen. Der Feldlinienverlauf im Bereich *B* zwischen den sich spreizenden Blättchen zeigt, daß sich gleichartige Ladungen abstoßen.

Empfindliche Elektroskope haben meist ein isoliert aufgestelltes Metallgehäuse in der Form eines beiderseits offenen Metallzylinders. Ein Metallstab ist isoliert von oben eingeführt. An ihm befindet sich gut drehbar ein dünner und leichter Metallzeiger. Beim Aufladen stoßen der Zeiger und der feste Stab einander ab, da sie gleichartig geladen sind. Gleitet das Ende des Zeigers über einer Skale entlang, so bezeichnet man das Gerät als *Elektrometer*. Soll die Ladung eines Körpers nachgewiesen werden, dann erdet man das Gehäuse und berührt den Stab mit dem geladenen Körper. Will man jedoch den Spannungszustand zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Körpern messen, so verbindet man den einen Körper mit dem Metallstab, den anderen mit dem Gehäuse. Der Meßbereich der *Braunschen Elektrometer* erstreckt sich etwa von 0,1 kV bis 10 kV. Spannungsunterschiede von weniger als 100 V kann man mit diesem Gerät nicht mehr genau ermitteln.

b) Die elektrische Gasreinigung. Durch die Fabrikschornsteine fliegen mit den Verbrennungsgasen große Mengen von Asche und Staub. Ein einziger Schornstein eines Großkraftwerkes stößt jährlich etwa 370000 t an Schmutzteilchen aus. Um die Bevölkerung und die heimische Landschaft vor diesem Staub zu schützen, mußte man Vorrichtungen schaffen, mit denen man die Abgase entstauben kann. Hierfür nutzt man elektrische Felder aus. Außer dem Staub kann man auch große Mengen an Rohstoffen aus den Gasen zurückgewinnen, die sonst für die weitere Verarbeitung verloren gehen. Die mit Staub und Asche verunreinigten Verbrennungsgase werden durch *Filterkammern* geleitet (Abb. **33**/1). In ihnen sind Drähte lotrecht ausgespannt, die elektrisch negativ geladen werden. Teilchen, die an ihnen vorbeifliegen, werden durch den Sprüheffekt aufgeladen, wie er auch am Bandgenerator auftritt. Deshalb nennt man diese Drähte auch *Sprühelektroden*. Von den positiv geladenen Kammer-

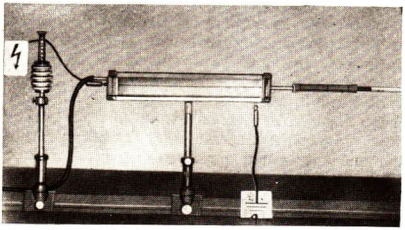


Abb. **33**/1. Filterkammer (Versuchsanordnung)

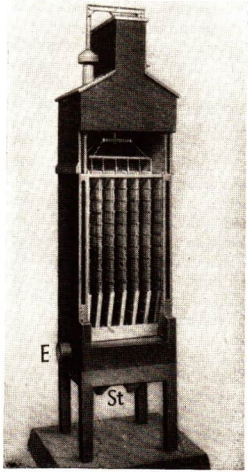
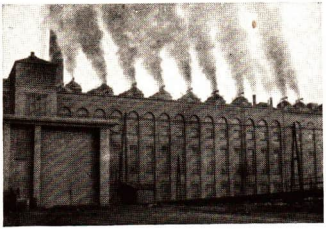
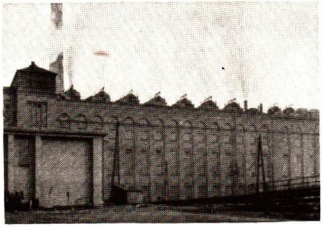


Abb. **33**/2. Modell eines Elektro-Filterschlotes
E Filtereingang, *St* Staubbunker



a) Filter ausgeschaltet



b) Filter eingeschaltet

Abb. 34/1. Wirkungsweise eines Filterschlotes

wänden werden nun die negativ geladenen Teilchen angezogen und entladen. Sie schlagen sich dort nieder und fallen in einen darunterliegenden Staub- und Aschebunker. Sind größere Mengen zu entstauben, so teilt man den Strom des staubhaltigen Gases durch lotrechte Wände, zwischen denen jeweils mehrere Sprühdrähte angeordnet sind. Eine solche Anordnung heißt *Elektro-Filterschlot* (Abb. **33**/2).

Die Abbildung **34**/1 veranschaulicht die Wirkung solcher Filterschlote in Brikettfabriken. Dort werden die Abgase der Mahl- und Trockenanlagen sowie die Brikettstempelpressen vom mitgeführten Kohlenstaub gereinigt. Elektrofilter werden auch in Zementfabriken und in den Röstanlagen der Schwefelfabriken benutzt. In den Abgasen der Rösten sind noch wertvolle Metalle enthalten. Mit den Elektrofiltern können 98% von ihnen zurückgewonnen werden.

7. Das Gewitter. Die Erscheinungen von Blitz und Donner haben die Menschheit von jeher stark beeindruckt. Die Menschen deuteten sie früher als drohende Äußerungen von Göttern oder von übernatürlichen Kräften.

Die Erforschung der Natur befreite die Menschen von Angst und Unsicherheit. Sie konnten sich nun auch die Gewittererscheinungen physikalisch erklären, so daß diese damit ihren übernatürlichen Anschein verloren. Mit der Erklärung des Gewitters wurden auch alle abergläubischen Vorstellungen über besondere Maßnahmen, die man bei Gewittern treffen sollte, bedeutungslos, beispielsweise das Schließen der Fenster und Anfassen von Gegenständen aus Metall.

Kleine *Blitze* kann man schon mit einem Bandgenerator erzeugen. Sie sind Entladungsvorgänge zwischen elektrisch geladenen Körpern, die unter hoher Spannung stehen. In Hochspannungslaboratorien können die Blitze Längen von mehr als einem Meter erreichen. An ihnen studiert man die Entladungserscheinungen. Man prüft auch in diesen Laboratorien die Güte von Isolatoren.

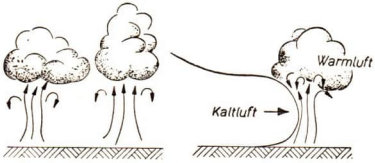
Die Gewitterblitze sind ähnliche *Entladungsvorgänge*, die sich aber nicht nur in Form einfacher Funken, sondern in Form eines verästelten Systems aufeinanderfolgender Entladungsstöße vollziehen (Abb. **35**/1). Im *Donner* nehmen wir das Geräusch wahr, das beim Aufeinanderprallen der vom Blitz durchschnittenen und erhitzten Luftmassen entsteht. Das lang anhaltende Rollen ist eine Folge der wiederholten Reflexion des Schalls.

Abb. **35/1**
Blitz. Man erkennt deutlich die vielfach verästelten Bahnen der Blitze.

Aus der Beobachtung, daß die Blitze von Wolke zu Wolke oder auch von einer Wolke zur Erde übergehen, muß man schließen, daß unterschiedliche elektrische Aufladungen der Wolken untereinander und gegenüber der Erde bestehen. Die Ladungstrennung hat folgende Ursachen: Die atmosphärische Luft enthält stets Wasser, das sich bei Abkühlung zu Tröpfchen als Nebel oder als Wolken kondensieren kann. Durch starke Luftströmungen werden die Tröpfchen auseinandergerissen. Dabei entstehen Teilchen mit negativer und solche mit positiver Ladung. Es kommt zu einer Ansammlung negativer beziehungsweise positiver Ladungen innerhalb von Wolkenteilen (vgl. Abb. **36/1**). Starke örtliche Bewegungen feuchter Luft können auf Grund der folgenden Vorgänge hervorgerufen werden (Abb. **35/2**).

Bei starker Sonneneinstrahlung werden der Erdboden und die darüber liegenden Luftschichten erwärmt. Die Luft steigt wirbelnd mit großer Geschwindigkeit oft bis einige Tausend Meter empor, wobei sie sich unter Ausscheidung von Wassertröpfchen abkühlt. Dadurch entstehen hochgetürmte, oben quellende weiße Wolken. Sie sind die Kennzeichen eines solchen *Wärmegewitters*.

Dagegen entstehen *Frontgewitter*, wenn kalte Luftmassen, die eine sogenannte Kaltfront bilden, in ein wärmeres Gebiet einbrechen. Die Kaltluft schiebt sich wie ein Keil unter die vorhandenen warmen und feuchteren Luftmassen und treibt sie hoch. Dabei kondensiert Wasser zu Tröpfchen. Bei der heftigen Bewegung der Luft- und Wolkenmassen kommt es wie bei Wärmegewittern ebenfalls zu elektrischer Aufladung von Wolkenteilen. Es entstehen auf diese Weise meist nicht so große Ladungen wie beim Wärmegewitter. Deshalb sind Frontgewitter meist von kurzer Dauer. Sie können unter Umständen auch im Winter entstehen.



a) Wärmegewitter b) Frontgewitter

Abb. **35/2**. Entstehung von Gewittern (stark vereinfacht)

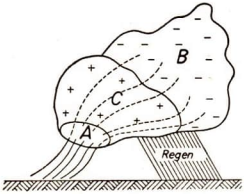


Abb. **36/1**. Schnitt durch eine Gewitterwolke

Die Abbildung **36/1** zeigt einen vertikalen Schnitt durch eine Gewitterwolke. Bei *A* strömt die feuchte Luft mit großer Geschwindigkeit ein. Im Raum *C* sammeln sich die positiv geladenen großen Tropfen, im Raum *B* die negativ geladenen kleinen Tropfen. Es entstehen auf diese Weise elektrische Felder. Zwischen den Wolkenteilen *B* und *C* ist das elektrische Feld am stärksten, weil hier die positiven und die negativen Ladungen dicht beieinanderliegen. Ein anderes elektrisches Feld entsteht zwischen dem unteren positiven Wolkenbereich und der gegenüber der Luft ständig negativ geladenen Erde.

Bei einem einzelnen Blitz treten Entladungsstromstärken von etwa 20000 A auf. Da aber die Dauer des Stromflusses sehr kurz ist, ungefähr $\frac{1}{1000}$ Sekunde (10^{-3} s), ist die Energie eines Blitzes nicht so groß, wie man auf Grund der hohen Stromstärke erwarten sollte. Ihre Größe liegt nur bei einigen tausend bis zehntausend Wattsekunden. Da außerdem die Gewitter am gleichen Ort immer nur zeitweilig auftreten, lohnt es sich nicht, Vorrichtungen zu konstruieren, mit deren Hilfe man aus den Blitzen nutzbare Energie gewinnen könnte.

Wegen der hohen Stromstärke und den dabei auftretenden hohen Temperaturen bedeutet die Blitzentladung eine Gefahr für die Menschen. Der Blitz kann einen Menschen töten und Gebäude in Brand setzen. Aber auf Grund der Kenntnisse über das Gewitter kann man diese Gefahren richtig abschätzen und ihnen erfolgreich begegnen. Gefährdet sind vor allem die Gegenstände, die sich aus der Erdoberfläche besonders herausheben, wie zum Beispiel einzelstehende Bäume. An die manchmal noch üblichen Bauernregeln, die gewisse Bäume als schützend vor dem Blitz empfehlen: „Die Buchen sollst du suchen“ usw. sollte man sich auf keinen Fall halten. Diese Bauernregeln gründen sich zwar auf gewisse, aber recht einseitige Beobachtungen. Je nach der Bodenfeuchtigkeit, nach der Verwurzelung und dem Säftegehalt eines Baumes ist natürlich die leitende Verbindung mit dem Erdboden bei den einzelnen Baumarten verschieden gut, davon hängt wiederum die Möglichkeit des Blitzeinschlages ab. Wenn auch in verschiedenem Grade, so sind doch aber alle Bäume, ganz besonders die frei stehenden, grundsätzlich blitzgefährdet. Auch sollte man bei Gewitter nie aufrecht auf einer ebenen Geländestrecke stehen und gehen.

Größere Gebäude werden mit *Blitzschutzeinrichtungen* versehen. Dabei werden

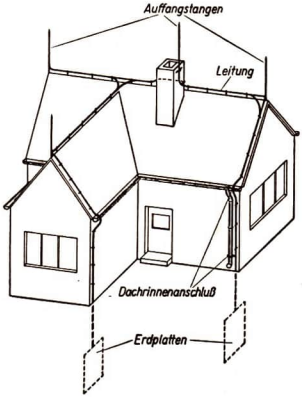


Abb. **36/2**. Blitzschutzanlage

verzinkte Eisenstäbe an den höchsten Stellen des Gebäudes angebracht. Sie sind leitend mit dem Grundwasserspiegel verbunden und leiten jede Entladung dorthin ab (Abb. **36**/2).

8. Das elektrische Feld der Erde. Das Gewitter ist nicht die einzige elektrische Erscheinung in der Atmosphäre. Es tritt nur als eine Störung des die ganze Erde umfassenden elektrischen Feldes auf. Wie jedes elektrische Feld bildet sich auch das elektrische Erdfeld zwischen zwei entgegengesetzten elektrischen Ladungen aus. Die negative Grenzfläche des elektrischen Feldes der Erde liegt an der Erdoberfläche, wobei alle Unebenheiten, besonders die hohen Bäume, Gebäude, aber auch schon einzelne Menschen im flachen, freien Gelände die Form des Feldes in ihrer Umgebung beeinflussen.

Eine Entladungserscheinung an der Grenzfläche ist beispielsweise das *Elmsfeuer* an den Masten von Seeschiffen. Heute zieht man keine abergläubischen Schlüsse mehr aus dem Auftreten des Elmsfeuers, da man die Ursachen kennt. Dieselbe Erscheinung kann man nämlich im Dunkeln auch beim Betrieb eines Bandgenerators besonders an spitzen Elektroden beobachten.

In 80 km bis 200 km Höhe befindet sich in mehreren, sehr ausgedehnten Schichten die positive Grenzfläche des elektrischen Feldes der Erde. Man nennt diese Schichten die *Heavisideschichten;* sie haben für die drahtlose Nachrichtenübertragung besondere Bedeutung. Die Ursachen der positiven Aufladung der Lufthülle in diesen Höhen sind die ultraviolette Strahlung der Sonne und anderer Strahlungen aus dem Weltenraum.

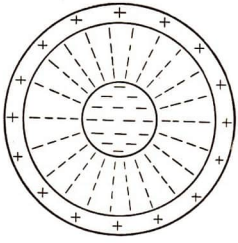


Abb. **37**/1. Veranschaulichung des Erdfeldes (schematisch)

Um uns von dem elektrischen Feld der Erde eine grobe Vorstellung zu machen, können wir es im Querschnitt mit dem Feld zwischen einer negativ geladenen Scheibe und einem sie in einer gewissen Entfernung umschließenden positiv geladenen Ring vergleichen (Abb. **37**/1). Dieses Feld ist inhomogen; die Feldlinien verlaufen radial. Das Erdfeld ist allerdings nicht so gleichmäßig gestaltet wie dieses Modell. Die unregelmäßige Beschaffenheit der Erdoberfläche und die vielen wechselnden atmosphärischen Vorgänge, wie Gewitter und kosmische Einstrahlungen, machen das elektrische Feld der Erde zu einem komplizierten Gebilde. Neue vertiefte Erkenntnisse über das elektrische Feld der Erde übermitteln uns heute die automatischen Forschungslaboratorien, die von den sowjetischen Wissenschaftlern gestartet worden sind. Die Meßergebnisse, die von den Sputniks und Luniks durch Funk an die Bodenstationen übermittelt wurden, haben zu einer Vertiefung der Kenntnisse auch über das elektrische Feld der Erde geführt.

9. Fragen und Aufgaben:

1. Aus welchen physikalischen Beobachtungen geht hervor, daß im Raum um einen geladenen Körper ein elektrisches Feld besteht?
2. Wie kann man aus einem Feldlinienbild auf die Form des Feldes schließen? Unterscheiden Sie die einzelnen Formen des Feldes!
3. Nennen Sie Anwendungen des elektrischen Feldes in der Produktion!
4. Welche Gewitterschutzmaßnahmen muß man beachten?

6. Der Kondensator

1. Der Plattenkondensator. In Rundfunkempfängern, Störschutzanlagen und vielen anderen elektrischen Anlagen findet man *Kondensatoren*. Ihre Wirkungsweise zeigt folgender Versuch mit dem Modell eines Plattenkondensators.

Zwei isoliert aufgestellte Metallplatten werden parallel zueinander gegenübergestellt und für kurze Zeit an einen laufenden Bandgenerator angeschlossen (Abb. **38**/1). Nach Entfernen der Spannungsquelle legt man einen Metallstab mit isolierendem Griff über beide Platten. Dabei ist ein knisternder Entladungsfunke zu beobachten. Dieser Versuch zeigt, daß die Platten zwei entgegengesetzte elektrische Ladungen aufgenommen und gespeichert hatten, bis eine leitende Verbindung zwischen den beiden Platten die Entladung bewirkte; *die Platten waren aufgeladen*

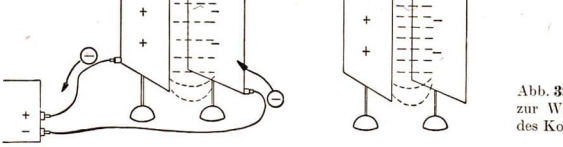


Abb. **38**/1. Versuch zur Wirkungsweise des Kondensators

worden. Da bereits feuchte Luft eine Entladung herbeiführen kann, müssen elektrostatische Versuche in möglichst trockener Luft vorgenommen werden. Zwischen den beiden geladenen Platten bildet sich ein elektrisches Feld aus (vgl. Abb. **29**/2). Innerhalb dieses elektrischen Feldes bestehen anziehende Kraftwirkungen zwischen den beiden entgegengesetzten Ladungen. Auf Grund dieser Kraftwirkungen können elektrische Ladungen auf den Platten angehäuft werden. Man kann von einem Verdichten der Ladungen, einem Kondensieren, sprechen. Deshalb nennt man solche Anordnungen *Kondensatoren*. Der benutzte Versuchsaufbau stellt einen *Plattenkondensator* dar (Abb. **38**/2).

Ein Kondensator kann elektrische Ladungen speichern.

2. Aufladen und Entladen eines Kondensators. Ein Kondensator kann auf verschiedene Weise aufgeladen werden. Verbindet man beispielsweise die beiden Platten eines Plattenkondensators kurzzeitig mit den Polen einer Gleichspannungsquelle, so sind Platten auch nach dem Lösen der Verbindungen so wie die entsprechenden

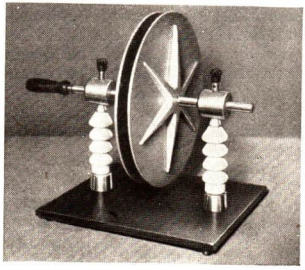
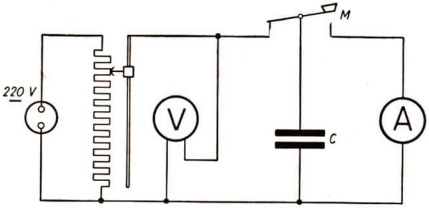


Abb. **38**/2. Plattenkondensator

Pole der Spannungsquelle aufgeladen. Dabei ist auf der negativ aufgeladenen Platte eine Überschuß an Elektronen, auf der positiv geladenen Platte dagegen ein Mangel an Elektronen entstanden.

Ein Kondensator kann aber auch, wie beim Bandgenerator, durch das Aufsprühen von Ladungen aufgeladen werden. Verbindet man die Platten eines geladenen Kondensators durch einen Leiter, so wird er wieder entladen. Der Elektronenüberschuß und der Elektronenmangel gleichen sich aus. Das Elektrometer zeigt, daß beim Entladen die Spannung zwischen den Platten Null wird.

3. Die Kapazität eines Kondensators. Die Physik sucht stets nach gesetzmäßigen Beziehungen zwischen physikalischen Größen, die in einem funktionalen Zusammenhang stehen. Auch bei Kondensatoren hat man eine *gesetzmäßige Beziehung zwischen der Ladung und der Spannung* gefunden.



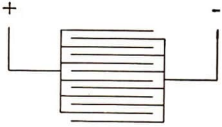


Abb. **39**/2. Blockkondensator (schematisch)

Abb. **39**/1. Versuchsanordnung zur Untersuchung der Beziehung zwischen Ladung und Spannung

Die Abbildung **39**/1 zeigt die Versuchsanordnung, die für die folgenden Versuche benutzt wird. Ein Blockkondensator C, der zwei getrennte Plattensysteme enthält (Abb. **39**/2), wird über einem Spannungsteiler bei verschiedenen Spannungen aufgeladen und jedesmal durch Drücken der Morsetaste M wieder entladen. Dabei wird bei jeder Aufladung die Spannung U gemessen und bei jeder Entladung an einem Galvanometer der kurzzeitige Ausschlag, der durch den Entladungsstrom verursacht wird, abgelesen. Man bezeichnet diese Art des Ausschlages als *Stoßausschlag*. Er ist von der Stromstärke und von der Dauer des Stromflusses abhängig und ist somit ein Maß für die Ladung Q des Kondensators. Genaue Versuche haben ergeben, daß *der Stoßausschlag das Produkt aus der Stromstärke und der Zeit ist*. Die Werte Q

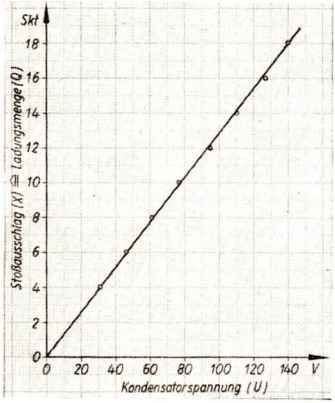


Abb. **39**/3. Q-U-Diagramm

und U werden gemessen und zusammengehörige Meßwerte in einem *Q-U-Diagramm* graphisch dargestellt (Abb. 39/3). Da die Bildpunkte annähernd auf einer durch den Nullpunkt gehenden Geraden liegen, ist Q proportional U:

$$Q \sim U.$$

Die von einem Kondensator aufgenommene Ladungsmenge ist der Kondensatorspannung proportional.

Bildet man für jeden Einzelversuch den Quotienten aus Q und U, so stellt man fest, daß dieser Quotient konstant ist. Man nennt diese Konstante die *Kapazität C* des Kondensators.

$$\boxed{C = \frac{Q}{U}}.$$

Die Kapazität eines Kondensators ist der Quotient aus der vom Kondensator aufgenommenen Ladungsmenge und der Kondensatorspannung.

Jeder Kondensator hat eine ihm eigene bestimmte Kapazität. Sie ist von den Abmessungen und von der Bauweise des Kondensators abhängig.

4. Die Einheit der Kapazität. Wie für jede physikalische Größe hat man auch für die Kapazität eine Maßeinheit festgesetzt. Sie heißt zu Ehren des englischen Physikers Faraday ein **Farad** (1 F). Ein Kondensator hat die Kapazität von 1 F, wenn er bei einer angelegten Spannung von 1 V die Ladungsmenge 1 As = 1 C aufnimmt. Das ist beispielsweise der Fall, wenn ein Strom von 1 A 1 s lang fließt.

$$1\,\mathrm{F} = \frac{1\,\mathrm{C}}{1\,\mathrm{V}}.$$

Die technischen Kondensatoren erreichen bei weitem nicht diese große Kapazität von 1 F. Deshalb sind in der Praxis kleinere Einheiten gebräuchlich.

Ein **Mikrofarad** (μF) ist der millionte Teil eines Farad. Ein **Nanofarad** (nF) ist der milliardste Teil und ein **Picofarad** (pF) der billionte Teil eines Farad:

$$1\,\mu\mathrm{F} = 10^{-6}\,\mathrm{F},$$
$$1\,\mathrm{nF} = 10^{-9}\,\mathrm{F},$$
$$1\,\mathrm{pF} = 10^{-12}\,\mathrm{F}.$$

In der Technik sind Kondensatoren von wenigen Picofarad bis zu einigen hundert Mikrofarad gebräuchlich.

5. Die Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von seinen Abmessungen und vom Dielektrikum. Will man Kondensatoren mit bestimmten Kapazitäten bauen, so muß man wissen, wovon die Kapazität eines Kondensators abhängt. Für die folgenden Versuche wird wieder die Versuchsanordnung nach Abbildung 39/1 benutzt.

a) Die Abhängigkeit der Kapazität von der Plattengröße. Statt des einen Blockkondensators benutzt man Plattenkondensatoren, deren Plattenflächen sich wie 1:2:3:4 verhalten. Die Kondensatoren werden jeweils so weit aufgeladen, daß sie die

gleiche Spannung haben. Die bei jeder Entladung gemessenen Stoßausschläge und damit auch die Ladungen verhalten sich ebenfalls wie 1:2:3:4. Daraus folgt

$$Q \sim F.$$

Da aber bei gleicher Spannung die Ladung proportional der Kapazität ist, ergibt sich

$$C \sim F.$$

Die Kapazität eines Kondensators ist der Plattenfläche direkt proportional.

b) Die Abhängigkeit der Kapazität vom Plattenabstand. Lädt man einen Plattenkondensator mehrmals bei verschiedenem Plattenabstand (d), aber bei gleicher Spannung auf, so erhält man beim Entladen verschieden große Stoßausschläge. Somit ist die Ladung Q unterschiedlich. In einem *Q-d-Diagramm* sind die zueinandergehörenden Meßwerte Q und d eingetragen (Abb. **41**/1). Aus den Meßwerten folgt, daß die Produkte aus Q und d konstant sind.

Folglich ist $Q \sim \frac{1}{d}$.

Da bekanntlich $C \sim Q$

ist, so folgt daraus $C \sim \frac{1}{d}$.

Die Kapazität C eines Kondensators ist dem Abstand der Platten umgekehrt proportional. Das Produkt aus beiden Größen ist konstant.

Die Zusammenfassung der beiden Proportionalitäten

$$C \sim F \quad \text{und} \quad C \sim \frac{1}{d}$$

ergibt

$$C \sim \frac{F}{d}.$$

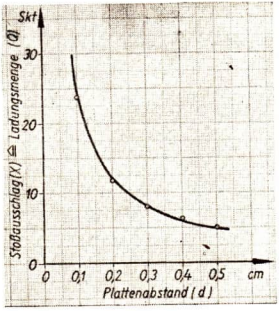


Abb. **41**/1. *Q-d*-Diagramm

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

Wenn man also eine große Kapazität erreichen will, muß man die Plattenfläche möglichst groß und den Plattenabstand so klein wie möglich wählen.

c) Das Dielektrikum. Außer von den räumlichen Abmessungen des Kondensators (F, d) hängt die Kapazität auch von dem Stoff zwischen den Platten ab. Man lädt einen Plattenkondensator auf und mißt wiederum den Stoßausschlag bei seiner Entladung (vgl. Abb. **39**/1). Nun schiebt man zwischen die Platten des Kondensators eine Scheibe aus einem isolierenden Stoff, etwa aus Glas, Hartgummi oder aus einem Plast, und lädt ihn auf die gleiche Spannung auf. Entlädt man jetzt den Kondensator und

mißt dabei den Stoßausschlag, so erhält man einen höheren Wert. Das bedeutet, daß Stoffe zwischen den aldungstragenden Platten bei gleicher Spannung die Ladung und damit die Kapazität des Kondensators vergrößern.

Man bezeichnet einen *Isolator*, der den Raum zwischen den Platten eines Kondensators ausfüllt, als *Dielektrikum*. Auch die Luft ist ein Dielektrikum. Das elektrische Feld wirkt durch das Dielektrikum hindurch. Um die Auswirkungen verschiedener Dielektrika miteinander vergleichen zu können, mißt man die Kapazität eines Plattenkondensators im luftleeren Raum und die Kapazität desselben Kondensators bei Ausfüllung des Plattenzwischenraumes mit dem betreffenden Stoff. Den Faktor ε_r, der angibt, wievielmal so groß die Kapazität eines Kondensators durch Einbringen eines bestimmten Dielektrikums gegenüber dem Vakuum ist, bezeichnet man als **relative Dielektrizitätskonstante** (ε_r).

Bei Verwendung des Dielektrikums Luft zeigt sich kein merklicher Unterschied gegenüber dem Vakuum. Luft hat folglich annähernd die relative Dielektrizitätskonstante 1. Bei allen anderen Isolatoren ist ε_r größer als 1. Durch die Entwicklung synthetischer Isolierstoffe ist die Anzahl der Stoffe, die in Kondensatoren als Dielektrikum verwendet werden, erhöht worden. Die Tabelle gibt eine Auswahl solcher Isolierstoffe und deren Werte für ε_r.

Relative Dielektrizitätskonstanten einiger Isolierstoffe

Isolierstoffe	ε_r	Isolierstoffe	ε_r
Luft	1,006	Glas, Porzellan	5
Papier	2	Glimmer	7
Paraffin	2	Aluminiumoxyd	8,5
Trolitul	2,4	Tempa S	14
Styroflex	2,5	Condensa F	80
Preßspan	3	Epsilan 600	900
PVC-weich	4	Epsilan 7000	7000

Die Kapazität eines Kondensators ist somit von der Plattengröße, dem Plattenabstand und der Art des Dielektrikums abhängig.

$$C \sim \varepsilon_r \cdot \frac{F}{d}.$$

Um die Kapazität eines Plattenkondensators berechnen zu können, muß man von der Proportion zur Gleichung übergehen. Der dabei auftretende Proportionalitätsfaktor ist die Dielektrizitätskonstante im Vakuum (ε_0). Genaue Untersuchungen ergaben den Wert

$$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-14} \text{ Farad/cm}.$$

Ist nun F die wirksame Plattenfläche in cm² und d der Plattenabstand in cm, so errechnet sich die Kapazität eines Plattenkondensators im Vakuum nach der Gleichung

$$C = 8{,}86 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{F}{d} \text{ Farad}.$$

Der Faktor 10^{-14} läßt sofort erkennen, daß man mit gewöhnlichen Kondensatoren nur Kapazitäten erreichen kann, die Bruchteile von 1 F sind. Die Gleichung für das Vakuum gilt praktisch auch für das Dielektrikum Luft. Die Unterschiede sind so gering, daß sie praktisch vernachlässigt werden können. Bei der Verwendung eines anderen Dielektrikums ergibt sich

$$\boxed{C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{F}{d}} \; .$$

6. Die Verwendung von Kondensatoren. a) Funkenlöschung zur Entstörung und zum Schutz von Kontakten. Bei Gleichstrommotoren können zwischen den sich fortwährend schließenden und öffnenden Schleifkontakten Funken auftreten. Diese stören erheblich den Rundfunkempfang. Ein parallel zu den Kontakten geschalteter Kondensator nimmt jedoch die sonst im Kontaktfunken überspringende Ladung im wesentlichen auf und beseitigt somit weitgehend die Funken (Abb. 43/1). Erst wenn die Kontakte wieder fest geschlossen sind, gibt der Kondensator die aufgenommene Ladung wieder ab. Danach kann er wieder neue Ladungen aufnehmen.

Infolge der Funkenbildung werden außerdem die Kohlebürsten und Kollektoren erhitzt und nützen sich daher schneller ab als ohne Funkenbildung. So dient der Kondensator zur *Entstörung elektrischer Geräte* und *zum Schutz der Kontakte* vor zu schneller Abnutzung.

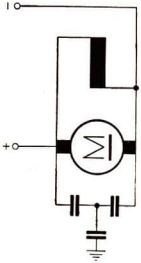
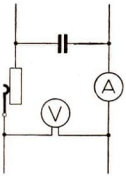


Abb. 43/1. Schaltung von Entstörungs-Kondensatoren (schematisch)



b) Glättung pulsierender Gleichströme. Gleichgerichtete Ströme, wie man sie zum Beispiel einem Akkumulatorenladegerät für Wechselstrom entnimmt, schwanken in ihrer Stromstärke sehr schnell dauernd zwischen Null und einem Höchstwert, man sagt, sie *pulsieren*. Würde man solche pulsierenden Stöme im Rundfunkempfänger verwenden, so würden sie ein starkes Brummen hervorrufen. Ein parallel zum Verbraucher geschalteter Kondensator lädt sich beim Ansteigen der Spannung auf und gibt bei ihrem Absinken die Ladung wieder ab (Abb. 43/2). In dieser Weise wirkt er ausgleichend auf die Schwankungen des pulsierenden Gleichstroms und *glättet* somit den Strom.

Abb. 43/2. Schaltung eines Glättungskondensators

c) Kondensatoren in elektrischen Schwingkreisen. In Verbindung mit Spulen benutzt man Kondensatoren dazu, regelmäßige elektrische Schwingungen zu erzeugen. Diese Schwingungen sind die Grundlage der Rundfunk- und Fernsehtechnik. Die sogenannten *Schwingkreise* in den Rundfunk- und Fernsehempfängern enthalten Kondensatoren und Spulen.

7. Technische Kondensatoren. Für den Gebrauch in der Technik hat man je nach dem Verwendungszweck verschiedenartige Kondensatoren entwickelt. Meist müssen

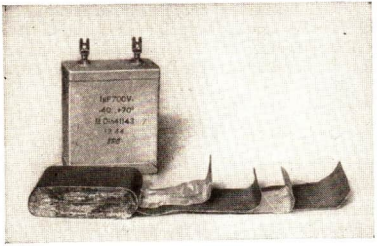


Abb. 44/1. Wickelkondensator

große Kapazitäten auf kleinstem Raum untergebracht werden. Bei Kondensatoren hoher Kapazitäten müssen die Plattenflächen möglichst groß sein, die Abstände der Platten dagegen so gering wie möglich. Die erste Bedingung erfordert einen möglichst großen Raum, die zweite kommt dagegen der Platzersparnis entgegen. Die Abstandsverkleinerung zwischen den Platten hat aber Grenzen. Wählt man nämlich den Plattenabstand zu gering, so kann es zu unerwünschten Entladungen infolge durchschlagender Funken kommen. Je nach der Größe der benutzten Spannung und der Art des Dielektrikums muß ein bestimmter Mindestabstand gewahrt werden. Die jeweils zulässige Höchstspannung ist auf dem Kondensator neben der Angabe seiner Kapazität mit vermerkt (vgl. Abb. **44**/1). Wird diese Spannung überschritten, dann können die Isolierschichten durchschlagen werden. Dadurch wird der Kondensator unbrauchbar. Die Kapazität hängt aber noch von dem Dielektrikum ab. Außer den früher meist verwendeten Isolatoren wie Glas, Glimmer oder paraffiniertem Papier, stehen heute die neuen technischen Isolierstoffe *Styroflex*, *Trolitul* und *keramische Spezialmassen* zur Verfügung. Sie haben teilweise eine sehr hohe relative Dielektrizitätskonstante.

Am gebräuchlichsten sind die *Wickelkondensatoren* (Abb. **44**/1). Auf einem paraffinierten Papierstreifen bzw. auf einer Styroflexfolie als Dielektrikum sind beiderseits Metallfolien geklebt. Die Folien entsprechen den Platten des Plattenkondensators. Man nennt sie allgemein *Beläge*. Werden diese Streifen zusammengerollt, dann erhält man große Flächen und sehr kleine Abstände zwischen ihnen. Die Wickel werden in kleinen Metallkästen oder Metallzylindern untergebracht. Diese Gefäße dienen gleichzeitig zum Abschirmen äußerer elektrischer Felder.

In *Blockkondensatoren* verwendet man Glimmer als isolierendes Dielektrikum. Die Silberbeläge sind dabei auf den Glimmer aufgebrannt. Die erforderliche Flächengröße wird durch Schichtung vieler solcher Glimmerplättchen in Plastikgehäusen erreicht. Die gebräuchlichsten Formen besitzen Kapazitäten von einigen Mikrofarad bei einer zulässigen Höchstspannung von 500 V.

Abb. 44/2. Keramikkondensatoren

In der Deutschen Demokratischen Republik stellt unter anderem der VEB Keramische Werke Hermsdorf (Thür.) die besonders hochwertigen *Keramikkondensatoren* her (Abb. **44**/2). Die Isolationsgrundlagen sind besonders Keramiken wie *Calit*,

Tempa, *Condensa* und solche, die Bariumtitanat, Kalziumtitanat, Strontiumtitanat oder Bleizirkonat enthalten. Diese Isolatoren haben relative Dielektrizitätskonstanten zwischen 1000 und 10000. Solche hochwertigen Keramikkondensatoren werden vor allem in der Rundfunk- und Fernsehtechnik gebraucht.

In einem *Elektrolytkondensator*, kurz *Elko* genannt, wird der eine Belag von einem Elektrolyten gebildet. Man benutzt hierfür eine in Natronzellulosepapier aufgesogene Borsäure-Glyzerin-Mischung. Als Dielektrikum dient eine äußerst dünne Oxydschicht auf einem Aluminium- oder Kupferblech, das zugleich den anderen Belag darstellt. Wegen der geringen Schichtdicke und der hohen Dielektrizitätskonstante der Oxydschicht erreicht man trotz verhältnismäßig kleiner Abmessungen große Kapazitäten. Bei Niederspannungen haben Elektrolytkondensatoren Kapazitäten von einigen hundert Mikrofarad. Sie dürfen nur bei Gleichspannung und unter Beachtung der richtigen Polung verwendet werden. Der Pluspol muß an der die Oxydschicht tragenden Platte liegen, der Minuspol am Elektrolyten. An den Anschlüssen ist meist die jeweils zu beachtende Polung gekennzeichnet.

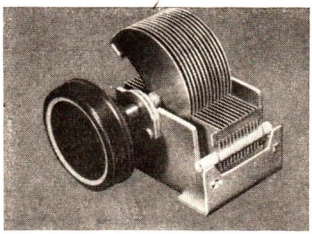


Abb. 45/1. Drehkondensator

Abb. 45/2. Trimmer

Die *Drehkondensatoren* sind Kondensatoren mit änderbarer Kapazität (Abb. 45/1). In ein feststehendes Plattensystem kann ein zweites Plattensystem hineingedreht werden. Dadurch wird die Kapazität kontinuierlich vergrößert. Die Drehkondensatoren dienen zum Abstimmen elektrischer Schwingkreise, zum Beispiel in Rundfunkgeräten. Kleine keramikisolierte Drehkondensatoren heißen *Trimmer* (Abb. 45/2). Die Drehkondensatoren haben meist kleine Kapazitätswerte, etwa von 10 pF bis 500 pF, da sie ja als Dielektrikum Luft verwenden.

8. Schaltungen der Kondensatoren. Widerstände und Spannungsquellen kann man hintereinander oder parallel schalten. Dieselben Schaltmöglichkeiten können auch bei Kondensatoren angewandt werden.

Eine schematische Querschnittzeichnung eines Plattenkondensators nach Abbildung 45/3a stellt das Schaltzeichen für einen Festkondensator dar. Abbildung 45/3b zeigt das Schaltzeichen eines Drehkondensators, dessen stetige Veränderlichkeit, wie bei allen veränderlichen elektrischen Schaltelementen, ein schräger Pfeil durch das betreffende Schaltzeichen andeutet.

Abb. 45/3. Schaltzeichen:
a) Festkondensator, b) Drehkondensator

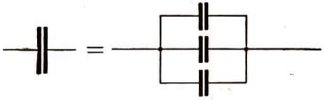


Abb. 46/1
Parallelschaltung von drei Kondensatoren

Abb. 46/2. Reihenschaltung
von drei gleichen Kondensatoren

Schaltet man Kondensatoren parallel, so bedeutet dies eine Plattenvergrößerung (Abb. 46/1). Die Flächen der Platten und damit die Kapazitäten werden addiert.

Bei Parallelschaltung von Kondensatoren addieren sich die Einzelkapazitäten.

$$\boxed{C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n}\,.$$

Mit einer Hintereinander- oder Reihenschaltung erreicht man dagegen eine Verringerung der Kapazität. Schaltet man beispielsweise drei gleiche Kondensatoren in Reihe, so werden damit die Plattenabstände addiert, der gesamte Plattenabstand wird dreimal so groß (Abb. 46/2). Dadurch beträgt die Gesamtkapazität der Schaltung nur noch ein Drittel der Einzelkapazitäten. Andererseits kann aber eine dreimal so große Spannung, wie sie für den Einzelkondensator zulässig ist, angelegt werden. Die Beziehung zwischen den Kapazitäten von hintereinander geschalteten Kondensatoren und der resultierenden Gesamtkapazität soll unter der vereinfachenden Voraussetzung abgeleitet werden, daß bei allen Kondensatoren die Werte von ε und F gleich sind. Mit ε bezeichnet man das Produkt $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$.

Schaltet man zwei Kondensatoren mit der Kapazität $C_1 = \varepsilon \dfrac{F}{d_1}$ beziehungsweise $C_2 = \varepsilon \dfrac{F}{d_2}$ in Reihe, so erhält man eine Gesamtkapazität

$$C_G = \varepsilon \frac{F}{d}\,.$$

Löst man alle Gleichungen nach d auf, so erhält man wegen $d = d_1 + d_2$

$$\frac{\varepsilon F}{C_G} = \frac{\varepsilon F}{C_1} + \frac{\varepsilon F}{C_2}\,.$$

Daraus folgt

$$\frac{1}{C_G} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\,.$$

Allgemein gilt:

$$\boxed{\frac{1}{C_G} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}}\,.$$

Bei Reihenschaltung von Kondensatoren ist der reziproke Wert der Gesamtkapazität gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelkapazitäten.

Die Gesamtkapazität bei Reihenschaltung von Kondensatoren ist immer geringer als die Kapazitäten jedes einzelnen Kondensators. Die Gesamtspannung verteilt sich auf die einzelnen Kondensatoren.

9. Fragen und Aufgaben:

1. Sprechen Sie über den Zusammenhang zwischen der Ladung und der Spannung an einem Kondensator! Beschreiben Sie das elektrische Feld eines Kondensators mit zwei parallelen Platten!
2. Hängt man ein Holundermarkpendel zwischen die Platten eines geladenen Kondensators, so pendelt es einige Zeit von Platte zu Platte hin und her. Erklären Sie diesen Vorgang!
3. Wie verhalten sich die Kapazitäten zweier Kondensatoren, wenn der eine die dreifache Plattenfläche und den halben Plattenabstand des anderen hat? Das Dielektrikum soll bei beiden Kondensatoren gleich sein.
4. Wie groß muß die Plattenfläche eines Kondensators sein, wenn er bei einem Plattenabstand von 5 mm und Luft als Dielektrikum eine Kapazität von 100 pF haben soll?
5. Wie kann man aus 4 Kondensatoren von je 2 μF eine Gesamtkapazität von 5 μF zusammenstellen?

7. Die elektromagnetische Induktion

1. Induktion einer Spannung in einer geradlinig bewegten Spule. Als Spannungsquelle für die elektrische Fahrradbeleuchtung benutzt man einen kleinen Generator, meist Dynamo genannt. Nimmt man ihn aus seinem Gehäuse heraus, so kann man feststellen, daß er Magneten und Spulen enthält. Seine Wirkungsweise erkennt man an den folgenden Versuchen:

Im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten wird eine Spule so hin- und herbewegt, wie es in Abbildung 47/1a wiedergegeben ist. Ein Voltmeter mit Nullpunktsmittellage zeigt dabei eine elektrische Spannung an. Kehrt sich die Bewegungsrichtung um, so erkennt man an der entgegengesetzten Zeigerbewegung, daß die Spannung ihre Polarität ändert (Abb. 47/1b).

Bewegt man die Spule sehr langsam, so sind die Zeigerausschläge am Voltmeter kleiner. Bewegt sich die Spule gegenüber dem Magneten nicht, so wird keine Spannung mehr erzeugt.

Bewegt man die Spule jedoch zwischen den Schenkeln des Hufeisenmagneten von Pol zu Pol, so bleibt der Zeiger des Voltmeters in Ruhe. Daraus erkennt man,

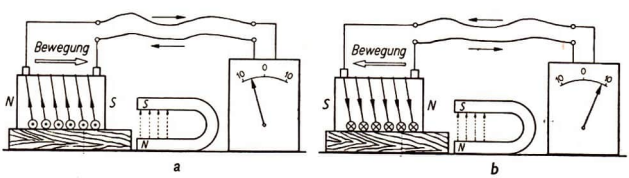


Abb. 47/1. Hufeisenmagnet und Spule

daß nicht bei jeder Bewegung der Spule in ihr eine Spannung entsteht. Es kommt demnach auf die Bewegungsrichtung der Spule im Magnetfeld an.

Zwischen den Polen des Hufeisenmagneten verlaufen die Feldlinien parallel. Hier ist das Feld homogen und hat seine größte Stärke. Außerhalb dieses Bereichs laufen die Feldlinien auseinander, das Feld wird schwächer. Bewegt man die Spule wie in Abbildungen 47/1, so gelangt sie dabei entweder aus einem Bereich größerer Stärke in einen Bereich geringerer Stärke des Magnetfeldes oder umgekehrt. Die Spule umfaßt jeweils einen Teil des Feldes mit verschieden großer Feldstärke. Man sagt auch, *die Feldstärke des von der Spule umschlossenen Magnetfeldes ändert sich.* Bei einer Bewegungsrichtung, bei der sich die Stärke des die Spule durchsetzenden Feldes ändert, entsteht eine Spannung in der Spule.

Führt man dagegen die Spule parallel zu den Feldlinien von Pol zu Pol, so umfaßt sie stets ein gleichstarkes homogenes Feld. Das von ihr umschlossene Feld ändert sich nicht. Bei dieser Bewegungsrichtung kommt keine Spannung zustande.

Eine Spannung tritt also immer dann auf, wenn sich das von der Spule umfaßte Magnetfeld ändert. Die Entstehung einer elektrischen Spannung durch diesen Vorgang bezeichnet man als **elektromagnetische Induktion.** Die Spannung nennt man *Induktionsspannung.* Man sagt auch, *eine Spannung wird in einem Leiter induziert.* In einem geschlossenen Stromkreis ruft die Induktionsspannung einen Strom, den *Induktionsstrom,* hervor. Die elektromagnetische Induktion wurde im Jahre 1831 von dem bedeutenden englischen Physiker *Michael Faraday* entdeckt.

Wird eine Spule so bewegt, daß sich die Stärke eines von ihr umfaßten Magnetfeldes ändert, so entsteht während dieser Änderung eine Induktionsspannung an den Enden der Spule.

2. Induktion einer Spannung durch geradlinige Bewegung des Magneten. Das von einer Spule umfaßte Magnetfeld ändert sich auch, wenn die Spule in Ruhe bleibt und der Magnet hin- und herbewegt wird. Durch einen Versuch, wie er in Abbildung 48/1 veranschaulicht ist, kann man Induktionsspannungen auch auf diese Weise erzeugen. Es ist somit gleichgültig, ob die Spule oder der Magnet bewegt wird. Es kommt stets darauf an, daß *Spule und Magnet gegeneinander bewegt werden.* Man sagt, sie müssen sich *relativ zueinander bewegen.* Entscheidend für die elektromagnetische Induktion ist jedoch, daß sich das von der Spule umschlossene Magnetfeld während der Bewegung der Spule beziehungsweise des Magneten ändert.

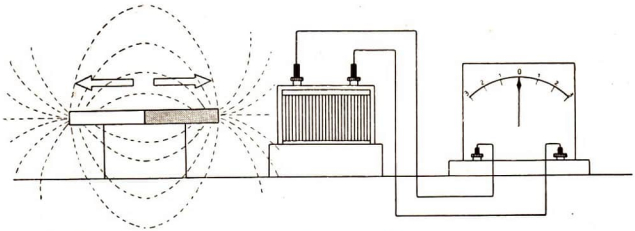


Abb. 48/1. Induktion einer Spannung durch Bewegen des Magneten

3. Induktion einer Spannung in einer Spule durch Drehbewegungen. An Stelle einer Hin- und Herbewegung dreht sich im Fahrraddynamo die Spule um eine Achse. Durch Drehung einer Spule im Magnetfeld kann man ebenfalls die Stärke des von ihr umfaßten Feldes ändern und somit Spannungen induzieren. In der Abbildung 49/1

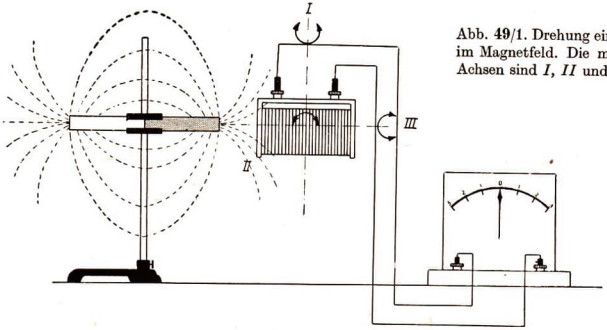


Abb. 49/1. Drehung einer Spule im Magnetfeld. Die möglichen Achsen sind *I*, *II* und *III*.

sind die Möglichkeiten einer Drehung der Spule um drei verschiedene Achsen eingezeichnet. Die Drehungen um die Hochachse (*I*) und um die Querachse (*II*) führen zu Änderungen des umfaßten Feldes und damit zu Induktionsspannungen. Bei einer Drehung um die Längsachse (*III*) tritt dagegen keine Induktionsspannung auf, weil das von der Spule umfaßte Feld nicht geändert wird. Zu dem gleichen Ergebnis kommt man durch Drehen eines Magneten neben einer feststehenden Spule. Auch hierbei gilt, daß Spannungen nur dann induziert werden, wenn sich die Spule oder der Magnet relativ zueinander so drehen, daß sich das von der Spule umschlossene Feld ändert.

Unter den verschiedenen Ausführungen der Spannungserzeuger für die Fahrräder findet man einige, bei denen sich Spulen zwischen feststehenden Magneten drehen, und andere, die mit ruhenden Spulen und drehbaren Magneten ausgerüstet sind. Ähnliche Unterschiede gibt es auch bei den großen Stromerzeugern, den Generatoren für die Elektroenergieerzeugung. Die Drehbewegung hat gegenüber der hin- und hergehenden Bewegung besonders bei der technischen Anwendung der elektromagnetischen Induktion große Vorteile. Ein Vorteil liegt in der gleichförmigen relativen Bewegung zwischen Magneten und Spulen (vgl. S. 59).

4. Induktion in einer ruhenden Spule im veränderlichen Feld eines Elektromagneten. Die bisherigen Versuche zeigen, daß das Entscheidende zum Erreichen einer Induktionsspannung die Änderung der Stärke des die Induktionsspule durchsetzenden Magnetfeldes ist. Diese Änderung wurde durch die relative Bewegung von Spule und Magnet erreicht. Der folgende Versuch zeigt, daß man eine elektromagnetische Induktion auch erreicht, wenn man das Magnetfeld eines Elektromagneten verändert. Ändert man mit Hilfe eines Widerstandes die Stärke des durch den Elektromagneten fließen-

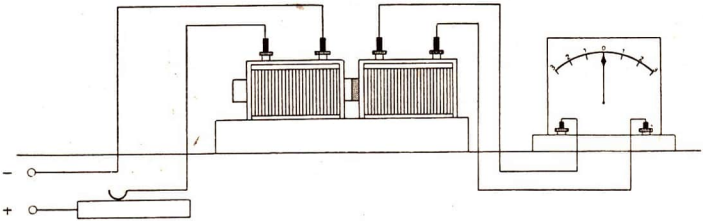


Abb. 50/1. Induktion in einer ruhenden Spule im veränderlichen Feld eines Elektromagneten

den Stromes, so ändert sich auch die Stärke des Magnetfeldes. Eine neben dem Elektromagneten stehende Spule wird dabei von dem sich ändernden Magnetfeld durchsetzt (Abb. 50/1). In ihr entsteht infolgedessen eine Induktionsspannung. In diesem Falle wird ohne mechanische Bewegung der Spule beziehungsweise des Magneten eine Induktionsspannung erzeugt. Die Bewegung erübrigt sich, da die Veränderung der Stromstärke die für die elektromagnetische Induktion notwendige Änderung des Feldes bewirkt.

Ändert sich das von einer Spule umschlossene Magnetfeld, so wird während dieser Änderung in der Spule eine Spannung induziert. Die Änderung des umschlossenen Magnetfeldes kann erfolgen:

1. durch eine Bewegung von Spule und Magnet relativ zueinander,

2. durch Änderung der Erregerstromstärke eines Elektromagneten.

5. Die Richtung des Induktionsstromes — Lenzsche Regel. Da die induzierte Spannung ihre Polarität mit einer Änderung der Bewegungsrichtung des Magnetfeldes wechselt, muß man wissen, wie man die jeweilige Polarität der Induktionsspannung und die Richtung des Induktionsstromes bestimmen kann.

An einem dünnen Faden wird ein leichter Aluminiumring aufgehängt. Er stellt eine kurzgeschlossene Spulenwindung dar (Abb. 50/2). Stößt man den einen Pol eines Stabmagneten durch den Ring, so weicht der Ring vor dem Stabmagneten etwas aus

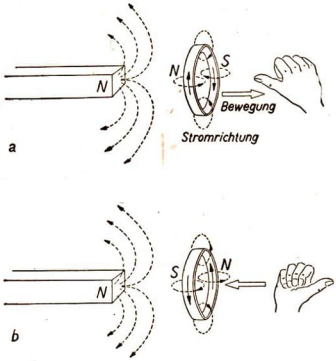


Abb. 50/2. Aluminiumring und Stabmagnet,
a) Stromrichtung beim Hineinstoßen,
b) Stromrichtung beim Herausziehen

(Abb. 50/2a). Zieht man den Magneten rasch aus dem Ring heraus, so folgt der Ring dieser Bewegung ein wenig (Abb. 50/2b).

In beiden Fällen wurde *durch die Bewegung des Magneten gegenüber dem Aluminiumring eine Spannung in diesem induziert.* Da der Ring eine kurzgeschlossene Spulenwindung bildet, fließt auf Grund der induzierten Spannung ein Induktionsstrom. Ein elektrischer Strom zeigt bekanntlich magnetische Wirkungen. Eine stromdurchflossene Spule und auch eine einzelne Spulenwindung wirken wie ein Stabmagnet. Mit Hilfe einer Magnetnadel kann man die Pole eines Elektromagneten ermitteln. Hält man die Faust der rechten Hand so, daß die gekrümmten Finger in die Richtung des Stromes zeigen, so weist der ausgestreckte Daumen nach der Seite der Spule, an der der Nordpol liegt. Man bezeichnet diese Regel als *Rechte-Faust-Regel.*

Auch der Aluminiumring, in dem ein Induktionsstrom fließt, wirkt wie ein Elektromagnet. Es stehen sich somit zwei Magnete gegenüber: der bewegte Permanentmagnet und der durch die elektromagnetische Induktion geschaffene Elektromagnet. Im ersten Teil des Versuches (Abb. 50/2a) weicht der Ring dem hineingestoßenen Magneten aus. Das zeigt, daß sich zwei gleiche Magnetpole gegenüberstehen, die einander abstoßen. Infolgedessen ist eine zusätzliche Kraft nötig, um den Stabmagneten in den Ring zu stoßen. Der Induktionsstrom fließt in diesem Falle so, daß an der Seite des Ringes, in die der Nordpol hineingestoßen wird, ebenfalls ein Nordpol entsteht.

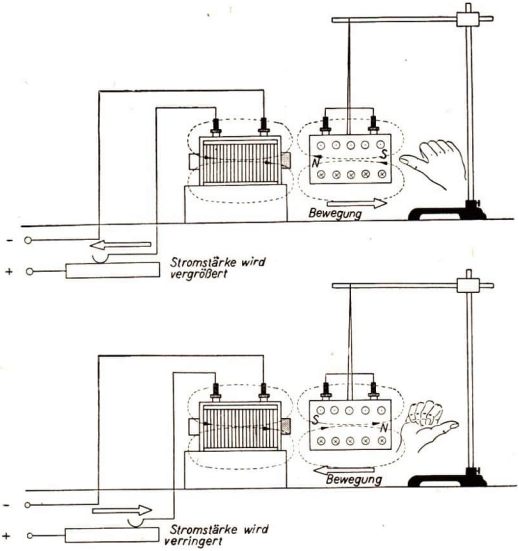
Mit der Rechte-Faust-Regel kann man umgekehrt von der Lage der Magnetpole auf die Richtung des Induktionsstromes schließen: Streckt man den Daumen der rechten Hand nach der Seite des Aluminiumringes aus, an der der Nordpol liegt, so zeigen die gekrümmten Finger die Richtung des Induktionsstromes im Ringe an.

Im zweiten Teil des Versuches (Abb. 50/2b) folgt der Ring dem herausgezogenen Magneten. Folglich stehen sich jetzt entgegengesetzte Pole gegenüber, die einander anziehen. Das zeigt, daß mit der Umkehrung der Bewegungsrichtung auch die Richtung des Induktionsstromes umgekehrt wird.

In beiden Fällen erkennt man die gleiche Wirkung. Wenn der Aluminiumring dem ihm genäherten Magneten ausweicht beziehungsweise dem von ihm entfernten Magneten nachfolgt, so hat er in beiden Fällen die gleiche Bewegungsrichtung wie der Magnet. Dadurch wird der Unterschied des Bewegungszustandes von Ring und Magnet verkleinert. *Die Bewegung des Magneten ist aber die Ursache des Induktionsstromes,* das Mitbewegen des Ringes bildet erst die Folge des Induktionsstromes. Da sich der Ring stets in der gleichen Richtung wie der Magnet bewegt, ist der Induktionsstrom nicht so groß, als wenn der Ring sich entgegengesetzt zum Magneten bewegen würde. *Der Induktionsstrom ist daher immer so gerichtet, daß er durch sein Magnetfeld seiner Ursache, der relativen Bewegung von Magnet und Ring, entgegenwirkt.*

Die gleiche Erscheinung beobachtet man in abgewandelter Form beim folgenden Versuch (Abb. 52/1). Eine kurzgeschlossene Induktionsspule hängt in geringem Abstand vor dem Pol eines Elektromagneten. Die Stromstärke im Elektromagneten kann durch einen Vorschaltwiderstand geändert werden. Verstärkt man das Feld des Elektromagneten, indem man rasch die Stromstärke vergrößert, so bewegt sich die Induktionsspule von dem Pol des Elektromagneten fort (Abb. 52/1a). Auf der Seite der Spule, die dem Elektromagneten zugewandt ist, entsteht durch den Induktionsstrom ein gleichnamiger Magnetpol. Das Magnetfeld des Induktionsstromes ist daher dem Feld des Elektromagneten entgegengerichtet. Dieses Feld wirkt der Verstärkung des induzierenden Feldes entgegen. Schwächt man umgekehrt das Feld des Elektro-

Abb. 52/1
Induktionsspule und
Elektromagnet



a) Abstoßung

b) Anziehung

magneten ab, indem man die Stromstärke verringert, so wird die Induktionsspule vom Elektromagneten angezogen. Es stehen sich in diesem Falle ungleichnamige Pole gegenüber. Das Magnetfeld des Induktionsstromes wirkt jetzt der Abschwächung des induzierenden Feldes entgegen (Abb. 52/1 b). In beiden Fällen ist der Induktionsstrom so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Änderung des induzierenden Feldes entgegenwirkt.

Diese Regel über die Richtung des Induktionsstromes ist von dem Physiker *Heinrich Friedrich Emil Lenz* entdeckt worden und heißt nach ihm *Lenzsche Regel.*

Die Wirkung eines Induktionsstromes ist stets dem Vorgang, der ihn verursacht, entgegengerichtet. Der Induktionsstrom ist so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Änderung des induzierenden Feldes entgegenwirkt.

6. Die Erzeugung und Umwandlung elektrischer Energie. Treibt man den Dynamo am Fahrrad an, so muß man nach dem Einschalten der Beleuchtung etwas kräftiger in die Pedale treten, als wenn man ohne Beleuchtung mit gleicher Geschwindigkeit fährt. Nach der Lenzschen Regel wirkt der Induktionsstrom seiner Ursache entgegen. Um die Gegenwirkung zu überwinden, ist eine Kraft nötig, die längs eines kreis-

förmigen Weges wirkt. Es muß daher eine mechanische Arbeit verrichtet werden, wenn durch elektromagnetische Induktion elektrische Energie erzeugt werden soll. Der induzierte Strom erwärmt die Leitungen und erhitzt vor allem die Wendel in der Glühlampe, die beim Glühen Licht aussendet. Es wird somit mechanische Energie in elektrische und diese wiederum in Wärme- und Lichtenergie umgewandelt.

Aus dem Unterricht in der 8. Klasse ist bekannt, daß sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld bewegt. Dabei wandelt sich elektrische in mechanische Energie um. In den Elektromotoren wird dieser Vorgang ausgenutzt. Die elektromagnetische Induktion bedeutet die Umkehrung dieses Vorganges. In einer Spule entsteht durch Bewegung in einem Magnetfeld und damit aus mechanischer Energie elektrische Energie. Elektrische und mechanische Energie sind also ineinander umwandelbar. Diese Tatsache stellt einen Teil des umfassenden Naturgesetzes von *der Umwandlung und der Erhaltung der Energie* dar.

Viele Geräte und Maschinen auf dem Gebiet der Elektrotechnik beruhen darauf, daß elektrische Energie und andere Energieformen ineinander umgewandelt werden können. In den großen Generatoren der Kraftwerke wird beispielsweise mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Diese wird über ein weit verzweigtes Leitungsnetz verteilt und den Verbrauchern zugeführt. Die Verbraucher wandeln zum Beispiel mit Hilfe von Heiz- und Wärmegeräten die elektrische Energie in Wärmeenergie um. Elektrochemische Vorgänge stellen eine Umwandlung von elektrischer in chemische Energie dar. Schließlich kann man in den Elektromotoren wieder die elektrische Energie in mechanische umwandeln. Die Elektromotoren sind in der Produktion das Hauptantriebsmittel für die meisten Maschinen.

Elektrische und mechanische Energie sind ineinander umwandelbar. Elektrische Energie kann auch in andere Energieformen umgewandelt werden. Ihre Umwandlung vollzieht sich nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie.

7. Die Größe der Induktionsspannung — Das Induktionsgesetz. Um festzustellen, von welchen Faktoren die Größe einer induzierten Spannung abhängt, werden drei Versuchsreihen durchgeführt (Abb. 54/1).

Erzeugt man Induktionsspannungen in Spulen mit unterschiedlicher Windungszahl unter sonst gleichen Bedingungen, so ist die Induktionsspannung um so höher, je größer die Windungszahl der Spule ist (Abb. 54/1a). Auch in einer einzigen Windung, wie sie ein Aluminiumring darstellt, kann eine Spannung induziert werden (vgl. Abb. 50/2). In jeder Windung einer Spule entsteht infolge der elektromagnetischen Induktion eine Induktionsspannung. *Die einzelnen Windungen der Spule sind gewissermaßen in Reihe geschaltet.* Nach dem Gesetz von der Reihenschaltung von Spannungsquellen addieren sich die Einzelspannungen. Die Gesamtspannung ergibt sich als Produkt aus der in einer Windung induzierten Spannung und der Windungszahl.

Die Größe der Induktionsspannung ist der Windungszahl der Induktionsspule direkt proportional.

Ändert man bei einem Induktionsversuch das Magnetfeld einer Spule verschieden schnell, aber immer um den gleichen Betrag, so ist die Induktionsspannung um so größer, je kürzer die Zeit für die Feldänderung ist (Abb. 54/1b). Genaue Messungen haben ergeben:

Die Größe der Induktionsspannung ist der für eine bestimmte Feldänderung benötigten Zeit umgekehrt proportional.

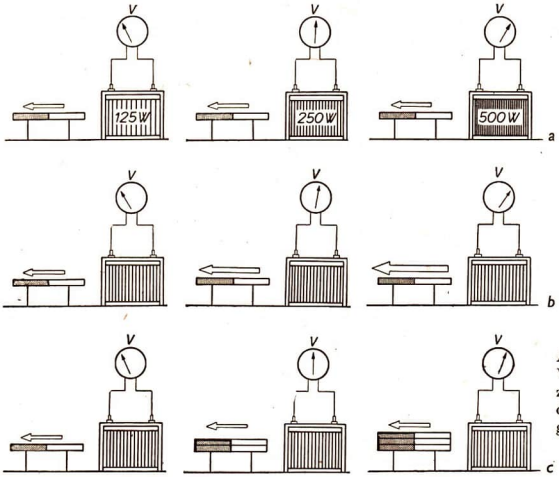


Abb. **54/1** Versuchsreihen zum Nachweis des Induktionsgesetzes

Je größer der Unterschied zwischen der größten und der geringsten Stärke des die Spule durchsetzenden Feldes ist, um so größer ist die Induktionsspannung (Abbildung **54/1** c). Durch genaue Messungen hat man festgestellt:

Die Größe der Induktionsspannung ist der Änderung des magnetischen Feldes direkt proportional.

Faßt man die Teilergebnisse der drei Versuchsreihen zusammen, so erhält man das **Induktionsgesetz.**

Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller die Änderung des Magnetfeldes erfolgt, je größer diese ist und je mehr Windungen die Induktionsspule hat.

8. Fragen und Aufgaben:

1. Warum ist es bei der elektromagnetischen Induktion gleichgültig, ob der Magnet ruht und die Spule sich bewegt, ob die Spule ruht und der Magnet sich bewegt oder ob beide sich gegeneinander bewegen?
2. Durch welche Maßnahmen kann man bei einem Induktionsversuch die induzierte Spannung verdoppeln?
3. a) Welche Energieumwandlungen finden beim Betrieb der Fahrradbeleuchtung statt?
   b) Warum kann man mit der im Fahrraddynamo erzeugten elektrischen Energie keinen Motor antreiben, der das Fahrrad und zugleich wieder den Dynamo in Bewegung setzt?

8. Die Selbstinduktion — Wirbelströme

1. Die Selbstinduktion in einer Spule. Verändert man die Stromstärke in einer Spule, so ändert sich dadurch auch die Stärke des Magnetfeldes der Spule. Da sich die Spule in ihrem eigenen veränderlichen Magnetfeld befindet, muß in ihr selbst eine Induktionsspannung auftreten. In den folgenden Versuchen sollen diese Induktionsspannungen und ihre Auswirkungen nachgewiesen werden.

In einem verzweigten Gleichstromkreis liegen in parallelen Zweigen eine Glühlampe L_1 mit einem Widerstand und eine Glühlampe L_2 mit einer Spule auf einem Eisenkern in Reihe (Abb. 55/1). Wird der Schalter geschlossen, so leuchtet die Glühlampe L_2 einen kurzen Augenblick später auf als L_1. Durch L_2 fließt der Strom also erst eine kurze Zeit nach dem Einschalten mit voller Stärke. Beim Anwachsen der Stromstärke wird in der Spule eine Spannung induziert. Nach der Lenzschen Regel ist diese Spannung so gerichtet, daß sie der Veränderung des Magnetfeldes entgegenwirkt. Die Gegenspannung verzögert daher das Anwachsen des Stromes. Sobald der Strom seinen höchsten Wert erreicht hat, bleibt das Magnetfeld der Spule konstant; es wird keine Spannung induziert.

Einen Vorgang, bei dem durch Veränderung der Stromstärke in einer Spule eine zusätzliche Spannung induziert wird, bezeichnet man als **Selbstinduktion.** Beim Schließen des Stromkreises verzögert die durch die Selbstinduktion hervorgerufene Gegenspannung das Anwachsen des Stromes.

Parallel zu einer Spule mit Eisenkern liegt eine Glimmlampe, die erst bei einer Spannung von etwa 110 V leuchtet, an einer Gleichspannung von etwa 4 V (Abb. 55/2). Öffnet man den Schalter, so leuchtet die Glimmlampe für einen kurzen Augenblick auf. Es muß also beim Ausschalten kurzzeitig eine Spannung von mindestens 110 V auftreten.

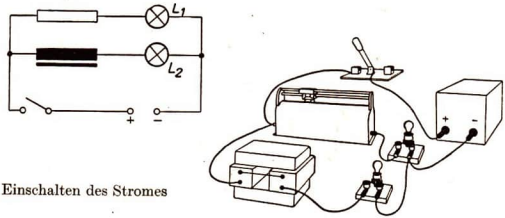


Abb. 55/1
Selbstinduktion beim Einschalten des Stromes

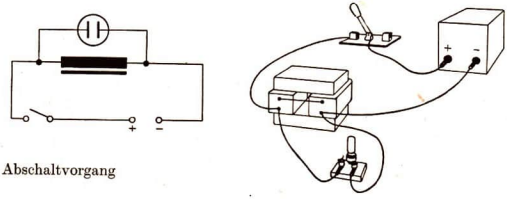


Abb. 55/2
Selbstinduktion beim Abschaltvorgang

Bricht das Magnetfeld beim Ausschalten des Stromes plötzlich zusammen, so entsteht infolge dieser schnellen Veränderung des Feldes durch Selbstinduktion eine hohe Spannung die der Veränderung des Feldes entgegenwirkt. Sie ist somit der äußeren Spannung gleichgerichtet und verzögert kurzzeitig das Absinken der Stromstärke. Da die Induktionsspannung nur für die kurze Dauer des Absinkens der äußeren Spannung auftritt, so ergibt sich ein kurzer *Spannungsstoß*.

Selbstinduktionsspannungen treten auch dann auf, wenn die Stromstärke in einer Spule nicht schlagartig, sondern langsam verändert wird. Wie aus dem Induktionsgesetz zu entnehmen ist, sind dann aber die Selbstinduktionsspannungen kleiner.

Beim Verändern der Stromstärke in einer Spule treten in ihr durch Selbstinduktion zusätzliche Spannungen auf, die der Veränderung des Magnetfeldes entgegenwirken. Durch die Selbstinduktionsspannung wird beim Einschalten das Anwachsen der Stromstärke und beim Ausschalten das Absinken der Stromstärke verzögert.

2. Die Induktivität. Die Größe der Selbstinduktionswirkung einer Spule bezeichnet man als *Induktivität*. Die Einheit der Induktivität heißt nach einem amerikanischen Physiker **Henry** (H).

1 H ist die Induktivität eines Leiters, in dem bei Änderung der Stromstärke um 1 A je Sekunde eine Induktionsspannung von 1 V induziert wird.

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

Die Induktivität einer Spule ist von ihrer Windungszahl und von ihren Abmessungen, Länge und Querschnitt, abhängig. Sie wächst erheblich an, wenn die Spule mit einem Eisenkern versehen ist. Die Induktivität hängt auch von der Art des Eisenkerns ab. In der folgenden Tabelle sind die Induktivitäten der Spulen aus dem Aufbausatz für die Elektrizitätslehre ohne Eisenkern und mit verschiedenen Kernen zusammengestellt.

Abhängigkeit der Induktivität von der Windungszahl und dem Kern

Spule	Induktivität (mH)		
Windungszahl	ohne Kern	auf I-Kern	mit geschlossenem Kern
125	1,7	2,9	47,6
250	2,8	9,2	213
500	6,8	37,1	796
750	17,1	94,5	1432
1500	58.4	314	4140
15000	1460	38210	318400

3. Die technische Bedeutung der Selbstinduktionsspannungen. Bei *Abschaltvorgängen* ist der durch Selbstinduktion aufgetretene hohe Spannungsstoß oft unerwünscht

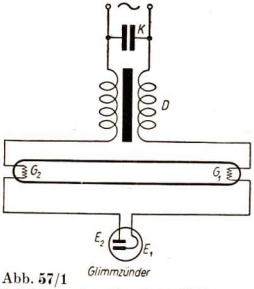


Abb. 57/1
Schaltung einer Leuchtstoffröhre

und störend. Werden Motoren, Transformatoren und andere Verbraucher, die Spulen enthalten, abgeschaltet, so führen die hohen Selbstinduktionsspannungen zu Funkenbildungen an den Schaltern. Aus diesem Grunde hat eine Gruppe von Schaltern für Verbraucher mit hohen Spannungen starke Federn. Diese werden beim Abschalten zunächst gespannt und reißen dann das Schaltmesser sehr schnell aus den Kontakten. Dadurch wird der Strom längs einer genügend großen Strecke unterbrochen und die beiden Kontakte sehr schnell voneinander entfernt, so daß Funkenbildungen weitgehend vermieden werden. Andere Schalter enthalten Öl, das gegenüber Luft eine größere Durchschlagsfestigkeit aufweist.

Der durch die Selbstinduktion entstehende Spannungsstoß kann aber auch ausgenutzt werden, beispielsweise zum *Zünden von Leuchtstoffröhren*. Die Leuchtstoffröhren arbeiten bei einer Betriebsspannung von 165 V; zum Zünden ist jedoch eine sogenannte *Zündspannung* von 450 V nötig. Die Betriebsspannung wird der Röhre über zwei Spulen zugeführt (Abb. 57/1). Zum Zünden ist ein Starter oder Glimmzünder parallel zur Röhre geschaltet. Nach dem Einschalten des Stromes erfolgt im Glimmzünder zwischen zwei geöffneten Bimetallkontakten eine Glimmentladung. Infolge der auftretenden Erwärmung schließen die Kontakte den Stromkreis. Der Strom durchfließt dabei die Spulen die Glimmentladung und erlischt. Die geschlossenen Kontakte kühlen sich ab und öffnen sich wieder. Beim Öffnen des Stromkreises wird in den Spulen infolge der Selbstinduktion ein Spannungsstoß induziert, der eine Spannung von etwa 450 V erreicht und die Leuchtstoffröhre zündet. Während des Betriebes der Leuchtstoffröhre sinkt die Spannung auf die Betriebsspannung ab, so daß der Glimmzünder nicht mehr in Tätigkeit gerät.

4. Die Wirbelströme. Bei der näheren Untersuchung von Elektromagneten und Motorankern fällt auf, daß die Eisenkerne aus Schichten dünner Bleche aufgebaut sind. Man hat festgestellt, daß infolge der elektromagnetischen Induktion auch in massiven Eisenteilen, die sich in einem veränderlichen Magnetfeld befinden, Induktionsströme entstehen. Diese erreichen wegen des geringen Widerstandes eine sehr hohe Stromstärke und führen daher nach der Lenzschen Regel zu störenden Gegenwirkungen und Erwärmungen. Die Entstehung und die Wirkung dieser Ströme zeigt ein Versuch mit dem *Waltenhofenschen Pendel* (Abb. 57/2).

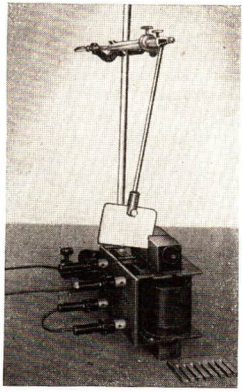
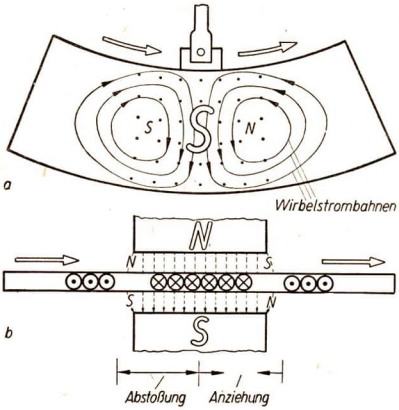


Abb. 57/2
Waltenhofensches Pendel

Abb. 58/1. Entstehung von Wirbelströmen beim Waltenhofenschen Pendel



Zwischen den Polen eines starken Elektromagneten kann eine Scheibe aus Aluminium oder Kupfer pendeln. Ist der Elektromagnet stromlos, so schwingt das Pendel mehrmals hin und her. Seine Ausschläge werden nur allmählich kleiner. Sobald man jedoch einen Strom durch den Elektromagneten fließen läßt, wird die Pendelschwingung so stark gedämpft, daß das Pendel sehr schnell zur Ruhe kommt.

In der Metallscheibe entstehen infolge der Bewegung im Magnetfeld Induktionsspannungen, die jeweils im Gebiet zwischen den Magnetpolen besonders hohe Werte erreichen (Abb. 58/1). Da diese Spannungen auf einem ausgedehnten flächenhaften Leiter entstehen, kommt es zu Induktionsströmen. Diese verlaufen auch außerhalb des jeweils zwischen den Magnetpolen liegenden Teiles der schwingenden Platte. Nach ihrer Form werden sie *Kreis-* oder *Wirbelströme* genannt. Die Wirbelströme müssen nach der Lenzschen Regel so gerichtet sein, daß sie der Ursache der Induktion, nämlich der Bewegung, entgegenwirken. Die Scheibe wird daher durch Anziehung ungleichnamiger beziehungsweise durch Abstoßung gleichnamiger Pole gebremst. Daher kommt das Pendel wegen der Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld des Elektromagneten und den Magnetfeldern der Wirbelströme zur Ruhe.

Die Wirbelströme werden in der Technik ausgenutzt. Nach dem Prinzip des Waltenhofenschen Pendels hat man *Bremsvorrichtungen* konstruiert.

In den *Ankern von Motoren und Generatoren* sind die Wirbelströme

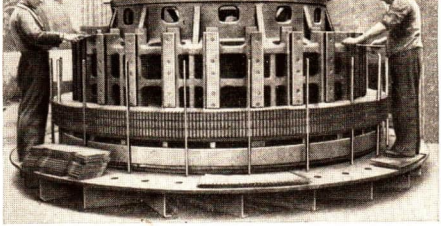


Abb. 58/2
Geblätterter Eisenkern

wegen ihrer Bremswirkung unerwünscht. Auch in ruhenden Teilen können durch veränderliche Magnetfelder Wirbelströme entstehen, beispielsweise in *Transformatoren*. Da der elektrische Widerstand in massiven Metallteilen nur ganz gering ist, wird ihre Stromstärke sehr groß. Das führt zu erheblichen Wärmewirkungen und damit zu großen Energieverlusten.

Man muß deshalb die Ausdehnung von Wirbelströmen verhindern. Das erreicht man weitgehend durch Einschnitte der Metallkörper. Zum Nachweis der Vermeidung von starken Wirbelströmen dient der Versuch mit einem kammähnlichen Einsatz (vgl. Abb. 57/2). Seine Schwingungen werden durch Wirbelströme kaum gebremst. In ähnlicher Weise setzt man auch die Eisenkerne der Spulen in elektrischen Geräten aus *einzelnen dünnen Blechen* zusammen, die gegeneinander durch Ölpapier oder durch Wasserglas isoliert sind. Man nennt sie geblätterte Kerne (Abb. 58/2). In den einzelnen Blechen treten zwar auch noch Wirbelströme auf, die aber erheblich schwächer als in einem Volleisenkern sind.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie die Selbstinduktion von der allgemeinen elektromagnetischen Induktion. Beschreiben Sie die Vorgänge bei der Selbstinduktion!
2. Sprechen Sie über störende Auswirkungen der Selbstinduktion!
3. Zeigen Sie, wie man bei der Leuchtstoffröhre die Wirkung der Selbstinduktion ausnutzt!
4. Begründen Sie die Notwendigkeit, Spulenkerne aus geblättertem Eisen herzustellen!
5. Wie kann die Richtung der Wirbelströme mit Hilfe der Lenzschen Regel erklärt werden?

9. Die Erzeugung von Wechselstrom

1. Die Bedeutung des Induktionsgesetzes für die Spannungserzeugung. Die elektromagnetische Induktion bildet die Grundlage für die Gewinnung elektrischer Energie aus mechanischer Energie. Wie die Grundversuche zur Erzeugung von Induktionsspannungen zeigen, gibt es verschiedene Möglichkeiten: die geradlinige Bewegung der Spule oder des Magneten (vgl. S. 48) und die Drehbewegung. Die geradlinige Bewegung ist technisch ungünstig, weil die hin- und hergleitende Masse der Spulen beziehungsweise des Magneten an den Enden der Bewegungsbahn immer wieder abgebremst und neu in Bewegung gesetzt werden muß. Die Drehbewegung ist demgegenüber wegen ihrer gleichbleibenden Drehrichtung und vor allem wegen der gleichbleibenden Geschwindigkeit viel vorteilhafter und wird deshalb ausschließlich angewandt. Man muß jedoch darauf achten, daß die Drehachse senkrecht zu den Feldlinien verläuft. Spannungserzeuger, die auf der Grundlage des Induktionsgesetzes entwickelt wurden, nennt man meist **Generatoren.** Man gebraucht dieses Wort jedoch auch in einem umfassenderen Sinn. So werden auch Geräte, mit denen hohe Spannungen erzeugt werden, als Generatoren bezeichnet, obwohl sie auf Grund anderer physikalischer Gesetze wirken.

Die Drehbewegung läßt sich durch Kurbeln, Motoren oder Turbinen erzeugen. Mit der Entwicklung der Generatoren ist es den Wissenschaftlern und Technikern gelungen, unter Anwendung eines physikalischen Gesetzes eine elektrische Energiequelle zu schaffen, die eine grundlegende Bedeutung für die gesamte Technik hat. Es gibt sehr verschiedenartige Generatoren in unterschiedlichen Größen, vom kleinen Generator am Fahrrad bis zu den Großgeneratoren in den Kraftwerken.

2. Die Erzeugung von Wechselspannungen in einer drehbaren Spule. Die Wirkungsweise eines Wechselstromgenerators soll an einem einfachen Modell erläutert werden (Abb. 60/1). Eine rechteckige Spule ist auf einer Welle in einem homogenen Magnetfeld so gelagert, daß sich bei ihrer Drehung das von ihr umfaßte Feld ständig ändert. Die Enden der Spule sind an zwei Schleifringe aus Metall angeschlossen, die gegeneinander isoliert sind. Auf diesen Ringen schleifen zwei Metallfedern oder Kohlebürsten. An sie wird ein Drehspulinstrument mit Nullpunktmittellage angeschlossen.

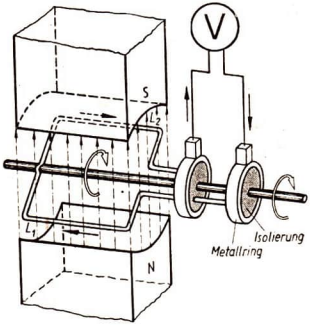


Abb. 60/1
Modell eines Wechselstromgenerators

Versetzt man die Spule in langsame Umdrehungen, so beobachtet man an dem Meßinstrument abwechselnd einen Ausschlag nach beiden Seiten. Dieser wechselnde Ausschlag zeigt eine die Polarität wechselnde Spannung, eine Wechselspannung, an. *In der rotierenden Induktionsspule wird eine Wechselspannung induziert.*

In Abbildung 60/2 wird die Entstehung einer Wechselspannung in der Spule erläutert. Zur Vereinfachung der Darstellung ist nur eine Windung gezeichnet. Infolge der Drehung umfaßt die Spule fortlaufend immer einen verschieden großen Teil des Magnetfeldes. Bei der Drehung von *I* nach *III* und von *V* nach *VII* umfaßt die Spule einen immer kleineren Bereich des Feldes, während sie bei der Drehung von *III* nach *V* und von *VII* nach *I* wieder von einem größeren Teil des Feldes durchsetzt wird.

Nach der Lenzschen Regel läßt sich für jede Vierteldrehung der Spule die Richtung des Magnetfeldes, das vom Induktionsstrom verursacht wird, bestimmen. Bei den

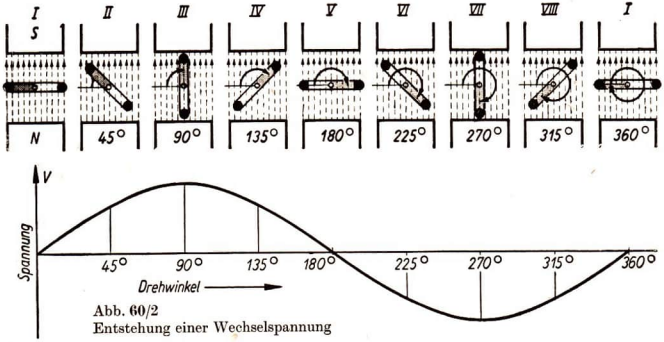


Abb. 60/2
Entstehung einer Wechselspannung

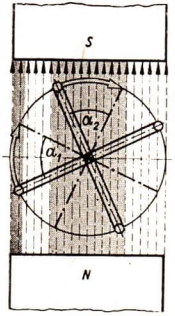


Abb. **61**/1
Gleiche Drehwinkel bei unterschiedlicher Stellung der Spule

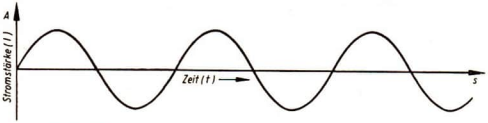


Abb. **61**/2. Wechselstromkurve

Vierteldrehungen von *I* nach *III* und von *V* nach *VII* muß das Magnetfeld der Spule mit dem induzierenden Feld gleichgerichtet sein; denn die Ursache der Induktion besteht in dem Schwächerwerden des von der Spule umfaßten Feldes. Bei den beiden anderen Vierteldrehungen ist das Feld des Induktionsstromes dem induzierenden Feld entgegengerichtet. Mit Hilfe der Rechte-Faust-Regel kann man die Stromrichtungen für die einzelnen Vierteldrehungen bestimmen (vgl. Abb. **60**/2).

Der Induktionsstrom und die Induktionsspannung wechseln dann ihre Richtung, wenn die Ebene der Spulenwindungen senkrecht zu den Feldlinien liegt. Im gleichen Moment umschließt die Spule den größten Teil des Feldes. Bei gleichmäßiger Drehung der Spule werden gleiche Drehwinkel in gleichen Zeiten durchlaufen (Abb. **61**/1). Bei dem Drehwinkel in der Nähe der Stellung parallel zu den Feldlinien ist die Änderung des von der Spule umfaßten Feldes größer als in der Nähe der Stellung senkrecht zu den Feldlinien. Daher erreicht die Induktionsspannung beim Durchgang der Spule durch die erste Stellung ihre Höchstwerte.

In der Abbildung **60**/2 ist unter der jeweils augenblicklichen Stellung der sich drehenden Spule die zugehörige Induktionsspannung eingezeichnet. Trägt man mehrere Spannungswerte als Ordinaten in ein Achsenkreuz ein, so entsteht ein *Schaubild über den Verlauf der induzierten Wechselspannung.* Sie ändert jeweils nach einer halben Umdrehung ihre Richtung. Dementsprechend fließt der Strom in einem angeschlossenen Stromkreis in regelmäßig wechselnder Richtung und in ständig wechselnder Stärke. Die Abbildung **61**/2 zeigt die *graphische Darstellung eines Wechselstromes* in Abhängigkeit von der Zeit.

Dreht sich eine Spule in einem Magnetfeld, so wird in ihr eine Wechselspannung induziert. Diese ändert ständig ihre Größe und wechselt ihre Polarität in regelmäßigen Zeitabständen. Während einer Umdrehung der Spule steigt die Spannung von Null auf einen Höchstwert an, fällt wieder auf Null ab, wechselt ihre Polarität und erreicht in umgekehrter Richtung wieder ihren Höchstwert, um schließlich wieder auf Null zurückzugehen.

In einem geschlossenen Stromkreis fließt als Folge dieser Spannung ein ihr entsprechender Wechselstrom.

3. Frequenz, Frequenzmessung und Sichtbarmachung des Spannungsverlaufs. Bei jeder Umdrehung der Induktionsspule wiederholt sich die Änderung der Spannung in der gleichen Weise. Einen solchen regelmäßig wiederkehrenden Vorgang bezeichnet man als *periodisch.* Man kann ihn mit dem Schwingen eines Pendels vergleichen. Den

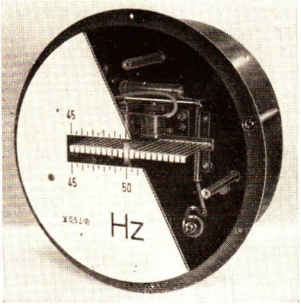


Abb. **62**/1. Zungenfrequenzmesser

Verlauf der Wechselspannung während einer Umdrehung nennt man deshalb auch **Schwingung.** Die Zeitdauer einer Schwingung heißt **Periode.** Die Anzahl der Schwingungen der Spannung in einer Sekunde nennt man die **Frequenz** der Wechselspannung. Die Maßeinheit der Frequenz hat man zu Ehren des Entdeckers der elektromagnetischen Wellen, *Heinrich Hertz*, **Hertz** (Hz) genannt. 1 Hz ist die Frequenz von einer Schwingung je Sekunde. Die Maßeinheit Hertz wird bei allen Schwingungsvorgängen benutzt. Dreht man eine Induktionsspule zwischen zwei Polen eines Magneten in 1 s um 360°, so induziert man in ihr eine Wechselspannung mit der Frequenz von 1 Hz. Der technische Wechselstrom, den man dem Lichtnetz entnimmt, hat eine Frequenz von 50 Hz.

Zum Messen der Frequenz technischer Wechselströme benutzt man meist *Zungenfrequenzmesser* (Abb. **62**/1). Durch einen langgestreckten Elektromagneten fließt der Wechselstrom, dessen Frequenz man messen will. Über dem Elektromagneten ist eine Reihe von Stahlzungen angebracht, deren *Eigenfrequenz* gegeneinander abgestuft ist. Unter Eigenfrequenz versteht man die Schwingungszahl, mit der eine solche Zunge schwingt, wenn man sie einmal aus der Ruhelage herausbringt und dann losläßt. In dem magnetischen Wechselfeld des Elektromagneten gerät die Zunge in die stärksten Schwingungen, deren Eigenfrequenz mit der Frequenz des Wechselfeldes und damit mit der Frequenz des Wechselstromes übereinstimmt. Die benachbarten Zungen schwingen noch etwas mit, während die übrigen in Ruhe bleiben (Abb. **62**/2).

Den Verlauf der Wechselspannung kann man auf verschiedene Weise sichtbar machen. In den Induktionsversuchen wurden Wechselspannungen von sehr geringer Frequenz induziert. Ihre Schwingungen gab noch *der pendelnde Zeiger eines Drehspulinstrumentes* wieder. Bei höheren Frequenzen kann der Zeiger infolge seiner Trägheit den Schwingungen nicht mehr folgen. Er bleibt in der Nullstellung stehen. Deshalb muß man zur Veranschaulichung weniger träge Instrumente benutzen.

Mit dem *Polsucher* stellt man bei Leitungsarbeiten fest, welche Leitungen eine Spannung führen. Er enthält eine Stabglimmlampe. Dies ist eine fast luftleer gepumpte Glasröhre, die mit Neongas gefüllt ist. Von den Enden der Glasröhre ragen zwei Drahtstifte als Elektroden hinein. Verbindet man die Elektroden mit den Polen einer Gleichspannungsquelle, so überzieht sich die negative Elektrode mit einem

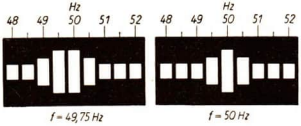
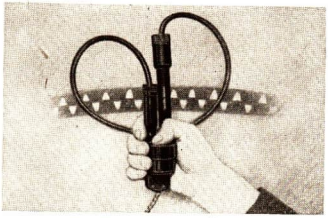


Abb. **62**/2. Schwingende Zungen am Frequenzmesser

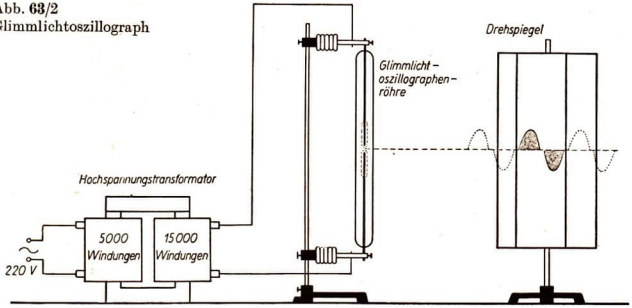
Abb. 63/1. Bewegter Polsucher



rötlichen Glimmlicht. Legt man die Stecker eines Polsuchers dagegen an eine Wechselspannung, so sind beide Elektroden mit Glimmlicht überzogen. Bewegt man aber den Polsucher hin und her, so sieht man ein gezacktes Lichtband, wie es in die Abb. 63/1 nachträglich eingezeichnet wurde. Aus der Form des Lichtbandes erkennt man, daß es sich um eine Wechselspannung handelt. Das gleiche Bild ist zu sehen, wenn man die Glimmlampe aufrechtstehend festhält und ihr Bild in einem Drehspiegel betrachtet (Abb. 63/2). Diese Anordnung bezeichnet man als Glimmlichtoszillographen.

Auch mit einem *Schleifenoszillographen* kann man den Verlauf einer Wechselspannung sichtbar machen (Abb. 64/1). Sein Aufbau entspricht dem des Drehspulinstruments. An Stelle der Spule befindet sich zwischen den Polen eines permanenten Magneten eine langgestreckte Drahtschleife oder eine kleine sehr leicht drehbare Spule (Abb. 64/2). Statt des Zeigers ist auf den beiden Drähten der Schleife ein kleiner Spiegel befestigt. Die Drahtschleife mit dem Spiegel ist bei weitem nicht so träge wie eine Spule mit Zeiger. Wird die Drahtschleife von einem Wechselstrom durchflossen, so treten zwischen dem magnetischen Wechselfeld des Stromes und dem konstanten Feld des Magneten anziehende und abstoßende Wirkungen auf. Die Schleife mit dem Spiegel gerät dadurch in Drehschwingungen, deren Frequenz der des Wechselstromes entspricht. Von einer Lichtwurflampe wird ein Strahlenbündel auf den kleinen Spiegel geworfen und weiter von diesem über einen Drehspiegel auf einen Bildschirm gelenkt. Durch die Schwingungen des Spiegels im Schleifenoszillographen wird das Strahlenbündel auf- und abwärts gelenkt und durch den Drehspiegel in

Abb. 63/2
Glimmlichtoszillograph



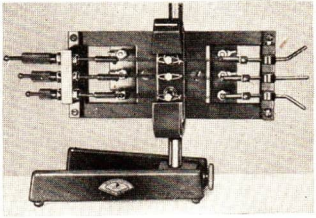


Abb. **64/1.** Schleifenoszillograph

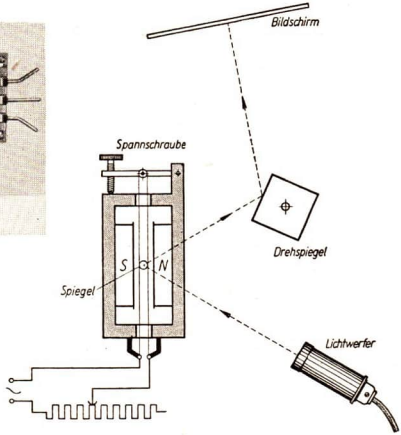


Abb. **64/2.** Wirkungsweise eines Schleifenoszillographen

waagerechter Richtung hin- und herbewegt. Aus beiden Bewegungen ergibt sich auf dem Bildschirm die Wechselstromkurve.

Zum Sichtbarmachen von Wechselspannungen mit sehr hohen Frequenzen ist auch der *Schleifenoszillograph* noch zu träge. Ein Elektronenstrahl reagiert dagegen fast trägheitslos auf die angelegten Spannungsschwingungen. Im *Katodenstrahloszillographen* zeichnet ein solcher Elektronenstrahl das Schwingungsbild hochfrequenter Wechselspannungen auf (Abb. **64/3**).

Abb. **64/3.** Katodenstrahloszillograph

4. Die Anwendungen des Wechselstromes. Wie beim Drehspulinstrument hängt die Arbeitsweise mancher Geräte davon ab, ob sie von Gleich- oder Wechselstrom durchflossen werden. Für die *Elektrolyse* und zum *Laden von Akkumulatoren* kann kein Wechselstrom verwendet werden, da bei diesen Vorgängen der Strom immer in der gleichen Richtung fließen muß. Steht für diese Zwecke nur eine Wechsel-

spannung zur Verfügung, so muß man den Wechselstrom in Gleichstrom umformen, beispielsweise mit Hilfe eines Gleichrichters.

Eine *Glühlampe* kann dagegen sowohl an eine Gleichspannungs- wie auch an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen werden. Für die Erwärmung des Glühfadens in der Lampe ist es belanglos, in welcher Richtung der Strom durch sie fließt. Dasselbe gilt für *alle elektrischen Wärmegeräte.*

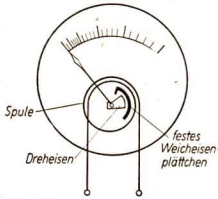


Abb. 65/1
Dreheiseninstrument

Im *Dreheiseninstrument* dreht sich der Eisenanker unter dem Einfluß des Magnetfeldes eines Wechselstromes ebenso wie bei einem Gleichstrom (Abb. 65/1). Das Magnetfeld des festen Eisenplättchens im Meßwerk wird durch den Richtungswechsel des Wechselstromes zwar dauernd umgepolt, aber genauso wird das bewegliche Weicheisenplättchen ständig ummagnetisiert. Dadurch treten stets abstoßende Kräfte zwischen den beiden Plättchen auf, so daß der Zeiger die Stromstärke anzeigt. Mit dem Dreheiseninstrument kann man daher auch Wechselspannungen und Wechselströme messen.

Manche elektrischen Geräte sind nur für den Betrieb mit Wechselstrom gebaut. So benutzt man in *Wechselstromklingeln* das vom Wechselstrom erzeugte Wechselfeld für das Hin- und Herbewegen eines magnetischen Ankers. Ähnliche *Schwingankersysteme* findet man in einigen *elektrischen Rasierapparaten* und in *elektrischen Laubsägen.* In einem *Transformator* wird mit Hilfe von zwei Spulensystemen eine hohe Wechselspannung in eine niedrigere umgeformt oder umgekehrt. Die Wirkungsweise beruht ebenfalls auf der elektromagnetischen Induktion.

5. Technische Wechselstromgeneratoren. In technischen Wechselstromgeneratoren sind die Induktionsspulen im Gegensatz zu dem auf S. 60 beschriebenen Modell auf Eisenkerne gewickelt. Der Eisenkern erhöht die Induktivität der Spule, so daß in ihr wesentlich höhere Induktionsspannungen entstehen. Eine solche drehbare Spule mit Eisenkern nennt man *Anker.*

Einer der einfachsten Wechselstromgeneratoren ist der *Kurbelinduktor* (Abb. 65/2). Zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten ist ein *Doppel-T-Anker* drehbar ge-

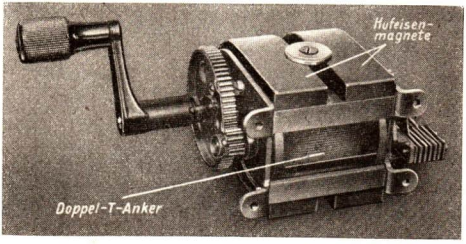


Abb. 65/2. Kurbelinduktor

Abb. 65/3. Doppel-T-Anker

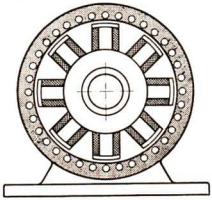


Abb. 66/1. Vereinfachter Schnitt durch einen Wechselstromgenerator (Innenpolmaschine) mit acht Polen

lagert (Abb. 65/3). Der Eisenkern dieses Ankers ist eine zylindrische Walze, in deren Mantelfläche zwei Längsnuten eingefräst sind. Der Querschnitt hat die Form eines doppelten T. Die Enden der Ankerwicklung liegen an zwei Schleifringen, auf denen als Stromabnehmer Metallfedern oder Kohlestifte schleifen. Man bevorzugt Kohlestifte, da diese die Schleifringe nicht zerkratzen und nicht verschmieren. Im allgemeinen sind sie auswechselbar. Der Anker wird von einer Handkurbel über ein Zahnradgetriebe in Drehung versetzt.

Kurbelinduktoren sind beispielweise in Feldfernsprecher eingebaut, wie sie bei den Einheiten unserer Nationalen Volksarmee und der Gesellschaft für Sport und Technik verwendet werden. Mit dem Kurbelinduktor wird die Rufklingel beim Gesprächspartner betätigt.

Kleine Generatoren sind auch *Fahrraddynamos*, die in verschiedenen Ausführungen gebaut werden. Eine Ausführung gleicht fast der des Kurbelinduktors. Das Magnetfeld wird von permanenten Magneten erzeugt, die an der Innenwand des Gehäuses sitzen. In neueren Typen sind sie nicht aus Stahl, sondern aus Maniperm hergestellt (Abb. 66/2). Dadurch ist es möglich, das Gerät kleiner zu bauen als mit Stahlmagneten. Der Anker ist in den einzelnen Typen insofern unterschiedlich ausgeführt, als die Induktionsspule in verschiedener Weise auf einen Eisenkern gewickelt ist. Das eine Ende der Induktionsspule beziehungsweise des Spulensystems ist über die Welle mit dem Gehäuse leitend verbunden. Das andere Ende liegt an einem Kontakt am unteren Wellenende, der gegen die Welle isoliert ist. Auf diesem schleift ein Kohlestift, der mit der Anschlußklemme verbunden ist.

Generatoren dieser Bauart bezeichnet man als *Außenpolmaschinen*, weil die Magnetpole am äußeren Teil der Maschine, an dem feststehenden Gehäuse, liegen.

Da die Ursache der elektromagnetischen Induktion lediglich in der relativen Bewegung zwischen Magnet

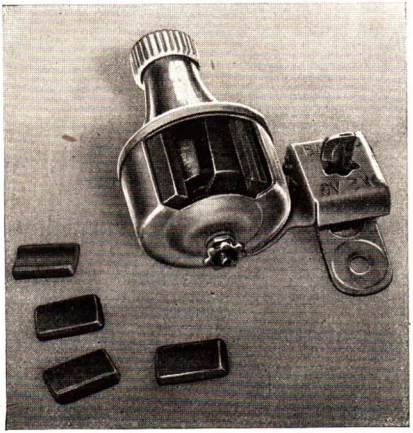


Abb. 66/2. Fahraddynamo (geöffnet). Das Magnetfeld wird mit Hilfe von keramischen Magneten erzeugt. Innerhalb dieser Magnete dreht sich die Induktionsspule

und Induktionsspulen liegt, kann auch der Magnet zwischen ruhenden Induktionsspulen gedreht werden. Dementsprechend gibt es auch Ausführungen von Fahrraddynamos, die man als *Innenpolmaschinen* bezeichnet (Abb. **66**/1). Hier trägt der drehbare innere Teil des Generators die Magnetpole, und zwar ist auf der Welle ein vierpoliger Stahlmagnet befestigt, bei dem Nord- und Südpol abwechselnd nebeneinanderliegen. An der Innenseite des Gehäuses sind vier Induktionsspulen montiert.

Innenpolmaschinen haben den Vorteil, daß der Induktionsstrom nicht über Schleifkontakte abgenommen zu werden braucht. Man vermeidet dadurch die Kontaktfunken und vereinfacht auch die Konstruktion der Maschine. Die Vorzüge der Innenpolmaschinen gegenüber den Außenpolmaschinen treten besonders bei den maschinell angetriebenen Großgeneratoren hervor. Die von ihnen erzeugten Ströme mit einer Stärke bis zu einigen tausend Ampere kann man kaum noch über Schleifkontakte abnehmen.

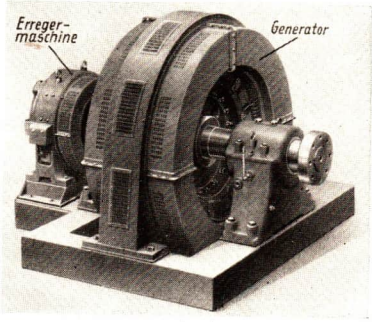


Abb. **67**/1. Generator mit Erregermaschine

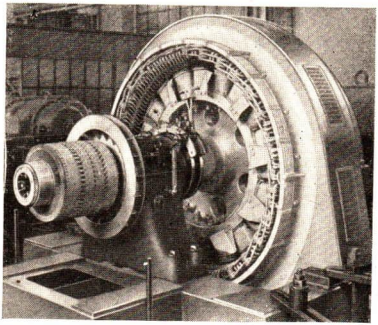


Abb. **67**/2. Rotor als Polrad

Da in den Großgeneratoren starke Magnetfelder benötigt werden, muß man an Stelle von Permanentmagneten Elektromagneten benutzen. Der Erregerstrom für die Elektromagnete wird über Schleifkontakte den Magnetspulen auf der Welle zugeführt. Der Erregerstrom ist aber im Verhältnis zu dem erzeugten Wechselstrom sehr gering. So führt man bei Innenpolmaschinen den schwachen Erregerstrom über Schleifkontakte zu und den starken Induktionsstrom über feste Verbindungen ab. Zum Erzeugen des Erregerstromes ist ein kleiner Gleichstromgenerator, die *Erregermaschine*, fest an die Welle des Hauptgenerators angekuppelt (Abb. **67**/1).

Den drehbaren inneren Teil des Generators bezeichnet man als *Läufer*, als *Rotor* oder als *Induktor* und das Gehäuse mit den Induktionsspulen als *Ständer* oder *Stator*. Einen Rotor mit mehreren Magnetpolen nennt man auch *Polrad* (Abb. **67**/2). Die

Induktionsspulen am Stator sind meist nicht auf Polschuhe gewickelt, sondern liegen nach einem Wicklungsschema in Nuten, die in das Eisen des Stators eingearbeitet sind. Wechselstromgroßgeneratoren werden heute fast nur noch zur Speisung elektrifizierter Bahnanlagen verwendet.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Bauen Sie aus einfachen Mitteln (Hufeisenmagnet, Stricknadel, Eisenblech, Spulendraht, Isolierband und Pappe) ein Modell eines Wechselstromgenerators!
2. Warum werden Wechselstromgeneratoren meist als Innenpolmaschinen gebaut?
3. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Wechselstromgenerators am Beispiel eines Fahrraddynamos!

10. Die Gesetze des Wechselstromkreises

1. Effektivwerte der Spannung und der Stromstärke. Wie bereits erläutert wurde, verrichtet auch der Wechselstrom Arbeit. Zum Erwärmen eines elektrischen Heizgerätes ist eine bestimmte elektrische Arbeit notwendig. Diese kann von einem Gleichstrom, aber auch von einem Wechselstrom verrichtet werden. Auf Grund dieser Wärmewirkung kann man Gleich- und Wechselströme miteinander vergleichen. Ein Gleichstrom und ein Wechselstrom haben dann die gleiche Wirksamkeit, den gleichen „Effekt", wenn sie in der gleichen Zeit die gleiche Arbeit verrichten.

Ein Gleichstrom hat bei konstanter Spannung eine konstante Stromstärke, solange er unter denselben Bedingungen fließt. Er hat damit auch eine gleichbleibende Leistung. Beim Wechselstrom ändern sich jedoch Spannung und Stromstärke periodisch und mit ihnen auch die Leistung. Das bedeutet, daß der Wechselstrom seine Arbeit nicht gleichmäßig verrichtet. Die Abbildung 68/1 zeigt die graphischen Darstellungen eines Gleich- und eines Wechselstromes von gleicher Wirksamkeit. Die Arbeit, die das

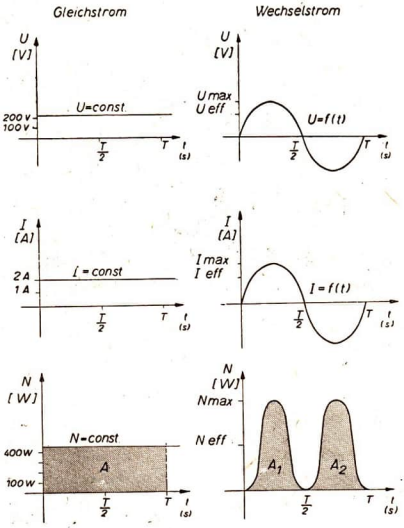


Abb. 68/1. Graphische Darstellung eines Gleich- und eines Wechselstromes

Produkt aus der Leistung und der Zeit ist, wird durch die Flächen zwischen der Leistungskurve ($U \cdot J$) und der Zeitachse gemessen. Diese Flächen sind bei beiden Strömen gleich groß. Es wird also in beiden Fällen in der gleichen Zeit die gleiche Arbeit verrichtet.

Es ist jedoch deutlich zu erkennen, daß die Spannungs- und Stromstärkewerte des Gleichstroms kleiner sind als die Spannungshöchstwerte U_{max} und Stromstärkenhöchstwerte I_{max} des hinsichtlich der Wirksamkeit gleichwertigen Wechselstromes. Deshalb bemißt man die Wechselströme nicht mit ihren *Maximalwerten*, sondern mit Werten, die einem Gleichstrom entsprechen, der in der gleichen Zeit die gleiche Arbeit verrichtet. Diese Werte nennt man *Effektivwerte*. (U_{eff} und I_{eff}). Durch Berechnungen ermittelt man die Beziehung zwischen den Effektivwerten und den Maximalwerten des Wechselstromes:

die *effektive Spannung*: $$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7\ U_{max},$$

die *effektive Stromstärke*: $$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7\ I_{max},$$

die *effektive Leistung*: $$N_{eff} = \frac{N_{max}}{2} = 0{,}5\ N_{max}.$$

Alle Wechselstrommeßinstrumente zeigen die Effektivwerte an. Liest man eine Wechselspannung zu 220 V ab, so bedeutet dies, daß die effektive Spannung 220 V beträgt. Die maximale Spannung hat dann den Wert $220 \cdot \sqrt{2}$ V $\approx$ 311 V.

Die Effektivwerte des Wechselstromes entsprechen den Werten eines Gleichstromes, der in der gleichen Zeit die gleiche Arbeit verrichtet.
Wechselstrommeßgeräte zeigen die Effektivwerte der Wechselspannung und der Wechselstromstärke an.

2. Der Wechselstromwiderstand — Ohmscher und induktiver Widerstand. In einem Gleichstromkreis stehen Stromstärke, Spannung und Widerstand in einem bestimmten gesetzmäßigen Zusammenhang zueinander, den man bekanntlich als das *Ohmsche* Gesetz bezeichnet. Inwieweit gilt nun dieses Gesetz auch für den Wechselstromkreis?

Ein geradlinig ausgespannter Widerstandsdraht wird über ein Amperemeter zunächst an eine Gleich-, dann an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen (Abbildung **70**/1a). Dabei werden folgende Werte gemessen:

a) Gleichspannung $U = 6$ V, Wechselspannung $U_{eff} = 6$ V,
Gleichstromstärke $I = 1$ A, Wechselstromstärke $I_{eff} = 1$ A.

Der Widerstandsdraht wird nun auf eine kleine Pappröhre zu einer Spule gewickelt. Jetzt ergeben sich bei gleichen Spannungen folgende Meßwerte für die Stromstärke:

b) Gleichstromstärke $I = 1$ A, Wechselstromstärke $I_{eff} = 0{,}6$ A.

Sobald man einen Eisenkern in die Spule schiebt, sinkt die Stromstärke im Wechselstromkreis noch weiter ab:

c) Gleichstromstärke $I = 1$ A, Wechselstromstärke $I_{eff} = 0{,}3$ A.

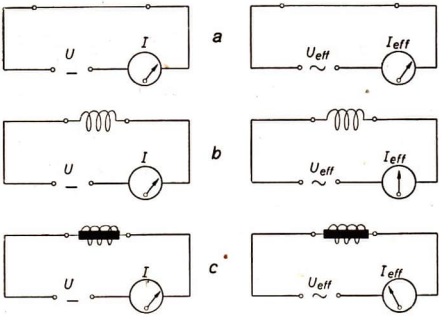


Abb. 70/1. Der Widerstand im Wechselstromkreis
a) gerader Leiter, b) Spule, c) Spule mit Eisenkern

Während sich die Stromstärke im Wechselstromkreis verändert, fließt bei jeder Gestalt und Anordnung des Widerstandsdrahtes (ausgestreckt, Spule mit oder ohne Kern) stets ein gleichstarker Gleichstrom. Ein und derselbe Leiter hat im Gleichstromkreis unabhängig davon, in welcher Form und um welche Körper der Leiter verläuft, immer den gleichen Widerstand. Nach dem Ohmschen Gesetz für den Gleichstromkreis ist der Widerstand des Leiters

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6}{1}\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = 6\,\Omega\,.$$

Diesen Widerstand bezeichnet man als **Ohmschen Widerstand.** Er spielt vor allem bei den Wärmegeräten eine große Rolle. Auch wenn diese Geräte an Wechselstrom angeschlossen werden, tritt nur ohmscher Widerstand auf.

Im Wechselstromkreis dagegen hängt der Widerstand eines Leiters auch von seiner Form und seiner Anordnung gegenüber anderen Körpern ab. Während der Leiter als geradliniger Draht dem Wechselstrom den gleichen Widerstand entgegensetzt wie dem Gleichstrom, hat er als Spule unter sonst gleichen Bedingungen einen größeren Widerstand. Die Ursache dieses unterschiedlichen Widerstandes liegt darin, daß die Spule gegenüber dem geradlinigen Leiter die Eigenschaft der Induktivität besitzt (vgl. S. 56). Die Induktivität und damit der Widerstand sind größer, wenn man in die Spule einen Eisenkern steckt. Infolge der Selbstinduktion treten in den Spulen bekanntlich Gegenspannungen auf, die den Stromfluß behindern, so daß die Stromstärke nicht denselben Wert wie im Gleichstromkreis erreichen kann. Die Induktivität der Spule wirkt daher wie ein zusätzlicher Widerstand. Man nennt den Widerstand, der bei spulenförmigen Leitern im Wechselstromkreis zum Ohmschen Widerstand hinzutritt, den **induktiven Widerstand.** Ohmscher und induktiver Widerstand bilden zusammen den *Wechselstromwiderstand* eines spulenförmig angeordneten Leiters.

Zur Berechnung des Wechselstromwiderstandes R_w muß man das Ohmsche Gesetz $I = \frac{U}{R}$ auf den Wechselstromkreis erweitern, wobei jedoch der Wechselstromwiderstand nicht einfach die Summe aus dem ohmschen und dem induktiven Widerstand ist. Es gilt:

$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{R_w}\,.$$

Der Wechselstromwiderstand ist daher

$$R_w = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}.$$

In den drei Versuchen treten somit folgende Wechselstromwiderstände auf:

a) $R_w = \frac{6}{1}\,\frac{\text{V}}{\text{A}} = 6\,\Omega.$

Der induktive Widerstand des Leiters als ausgestreckter Draht ist Null. Daher ist der Wechselstromwiderstand gleich dem Ohmschen Widerstand.

b) $R_w = \frac{6}{0{,}6}\,\frac{\text{V}}{\text{A}} = 10\,\Omega.$

c) $R_w = \frac{6}{0{,}3}\,\frac{\text{V}}{\text{A}} = 20\,\Omega.$

Der Widerstand, den ein Leiter dem Gleichstrom entgegensetzt, heißt Ohmscher Widerstand.

$$\boxed{R = \frac{U}{I}}.$$

Im Wechselstromkreis besitzt ein spulenförmiger Leiter neben seinem Ohmschen Widerstand noch einen induktiven Widerstand (R_L). Beide zusammen ergeben den Wechselstromwiderstand.

$$\boxed{R_w = R_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}}.$$

3. Die Bestimmungsgrößen des induktiven Widerstands. Wie die Versuche zeigen, nimmt der induktive Widerstand der Spule mit der Einführung eines Eisenkerns zu. Da der Eisenkern die Induktivität der Spule erhöht, vergrößert sich der induktive Widerstand offensichtlich mit zunehmender Induktivität. Die Tabelle auf S. 72 enthält die Ergebnisse einer Versuchsreihe, aus der diese Abhängigkeit hervorgeht.

Man erkennt aus der Tabelle, daß der Wechselstromwiderstand mit zunehmender Windungszahl nicht allein wegen des jeweils größeren Ohmschen Widerstandes anwächst, sondern vor allem wegen des zusätzlichen induktiven Widerstands. Vergleicht man hierzu die Tabelle auf S. 56, so erkennt man den Zusammenhang zwischen der Induktivität und dem induktiven Widerstand.

Je größer die Induktivität einer Spule ist, um so größer ist auch ihr induktiver Widerstand.

Benutzt man als Wechselspannungsquelle einen kleinen Wechselstromgenerator, so kann man durch Änderung der Drehzahl die Frequenz des Wechselstromes ändern.

Abhängigkeit des induktiven Widerstands einer Spule von der Induktivität
($f = 50$ Hz)

Windungszahl	125	250	500	750	1500	15000
Gleichstromkreis						
U (V)	2	2	2	2	2	2
I (A)	5	2,5	0,7	0,5	0,12	0,001
$R = \frac{U}{I}$ (Ω)	0,4	0,8	2,9	4	17	2000
Wechselstromkreis						
a) Spule ohne Kern						
U_{eff} (V)	4	4	4	4	4	4
I_{eff} (A)	6	3,5	1,1	0,6	0,16	0,008
$R_w = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ (Ω)	0,7	1,1	3,6	6,7	25	500
b) Spule mit I-Kern						
U_{eff}	6	6	6	6	6	6
I_{eff}	6	2	0,5	0,2	0,06	0,0005
$R_w = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	1	3	12	30	100	12000
c) Spule mit geschlossenem Kern						
U_{eff}	20	20	20	20	20	20
I_{eff}	1,3	0,3	0,08	0,045	0,016	0,0002
$R_w = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	15	67	250	450	1300	100000

Läßt man Wechselströme von verschiedener Frequenz aber gleicher Spannung durch eine Spule mit Eisenkern fließen, so zeigt ein Amperemeter bei einer niedrigen Frequenz eine größere Stromstärke und bei höherer Frequenz eine geringere Stromstärke an (Abb. 72/1). Das zeigt:

Mit zunehmender Frequenz wird der induktive Widerstand größer.

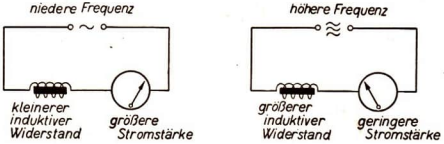


Abb. 72/1. Frequenzabhängigkeit des induktiven Widerstandes

Die Ursache für die *Abhängigkeit des induktiven Widerstands von der Frequenz* liegt darin, daß bei höherer Frequenz die periodischen Stromschwankungen schneller erfolgen. Daher ändert sich auch das Magnetfeld

in der Spule schneller als bei niedriger Frequenz. Daraus ergeben sich nach dem Induktionsgesetz höhere Selbstinduktionsspannungen. Diese Spannungen wirken aber der angelegten Spannung entgegen.

Der Ohmsche Widerstand wird allein vom Material, von den Abmessungen und von der Temperatur des Leiters bestimmt. Der induktive Widerstand dagegen hängt nicht allein vom Leiter selbst, sondern auch von der Frequenz des Stromes ab. Eine Spule hat zwar eine ganz bestimmte Induktivität, aber ihr induktiver Widerstand ist für Ströme unterschiedlicher Frequenz verschieden.

Der induktive Widerstand einer Spule ist um so größer, je größer ihre Induktivität und je höher die Frequenz des Wechselstromes ist.

4. Der kapazitive Widerstand und seine Bestimmungsgrößen. Ein Kondensator wird an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen (Abb. **73**/1). Abgesehen von einem kurzen Aufladestromstoß fließt in dem Stromkreis kein Strom. *Der Kondensator sperrt den Gleichstrom.* Er bedeutet für den Gleichstromkreis eine Unterbrechung. Ersetzt man die Gleichspannungsquelle durch eine Wechselspannungsquelle, so zeigt das Amperemeter einen Strom an. *Ein Wechselstromkreis wird also durch einen Kondensator nicht unterbrochen.*

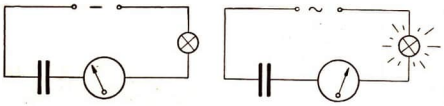


Abb. **73**/1. Kondensator im Gleich- beziehungsweise Wechselstromkreis

Steigt die Spannung im Verlaufe der Wechselspannungsschwingung an, so wird der Kondensator aufgeladen (Abb. **73**/2/I). Sinkt die Spannung ab, so wird der Kondensator wieder entladen (II). Wechselt die Spannung ihre Richtung, so wird der Kondensator umgekehrt aufgeladen (III). Der Strom fließt dabei noch in der gleichen Richtung wie bei der vorhergegangenen Entladung. Schließlich entlädt sich der umgekehrt aufgeladene Kondensator wieder, da die äußere Spannung wieder absinkt (IV). Diese Vorgänge wiederholen sich periodisch. In dem Stromkreis sind also dauernd Elektronen in Bewegung, durch die der Kondensator abwechselnd aufgeladen und entladen wird. Somit fließt ein Wechselstrom. Ein Kondensator wirkt in einem Wechselstromkreis wie ein Widerstand. Man bezeichnet ihn als **kapazitiven Widerstand.**

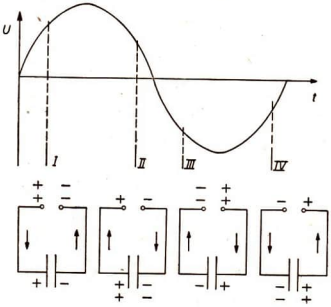


Abb. **73**/2. Im Wechselstromkreis mit einem Kondensator fließt ein Strom

Wenn in einem Stromkreis keine anderen Widerstände liegen und auch der

Ohmsche Widerstand der Zuleitungen zu vernachlässigen ist, so läßt sich der kapazitive Widerstand R_C nach dem Ohmschen Gesetz für den Wechselstromkreis berechnen. Dann ist

$$\boxed{R_W = R_C = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}}\,.$$

In einer Versuchsreihe wird der kapazitive Widerstand von Kondensatoren mit verschiedener Kapazität untersucht (Abb. 74/1). Bei diesen Versuchen wird der technische Wechselstrom benutzt, den man der Netzsteckdose entnimmt, das heißt, die Frequenz ist konstant.

Abhängigkeit des kapazitiven Widerstandes von der Kapazität

C μF	U_{eff} V	I_{eff} A	R_C Ω
2	220	0,125	1760
4	220	0,252	873
6	220	0,380	579

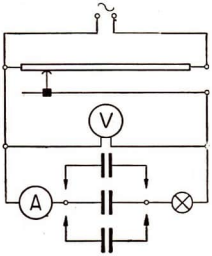


Abb. 74/1 Versuchsreihe zur Messung kapazitiver Widerstände

Aus der Tabelle erkennt man, daß der Widerstand bei Vergrößerung der Kapazität abnimmt.

Der kapazitive Widerstand eines Kondensators ist um so größer, je geringer seine Kapazität ist.

Legt man Wechselspannungen mit verschiedener Frequenz aber gleicher Spannung an den Kondensator, so wird der kapazitive Widerstand mit zunehmender Frequenz geringer. Bei höherer Frequenz folgen die Auf- und Entladungen des Kondensators schneller aufeinander. Daher ist die Anzahl der Elektronen, die je Sekunde den Leiterquerschnitt passieren, und damit die Stromstärke größer.

Der kapazitive Widerstand eines Kondensators ist um so größer, je kleiner die Frequenz des Stromes ist.

Ein Kondensator hat im Wechselstromkreis einen kapazitiven Widerstand. Dieser ist um so größer, je geringer seine Kapazität und je kleiner die Frequenz des Wechselstromes sind.

5. Phasenverschiebungen an induktiven und kapazitiven Widerständen. In den folgenden Versuchen wird der Verlauf der Wechselspannungen und der Wechselstromstärken an Ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerständen verglichen.

a) Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis. Ein Ohmscher Widerstand und eine Glimmlampe G_1 werden in Reihe an eine Wechselspannung von 220 V ange-

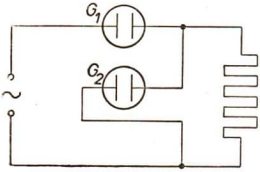
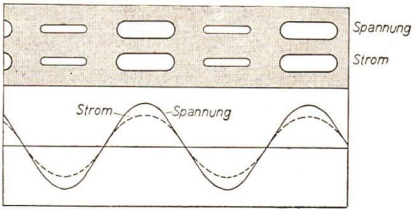


Abb. **75**/1. Darstellung der Phasengleichheit am Ohmschen Widerstand



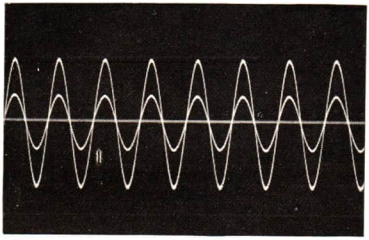


Abb. **75**/2. Phasengleichheit von Spannung und Stromstärke (Schleifenoszillograph)

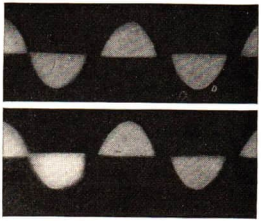


Abb. **75**/3. Phasengleichheit von Spannung und Stromstärke (Glimmlichtbild)

schlossen (Abb. **75**/1). Da die Glimmlampe G_1 wie ein Amperemeter geschaltet ist, zeigt sie den Verlauf der Stromstärke. Parallel zum Widerstand liegt, wie ein Voltmeter geschaltet, eine Glimmlampe G_2. Sie zeigt den Verlauf der Spannung. Mit Hilfe eines Drehspiegels (vgl. S. 63) läßt man die entsprechenden Spannungs- und Stromstärkekurven untereinander aufzeichnen (Abb. **75**/3). Bei beiden Kurven fallen die Nullpunkte sowie die Höchst- beziehungsweise Tiefstwerte von Spannung und Stromstärke zusammen. Man sagt, *Spannung und Stromstärke sind in Phase*, sie haben gleiche Phase. In Abbildung **75**/2 sind die Kurven wiedergegeben, die man mit Schleifenoszillographen erhält.

In einem Stromkreis mit einem Ohmschen Widerstand sind Spannung und Stromstärke in Phase.

b) Induktiver Widerstand im Wechselstromkreis. Ersetzt man den Ohmschen Widerstand durch eine Spule mit einem hohen induktiven Widerstand (Abb. **76**/1), so erhält man mit Hilfe der Oszillographen die Bilder der Abbildungen **76**/2 beziehungsweise **76**/3. Man erkennt, daß die Stromstärkenkurve zeitlich hinter der Spannungskurve herläuft.

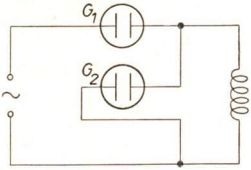
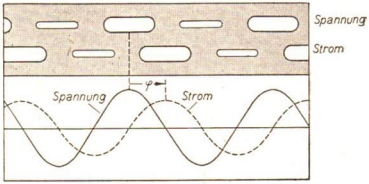


Abb. **76**/1. Darstellung der Phasenverschiebung bei induktivem Widerstand



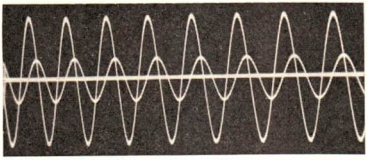


Abb. **76**/2. Phasenverschiebung am induktiven Widerstand (Schleifenoszillograph)

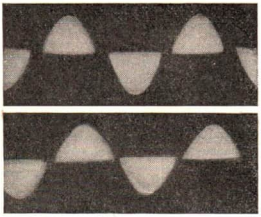


Abb. **76**/3. Glimmlichtbild der Phasenverschiebung am induktiven Widerstand

In der Spule entstehen durch Selbstinduktion Spannungen, die dem Anwachsen und dem Absinken des Stromes entgegenwirken (vgl. S. 56). Beim Anwachsen der Wechselspannung entsteht in der Spule jeweils eine Gegenspannung, die das Anwachsen der Stromstärke behindert. Erst wenn die angelegte Spannung ihren Höchstwert überschritten hat, entsteht eine Induktionsspannung, die mit der äußeren Spannung gleichgerichtet ist, so daß die Stromstärke auf ihren Höchstwert ansteigen kann. Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Absinken der Wechselspannung. Auf diese Weise hinkt die Stromstärke in ihrem periodischen Verlauf zeitlich hinter der Spannung her. *Es liegt keine Phasengleichheit mehr vor, sondern eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke.*

Ein induktiver Widerstand bewirkt, daß die Stromstärkenkurve zeitlich hinter der Spannungskurve herläuft.

c) Kapazitiver Widerstand im Wechselstromkreis. An Stelle der Spule wird ein Kondensator eingeschaltet (Abb. **77**/1). Es ergeben sich die Glimmlicht- beziehungsweise Oszillographenbilder der Abbildungen **77**/2 und **77**/3. Man erkennt, daß in diesem Falle die Stromstärkenkurve der Spannung zeitlich vorausläuft.

Damit am Kondensator eine bestimmte Spannung, beispielsweise die Höchstspannung, auftritt, muß zuerst ein entsprechender Strom fließen, der den Kondensator auflädt und wieder entlädt, um ihn schließlich wiederum umgekehrt aufzuladen. Hat die Spannung den Höchstwert erreicht, ist also der Kondensator aufgeladen, dann hat die Stromstärke den Wert Null. Die Stromstärkenkurve läuft daher der

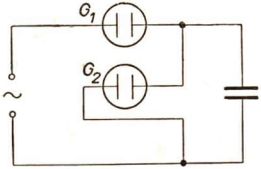
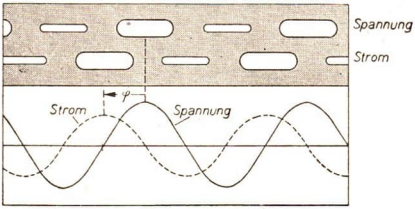


Abb. 77/1. Darstellung der Phasenverschiebung am kapazitiven Widerstand



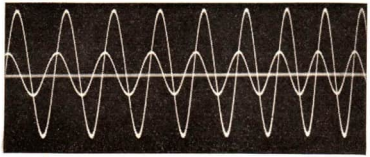


Abb. 77/2. Phasenverschiebung am kapazitiven Widerstand (Schleifenoszillograph)

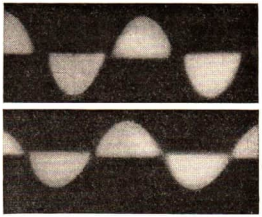


Abb. 77/3. Glimmlichtbild der Phasenverschiebung am kapazitiven Widerstand

Spannungskurve zeitlich voraus. Aus der Abbildung 73/2 ist bereits die Phasenverschiebung zwischen der Spannungs- und der Stromstärkenkurve zu erkennen.

Ein kapazitiver Widerstand bewirkt, daß die Stromstärkenkurve der Spannungskurve zeitlich vorauseilt.

d) Aufhebung der Phasenverschiebung. Die Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke, die ein induktiver und ein kapazitiver Widerstand bewirken, sind einander entgegengerichtet. Sind induktive und kapazitive Widerstände zusammen in einen Stromkreis geschaltet, so *können sich die entgegengesetzten Phasenverschiebungen gegenseitig zum Teil oder auch ganz aufheben.* Die vollständige Aufhebung der Phasenverschiebung hängt von der richtigen Kombination der Spulen und Kondensatoren ab. Berechnungen haben ergeben, daß zu diesem Zweck der kapazitive Widerstand gleich dem induktiven Widerstand sein muß. Für den technischen Wechselstrom kommen zum Beispiel die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Wertepaare in Frage.

Induktivität mH	Kapazität μ F	Induktivität · Kapazität mH · μ F
10	1000	10000
100	100	10000
1000	10	10000
10000	1	10000

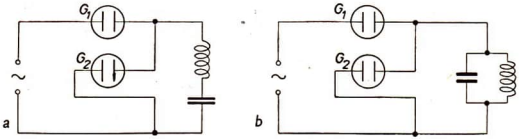


Abb. 78/1
Schaltung zur Aufhebung der Phasenverschiebung
a) Serienschaltung,
b) Parallelschaltung von Spule und Kondensator

Werden eine Spule und ein Kondensator mit den in der Tabelle genannten Werten hintereinander geschaltet (Abb. 78/1a) oder auch parallelgeschaltet (Abb. 78/1b), so ergibt sich das der Abbildung 75/2 beziehungsweise 75/3 entsprechende Oszillographenbild. Bei diesen Versuchen ist größte Vorsicht geboten, da sehr hohe Spannungen auftreten können.

Die durch induktive und kapazitive Widerstände verursachten Phasenverschiebungen zwischen Spannung und Stromstärke können einander bei Zusammenschaltung geeigneter Spulen und Kondensatoren gegenseitig aufheben.

6. Leistung und Arbeit im Wechselstromkreis. In Glühlampen und elektrischen Heizgeräten sind die Glühdrähte zwar spulenförmig gewunden, da aber die Windungen nicht sehr dicht liegen, haben sie nur einen sehr geringen induktiven Widerstand. Dieser kann gegenüber ihrem Ohmschen Widerstand vernachlässigt werden. *Daher sind bei elektrischen Wärmegeräten Spannung und Stromstärke nahezu in Phase.* Abbildung 78/2 stellt die zugehörigen Kurven einschließlich der Leistungskurve dar.

Um die hierbei aufgenommene *effektive Leistung* zu berechnen, muß man die effektive Spannung und die effektive Stromstärke messen. Das Produkt aus den beiden Werten ergibt die effektive elektrische Leistung:

$$\boxed{N_{eff} = U_{eff} \cdot I_{eff}}\,.$$

Mißt man die Spannung in Volt und die Stromstärke in Ampere, so erhält man die *Leistung* in **Watt.**

Wird aber beispielsweise ein Motor mit Wechselspannung betrieben, so tritt durch die Induktivität der Spulenwicklungen im Motor eine Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke auf. Die Höchstwerte der Spannung und der Stromstärke fallen dann nicht mehr zeitlich zusammen. *Zu einem Spannungshöchstwert gehört ein kleinerer Wert der Stromstärke und zu einem Höchstwert der Stromstärke eine kleinere Spannung.* Bildet man jetzt die Produkte zusammengehöriger Spannungs und Stromstärkenwerte, so erhält man wieder periodisch schwankende Leistungswerte. Aus der Abbildung 79/1 erkennt man, daß *bei einer Phasen-*

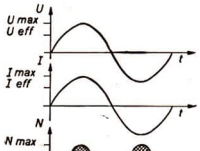


Abb. 78/2. Spannung und Stromstärke in Phasengleichheit; darunter ist die zugehörige Leistungskurve gezeichnet

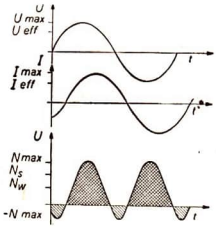


Abb. 79/1. Spannung und Stromstärke mit induktiver Phasenverschiebung. Darunter die Leistungskurve

verschiebung der Strom eine geringere Leistung hat als der nicht phasenverschobene.

Bildet man in diesem Falle das Produkt aus effektiver Spannung und effektiver Stromstärke, so erhält man die gleiche Leistung wie beim nicht phasenverschobenen Strom. Die errechnete Leistung ist somit größer als die tatsächlich wirksame. Man bezeichnet die nach den Effektivwerten errechnete Leistung als **Scheinleistung** (N_S).

$$\boxed{N_S = U_{eff} \cdot I_{eff}}\,.$$

Die Maßeinheit der Scheinleistung ist das **Voltampere** (VA).

Die nutzbare Leistung bezeichnet man als **Wirkleistung** (N_W). Die Wirkleistung ist immer kleiner als die Scheinleistung. Um die Wirkleistung aus der Scheinleistung zu erhalten, muß man die Scheinleistung mit einem Faktor multiplizieren, der kleiner als 1 ist. Dieser sogenannte **Leistungsfaktor** wird in der Elektrotechnik mit dem Formelzeichen cos φ bezeichnet.

$$\boxed{N_W = N_S \cdot \cos\varphi = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi}\,.$$

Als Maßeinheit für die Wirkleistung wird das **Watt** benutzt.

Jedes Wechselstromgerät mit starkem induktivem Widerstand hat einen bestimmten Leistungsfaktor, der auf dem *Leistungsschild* angegeben ist. Dieser kann dadurch ermittelt werden, daß man zunächst die Scheinleistung N_s; aus den gemessenen Effektivwerten der Spannung und der Stromstärke berechnet. Die Wirkleistung N_W wird experimentell festgestellt. Der Quotient aus der Wirkleistung und der Scheinleistung ist der Leistungsfaktor.

$$\boxed{\cos\varphi = \frac{N_W}{N_S}}\,.$$

Kennt man umgekehrt den Leistungsfaktor, so kann man die Wirkleistung berechnen.

Ein Wechselstrommotor hat zum Beispiel den Leistungsfaktor cos $\varphi = 0{,}78$. Es werden die Effektivwerte gemessen, wobei man beispielsweise die Werte $U_{eff} = 210$ V und $I_{eff} = 2{,}4$ A erhält.

Daraus ergibt sich die Scheinleistung zu

$$N_S = 210 \cdot 2{,}4 \text{ VA} = 504 \text{ VA}.$$

Mit Hilfe dieses Wertes und des Leistungsfaktors kann nun die Wirkleistung bestimmt werden. Sie beträgt nur:

$$N_W = 504 \cdot 0{,}78 \text{ VA} \approx 393 \text{ W}.$$

Entsprechende Verhältnisse liegen vor, wenn in einem Stromkreis neben Ohmschen Widerständen auch kapazitive Widerstände auftreten. Aus den Effektivwerten der Spannung und der Stromstärke ergibt sich dann gleichfalls die Scheinleistung, die wiederum größer als die nutzbare Wirkleistung ist.

Je nach seiner Leistung kann der elektrische Strom Arbeit verrichten. Wie die mechanische Arbeit ist auch die *elektrische Arbeit im Wechselstromkreis und im Gleichstromkreis* das Produkt aus der Leistung und der Zeit. Aus der Scheinleistung ergibt sich die Scheinarbeit:

$$\boxed{A_S = N_S \cdot t = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot t}.$$

Als Maßeinheit sind die **Voltamperesekunde** (VAs) und die **Kilovoltamperestunde** (kVAh) gebräuchlich. Aus der Wirkleistung berechnet man die Wirkarbeit:

$$\boxed{A_W = N_W \cdot t = N_S \cdot \cos\varphi \cdot t}.$$

Als Maßeinheit benutzt man die **Wattsekunde** (Ws) und die **Kilowattstunde** (kWh).

Bei der Energieerzeugung und in der Industrie ist man bemüht, den Leistungsfaktor möglichst groß zu halten. Er muß möglichst nahe dem Wert 1 liegen. In einem großen holzverarbeitenden Betrieb, in dem viele Elektromotoren zum Antrieb der Maschinen eingesetzt sind, liegt beispielsweise der Leistungsfaktor des Betriebes etwa bei $\cos\varphi = 0{,}8$. Von der Scheinleistung entfallen also nur 80% auf die Wirkleistung. Der Betrieb muß dem Netz eine größere Leistung entnehmen, als er eigentlich braucht. Da alle Betriebe, die mit Antriebsmotoren ausgerüstet sind, einen geringen Leistungsfaktor haben, wird die von den Kraftwerken erzeugte Energie nur zu einem Teil ausgenutzt. Da außerdem der elektrische Zähler die Wirkarbeit mißt, gehen die Kosten der für den Betrieb nutzlosen 20% der Scheinleistung zu Lasten des Elektrizitätswerkes. Dieses verlangt daher von jedem Betrieb die Einhaltung eines bestimmten Mindestwertes des Leistungsfaktors. Noch wichtiger ist es aber für die Sicherung der Energieversorgung unserer Republik, daß *die Phasenverschiebungen möglichst gering gehalten werden.*

In der Praxis treten fast nur induktive Phasenverschiebungen auf. Alle Elektromotoren und Transformatoren haben große induktive Widerstände. In großen Warenhäusern und Verwaltungsgebäuden rufen sogar die Drosselspulen der Leuchtstoffröhren merkliche induktive Phasenverschiebungen hervor. Diese induktiven Phasenverschiebungen können bekanntlich durch entsprechend große kapazitive Widerstände aufgehoben beziehungsweise vermindert werden (vgl. S. 77). In allen Großbetrieben sind darum sogenannte *Phasenschieberanlagen* installiert. Das sind meist Starkstromkondensatoren, die parallel zum Netz geschaltet sind. Dadurch wird die induktive Phasenverschiebung weitgehend aufgehoben. Die Kapazität der Kondensatoren wird so gewählt, daß der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ möglichst nahe bei 1 liegt. Da sich aber infolge des Zu- und Abschaltens einzelner Geräte der induktive

Widerstand und damit die Phasenverschiebung dauernd ändern, erreicht man praktisch nie einen konstanten Leistungsfaktor mit dem Höchstwert 1. Man kommt diesem Wert nur nahe.

Der Leistungsfaktor cos φ ist der Quotient aus der Wirkleistung und der Scheinleistung. Um den Leistungsfaktor zu verbessern, werden die durch induktive Widerstände bewirkten Phasenverschiebungen durch Kondensatoren in Phasenschieberanlagen teilweise aufgehoben.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Der zum Betrieb elektrischer Lokomotiven benutzte Wechselstrom hat eine Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz.
   a) Was bedeutet diese Angabe?
   b) Vergleichen Sie diese Frequenz mit der Frequenz der Wechselspannung, die an den Steckdosen des Ortsnetzes liegt!
   c) Welche Vorteile besitzt die niedere Frequenz hinsichtlich der induktiven Widerstände und der Scheinleistung?
2. a) Wie erklärt sich die Induktivität einer Spule?
   b) Welche Bedeutung hat eine Induktivität im Wechselstromkreis?
3. Vergleichen Sie das Verhalten eines Kondensators im Gleich- und im Wechselstromkreis!
   a) Was bedeutet die Angabe cos $\varphi = 0{,}8$ auf einem Leistungsschild?
   b) Erklären Sie, warum ein Kondensator den Leistungsfaktor verbessern kann!

11. Dreiphasenstromgeneratoren

1. Der Dreiphasenstrom. Sowohl der bekannte Gleichstrom als auch der Wechselstrom werden in zwei Leitungsdrähten dem Verbraucher zugeführt. Dagegen fällt es auf, daß die Hochspannungsleitungen, welche die elektrische Energie von den Kraftwerken zu den Verteilerstationen führen, aus drei dicken Leitungsdrähten und einem dünnen Draht bestehen (Abbildung 81/1). Sie leiten offensichtlich eine andere Art elektrischer Ströme.

Auf dem Lande, wo noch Freileitungen zu den Häusern führen, sind ebenfalls vier Leitungsdrähte an den Masten entlanggeführt. In die einzelnen Häuser werden oft nur zwei von ihnen abgezweigt. Die an den Steckkontakten in den Wohnungen liegende Spannung wird also nur von zwei der vier Leiter abgenommen.

Es fällt weiter auf, daß bei der Abzweigung für die eine Leitung immer ein und derselbe Draht benutzt wird, für die andere

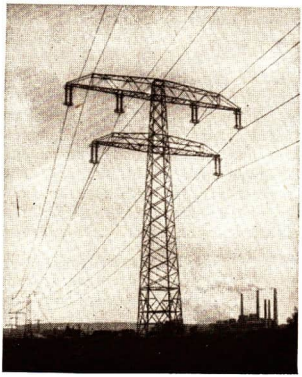


Abb. 81/1. Hochspannungsleitung

Leitung in wechselnder Folge einer der drei übrigen Drähte. Einer der vier Leiter hat demnach eine besondere Bedeutung. Man bezeichnet ihn als *Sternpunktleiter*.

Dort, wo größere Maschinen in Werkstätten und in der landwirtschaftlichen Produktion betrieben werden, sind alle vier Leiter in ein Gebäude verlegt. Man findet hier besondere Steckdosen. Während die Schuko-Steckdosen im Haushalt zwei Anschlußkontakte und einen geerdeten Schutzkontakt aufweisen, zeigen diese Steckdosen vier Anschlüsse und einen geerdeten Schutzkontakt. Mißt man mit einem Wechselstrom-Voltmeter die Spannungen zwischen den verschiedenen Kontakten, so erhält man die in Abbildung 82/1 dargestellten Ergebnisse. Es erweist sich, daß an diesen Steckdosen unterschiedliche Wechselspannungen abgenommen werden.

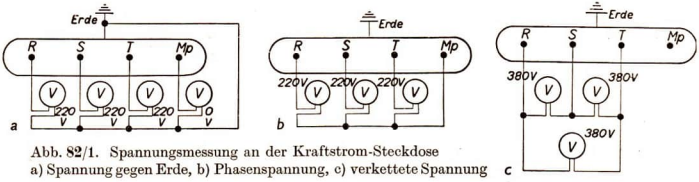


Abb. 82/1. Spannungsmessung an der Kraftstrom-Steckdose
a) Spannung gegen Erde, b) Phasenspannung, c) verkettete Spannung

Bei der Spannungsmessung gegen Erde stellt sich heraus, daß einer der vier Leiter keine Spannung führt. Es ist der Sternpunktleiter, der die genormte Bezeichnung *Mp* führt. Die übrigen drei Leiter werden Hauptleiter genannt und mit *R*, *S*, *T* bezeichnet.

Zur weiteren Untersuchung der Spannungen an der vierpoligen Steckdose schaltet man je eine Glimmlampe an die Stelle der in Abbildung 82/1 b eingezeichneten Spannungsmesser. Betrachtet man ihr Licht in einem Drehspiegel (Glimmlichtoszillograph), so sieht man drei Wechselspannungsoszillogramme, wie sie Abbildung 82/2 zeigt. Es liegt also ein *System dreier Wechselspannungen* vor. Weiterhin erkennt man, daß die einzelnen Spannungskurven gegeneinander verschoben sind. *Die Wechselspannungen haben zwar die gleichen Effektivwerte, aber stets unterschiedliche Phase.* Zwischen ihnen besteht eine *Phasendifferenz*. Bei genauer Betrachtung erkennt man, daß der Phasenunterschied jeweils eine Drittelperiode beträgt. Entsprechend haben auch die von den Spannungen verursachten Wechselströme eine unterschiedliche Phase. Man bezeichnet deshalb das System dieser drei Ströme als **Dreiphasenwechselstrom** oder kurz als **Dreiphasen-** oder **Drehstrom.** Einen einzelnen der drei Teilströme bezeichnet man auch als *Leiterstrom.*

Unter Dreiphasenstrom versteht man das System dreier Wechselströme, welche die gleiche Effektivspannung haben und zwischen denen eine Phasendifferenz von je einer Drittelperiode besteht.

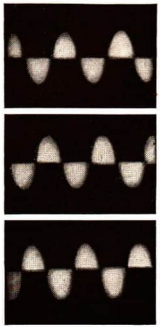


Abb. 82/2. Glimmlichtoszillogramm der Dreiphasenwechselspannung

2. Die Erzeugung eines Dreiphasenstromes. Der Dreiphasenstrom wird in einem Generator erzeugt. Dazu müssen drei getrennte Induktionsspulen oder Wicklungssysteme in dem Generator vorhanden sein. In der Abbildung **83**/1 ist ein Modell eines solchen Generators dargestellt. Im Stator befinden sich drei jeweils um 120° gegeneinander versetzte Induktionsspulen. Die Bezeichnungen ihrer Wicklungsenden mit U, V, W und X, Y, Z ist genormt, damit keine Verwechslungen auftreten können. Als Rotor ist ein drehbarer Magnet eingesetzt. Rotiert der Anker, so wird in jeder Spule eine Spannung induziert. Jedesmal, wenn ein Magnetpol an einer der Spulen vorbeiläuft, wechselt die Induktionsspannung in dieser Spule ihre Polarität. Es entsteht also in jeder Spule in der gleichen Weise wie in einem Wechselstromgenerator eine Wechselspannung. Da die Spulen um 120° gegeneinander versetzt sind, erfolgt der Polaritätswechsel ihrer Spannungen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander in einer zeitlichen Folge von einer Drittelperiode. Auf diese Weise kommt die Phasendifferenz der drei Teilspannungen zustande. Schließt man drei Stromkreise an, indem man zwischen U und X, V und Y sowie W und Z drei gleiche Widerstände schaltet, so fließen in ihnen drei Wechselströme (Abb. **83**/2a). Es sind hierbei sechs Leitungen erforderlich: *drei Zuleitungen* und *drei Rückleitungen*. Führt man aber, wie es die Abbildung **83**/2b zeigt, die Rückleitungen der drei Ströme *sternförmig* in einem Punkt zusammen, so kann man die drei zurückführenden Leitungen durch einen Mittelpunktleiter ersetzen. Bei dieser Schaltung sind nur noch vier Leiter notwendig, da zwei Rückleitungen eingespart werden. Man spricht von einem *Vierleitersystem*. Die vier Leiter entsprechen den vier Anschlüssen der Steckdose.

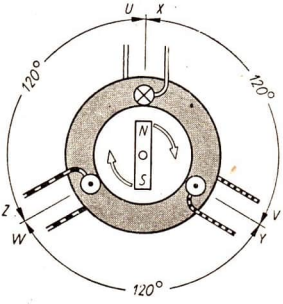


Abb. **83**/1. Modell eines Dreiphasenwechselstromgenerators

Am Generator verzweigt sich der Sternleiter wieder sternförmig zu den drei Enden der Spulen X, Y und Z. Den Verzweigungspunkt nennt man sowohl im Generator als auch beim Verbraucher *Sternpunkt*.

Der Dreiphasenstrom wird in drei voneinander getrennten und um 120° gegeneinander versetzten Wicklungssystemen in einem Generator erzeugt.

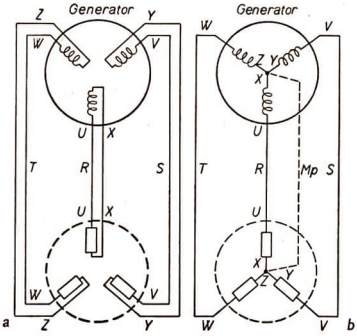


Abb. **83**/2. a) Die drei Teilstromkreise des Dreiphasenstromes, b) die Stromkreise des Dreiphasenstromes mit Sternpunkt und Sternpunktleiter

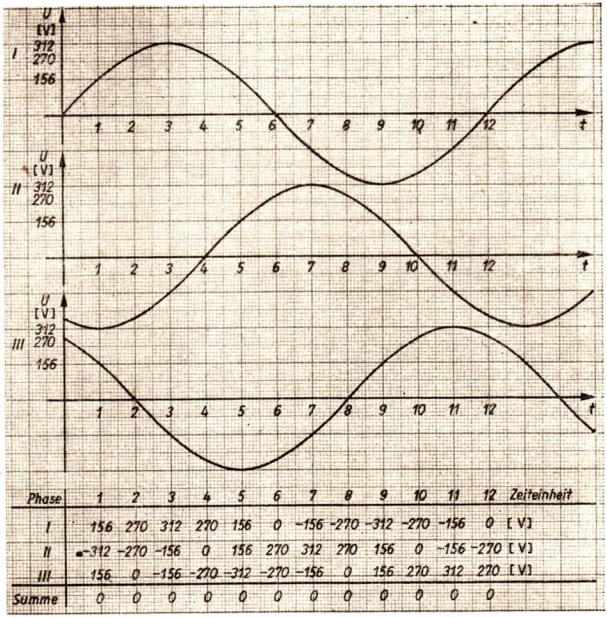


Abb. 84/1. Spannungskurven des Dreiphasenwechselstromes. Addition der drei Phasenspannungen

3. Das Vierleitersystem. Der für die Wohnungen und Haushalte abgezweigte Wechselstrom stellt nur einen Leiterstrom des Dreiphasenstromes dar und wird auch als *Einphasenwechselstrom* bezeichnet. Während man die drei Leiter *R*, *S*, *T* als Zuleitungen des Dreiphasenstromes braucht, bildet der Mp-Leiter eine allen drei Teilströmen *gemeinsame Rückleitung*.

An den Hochspannungsleitungen fällt weiterhin auf, daß der vierte Leiter wesentlich dünner ist als die drei anderen (vgl. Abb. 81/1). Das bedeutet noch eine zusätzliche Materialersparnis. Manche Überlandleitungen bestehen sogar nur aus drei Leitungsdrähten. Eine Erklärung für diese Erscheinung findet man, wenn man die zeitlich zueinandergehörenden Spannungswerte der Einzelströme addiert. Diese Spannungen nennt man *Sternspannungen*. Die Abbildung 84/1 zeigt die graphische Darstellung des

Spannungsverlaufs der drei Sternspannungen in Abhängigkeit von der Zeit. Man erkennt daraus folgende wichtige Gesetzmäßigkeit:

Die Summe der drei Sternspannungen ist zu jedem Zeitpunkt gleich Null.

Werden die drei Hauptleiter gleichmäßig belastet, indem sie gleich große Widerstände enthalten, so sind die Effektivstromstärken in allen Hauptleitern gleich groß. Die Kurven der Stromstärken sind entsprechend denen der Spannungen zeitlich gegeneinander verschoben. Folglich ist bei gleichmäßiger Belastung der Leiter auch die Summe der Leiterströme gleich Null. Somit heben sich die drei Teilströme in der Rückleitung gegenseitig auf. Bei einer stets gleichmäßigen Belastung der Hauptleiter brauchte man deshalb den Rückleiter eigentlich gar nicht. Die einzelnen Hauptleiter werden aber durch die Abzweigung des einfachen Wechselstromes in verschiedene Haushalte geführt. Dort ist die Belastung unterschiedlich und ändert sich dauernd. So ergibt sich also doch ein gewisser Rückstrom, der den Sternpunktleiter als Rückleitung im allgemeinen nötig macht.

Man verteilt aber die Anschlüsse so, daß die Belastung der einzelnen Hauptleiter trotzdem möglichst gleich ist. Zu diesem Zweck verlegt man in abwechselnder Folge in das eine Haus neben dem Nulleiter den *R*-Leiter, ins nächste den *S*-Leiter und ins übernächste den *T*-Leiter und weiter wieder von vorn. Auf diese Weise kommt man einer gleichmäßigen Belastung der Hauptleiter einigermaßen nahe, und man hat die Gewähr, daß der Rückstrom im Verhältnis zu den zufließenden Leiterströmen sehr klein ist. Deshalb kann man für die gemeinsame Rückleitung einen wesentlich schwächeren Leitungsdraht benutzen als für die Zuleitungen.

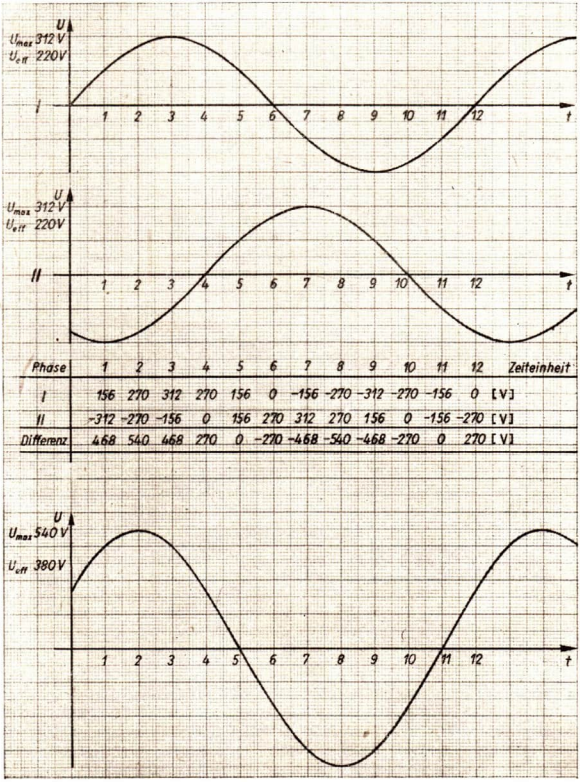
Der Sternpunktleiter kann auch durch eine *Erdleitung* ersetzt werden. Dazu erdet man den Mp-Anschluß am Anfang und am Ende der Leitung. Zur Erdung werden verzinkte, verbleite oder verkupferte Stahlblechplatten in möglichst feuchtes Erdreich eingraben.

Dreiphasenstrom wird meist durch ein Vierleitersystem fortgeleitet.
Die Summe der drei Sternspannungen ist zu jedem Zeitpunkt gleich Null.
Bei gleicher Belastung der einzelnen Hauptleiter heben sich die Rückströme im Sternpunktleiter gegenseitig auf.

4. Die verkettete Spannung. Die Spannungsmessung zwischen zwei Hauptleitern, also zum Beispiel zwischen dem *R*- und dem *S*-Leiter (vgl. auch Abb. 82/1c), ergibt Effektivwerte von 380 V. Dies erklärt sich folgendermaßen: Jeder Hauptleiter besitzt in jedem Moment eine bestimmte Spannung gegenüber dem Sternpunktleiter. Die Spannung zwischen zwei Hauptleitern ist von der Differenz der Phasenspannungen abhängig (Abb. 86/2). Der Effektivwert der Sternspannungen beträgt 220 V. Die Kurve der Spannungsdifferenz ist darunter gezeichnet. Diese hat einen Effektivwert von 380 V. Man nennt diese verkettete Spannung *Leiterspannung* oder *Dreieckspannung*, da sie sich aus der Verkettung zweier Leiterströme ergibt.

Die Spannung zwischen zwei Hauptleitern nennt man Leiterspannung oder Dreieckspannung. Bei einer Sternspannung von 220 V *beträgt die Dreieckspannung* 380 V.

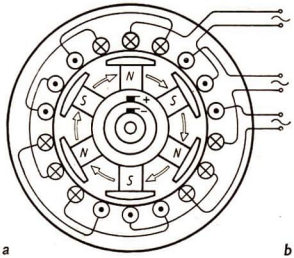
5. Technische Dreiphasenstromgeneratoren. Im Gegensatz zu dem beschriebenen Modell enthalten die Großgeneratoren in den Kraftwerken mehrere Paare von



Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Zeiteinheit
I	156	270	312	270	156	0	−156	−270	−312	−270	−156	0	[V]
II	−312	−270	−156	0	156	270	312	270	156	0	−156	−270	[V]
Differenz	468	540	468	270	0	−270	−468	−540	−468	−270	0	270	[V]

Abb. 86/1. Kurven zweier Sternspannungen und ihre Differenz

Magnetspulen und drei Gruppen von Induktionsspulen. Die Abbildung 87/1a zeigt einen vereinfachten Schnitt durch einen technischen Dreiphasenstromgenerator. Sein Rotor ist als Polrad mit sechs elektromagnetischen Polen ausgeführt. Die Magnetspulen werden von einem Gleichstromgenerator, der mit der Welle des Dreiphasenstromgenerators verbunden ist, mit Gleichstrom versorgt. Im Stator befinden sich 18 Induktionsspulen. In der Abbildung 87/1 b ist das Prinzip der Wicklungsführung angegeben. Die 3 Nordpole des Polrades drehen sich zur gleichen Zeit immer an 3 der 18 Induktionsspulen vorbei. Dadurch werden in ihnen gleichartige Spannungen induziert. Zugleich werden in den 3 Induktionsspulen, an denen sich die Südpole vorbeibewegen, gleichgroße Spannungen mit umgekehrter Polarität erzeugt. Schaltet man nun die Gruppen von je 3 Induktionsspulen hintereinander, dann erhält man ein *Spulensystem*, das die eine Sternspannung des erzeugten Dreiphasenstromes liefert. Die beiden anderen Sternspannungen werden in den zwei übrigen Systemen von je sechs Spulen erzeugt.



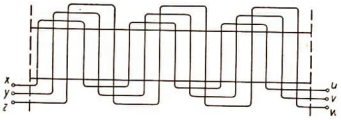


Abb. 87/1. Schnitt durch einen Dreiphasenwechselstromgenerator und Wicklungsführung

Der Antrieb der Kraftwerksgeneratoren erfolgt meist durch *Wasser-* oder *Dampfturbinen*. Die Drehzahl wird automatisch mit großer Genauigkeit konstant gehalten, so daß die Wechselspannungen eine gleichbleibende Frequenz haben. Die Frequenz des Dreiphasenstromes für das Versorgungsnetz beträgt 50 Hz. Der beschriebene Generator muß sich bei der Erzeugung dieses Stromes $16\frac{2}{3}$ mal je Sekunde drehen, da bei einer Umdrehung drei Perioden induziert werden. Seine Drehzahl beträgt also $1000\ \mathrm{U} \cdot \mathrm{min}^{-1}$. Die induzierten Generatorspannungen haben bei den verschiedenen Typen Effektivwerte von 6000 bis 10000 V.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Woran erkennt man, daß eine Freileitung Dreiphasenwechselstrom führt? Erklären Sie den Vorteil dieser Stromart hinsichtlich des Leitungssystems!
2. Erklären Sie die prinzipielle Wirkungsweise eines Dreiphasenwechselstromgenerators! Wodurch unterscheidet sich dieser Generator gegenüber einem gewöhnlichen Wechselstromgenerator?
3. Warum erhält man bei einem Dreiphasenstrom zwei verschiedene Spannungen? Welchen Vorteil hat die Dreiecksspannung?

12. Drehstrommotoren

1. Die Entstehung des Drehfeldes. Zum Antrieb größerer Maschinen verwendet man in Industrie und Landwirtschaft **Drehstrommotoren.** Sie ähneln in ihrem Aufbau den entsprechenden Generatoren. Ihr Stator ist in gleicher Weise mit drei Spulensystemen ausgerüstet. In der Abbildung 88/1 ist ein vereinfachtes Modell des Stators dargestellt, das jedoch nur mit drei Spulen versehen ist. Ihre Anschlüsse sind wie beim Generator mit U, V, W und X, Y, Z bezeichnet. Jede Spule ist mit einem Ende (U, V, W) an einen Hauptleiter (R, S, T) angeschlossen. Die anderen Spulenenden sind in einem *Sternpunkt* vereinigt. Ein Anschluß des Sternpunktes an den Sternpunktleiter ist nicht nötig, da die drei Spulensysteme den gleichen Widerstand besitzen und somit die drei Hauptleiter gleichmäßig belastet sind. Jede Spule bildet so einen Elektromagneten mit wechselnder Polarität. Entsprechend der Phasendifferenz der Erregerströme wechseln die drei Magnetspulen ihre Polarität zeitlich nacheinander (Abbildung 88/2). Wie aus der Abbildung deutlich wird, *dreht sich das Magnetfeld.* Man nennt ein solches Feld ein *Drehfeld.* Auf Grund dieser Eigenschaft wird der Dreiphasenwechselstrom meist als *Drehstrom* bezeichnet.

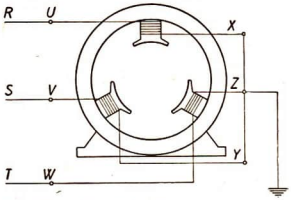
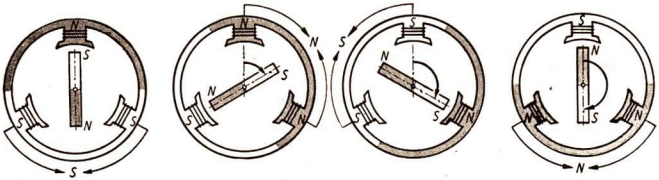


Abb. 88/1. Modell des Stators eines Drehstrommotors


N
S
S
N
S
N
S
N

ändert. Darum treten in ihnen Induktionsspannungen auf, die auf Grund des Kurzschlusses starke Induktionsströme hervorrufen. Nach der Lenzschen Regel müssen diese Induktionsströme so gerichtet sein, daß sie der Ursache der Induktion entgegenwirken. Die Ursache besteht hier in der Drehung des Drehfeldes gegenüber dem Läufer. Sie wird dadurch aufgehoben, daß sich der Läufer mit dem Magnetfeld mitdreht. Infolgedessen gerät der Läufer in Bewegung. Ein Gleichlauf mit dem Drehfeld ist aber nur theoretisch denkbar, nämlich dann, wenn der Läufer keine mechanischen Widerstände zu überwinden hätte. Der belastete Läufer, der mechanische Arbeit verrichten muß, bleibt mit seiner Drehzahl gegenüber der Drehzahl des Drehfeldes zurück. Dieses Zurückbleiben des Rotors hinter dem Drehfeld nennt man den *Schlupf* des Motors.

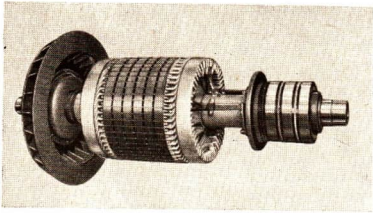


Abb. 89/1. Kurzschlußläufer

Die Kurzschlußläufermotoren zeichnen sich vor allen Antriebsmaschinen durch eine besonders einfache Konstruktion aus. Abgesehen von einer Schmierung ihrer Lager benötigen sie keine weitere Wartung. Besonders vorteilhaft ist, daß keine Stromzuführung zum Rotor notwendig ist. So können an den Motoren keine Funken entstehen, wie sie sonst immer an den Schleifkontakten auftreten. Darum sind Kurzschlußläufermotoren auch für den Betrieb in feuer- und explosionsgefährdeten Räumen sehr gut geeignet. In den verschiedensten technischen Ausführungsformen werden sie für den Antrieb von Maschinen aller Art hergestellt.

3. Der Stern-Dreieck-Schalter. Das Einschalten eines Drehstrommotors vollzieht sich im allgemeinen in zwei Stufen. Auf der ersten Schaltstufe wird der Motor angelassen. Erst nach der Umschaltung auf die zweite Stufe läuft der Motor mit voller Kraft. Sind die Enden U, V, W der Spulenwindungen an die Hauptleiter angeschlossen und die Anschlüsse X, Y, Z im Sternpunkt zusammengeschaltet, so liegt die bereits bekannte *Sternschaltung* vor (Abbildung 89/2). Die drei Spulen beziehungsweise Spulensysteme stehen unter der Sternspannung von 220 V.

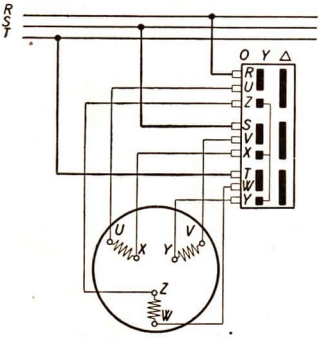


Abb. 89/2. Sternschaltung

Um mit einer höheren Spannung höhere Leistungen der Drehstrommotoren zu erreichen, nutzt man die Dreieckspannung des Drehstromnetzes aus. Die Statorwicklungen des Motors werden dazu jeweils an zwei Hauptleiter angeschlossen. Man nennt diese Anschlußart *Dreieckschaltung*.

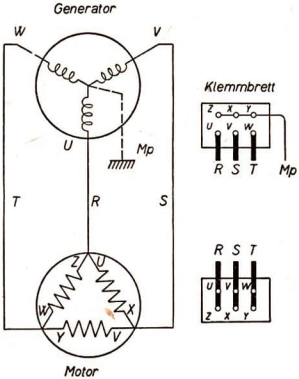


Abb. 90/1. Dreieckgeschalteter Motor an einem sterngeschalteten Generator

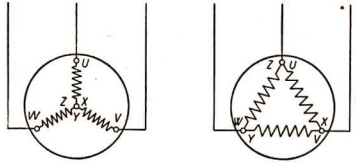
Die Abbildung 90/1 zeigt die Stromkreise durch einen sterngeschalteten Generator und einen dreieckgeschalteten Motor.

Würde man den Motor in Dreieckschaltung einschalten, so läge an den Wicklungen sofort eine Spannung von 380 V, und die Anlaufstromstärke wäre sehr groß. Das würde zu einem ruckartigen Anlaufen und zur übermäßigen Erwärmung des Motors führen. Der im Kurzschlußläufer induzierte Strom ist ebenfalls von einem Magnetfeld umgeben, das auf die Spulensysteme wirkt und dort eine Gegenspannung induziert. Infolge dieser Gegenspannung kann die Stromstärke nur bis zu einer gewissen Grenze anwachsen. Beim Einschalten des Motors fehlt aber die Gegenspannung. Sie wächst erst mit zunehmender Drehzahl.

Zur Begrenzung der Stromstärke ist ein Schalter entwickelt worden, der es ermöglicht, den Motor mit der geringeren Sternspannung von 220 V, also in Sternschaltung, anlaufen zu lassen. Hat der Motor seine Betriebsdrehzahl erreicht, so kann man ihn auf Dreieckschaltung umschalten. Die entsprechenden Schalter werden als *Stern-Dreieck-Schalter* bezeichnet (Abb. 90/2). Sie finden bei Motoren bis zu einer Leistung von 12 kW Verwendung.

Bei größeren Motoren wird unter Verwendung von *Schleifringen* ein Widerstand in den Induktionsstromkreis des Läufers geschaltet (Abb. 90/3). Dieser verhindert

Abb. 90/2. Stern-Dreieck-Schalter



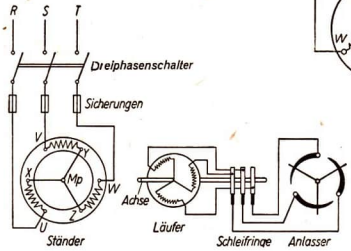


Abb. 90/3. Widerstands-Anlasser — Anlaßschleifringläufer

beim Anlassen des Motors zu starke Induktionsströme im Läufer. Eine solche Konstruktion des Läufers mit Schleifringen nennt man *Anlaßschleifringläufer*. Eine mechanische Vorrichtung am Anlaßschleifringläufer sorgt dafür, daß bei erreichter voller Drehzahl der Läufer kurzgeschlossen und die Bürsten von den Schleifringen abgehoben werden.

4. Drehzahlregelung und Umsteuerung von Drehstrommotoren. Schaltet man Widerstände vor die Statorwicklungen, so verringert sich die Drehzahl des Motors. Das bedeutet eine Vergrößerung des Schlupfs. Dabei fällt aber auch die Wirkleistung des Motors ab. Sinkt aber seine Wirkleistung unter die erforderliche Leistung, so führt das zum Stillstand des Motors. *Deshalb ist eine Drehzahlregelung an Drehstrommotoren nur sehr begrenzt möglich.*

Die Änderung der Drehrichtung ist bei allen Drehstrommotoren schaltungstechnisch sehr einfach herbeizuführen. Das Drehfeld des Stators läuft in entgegengesetzter Drehrichtung, wenn die Anschlüsse von zwei Hauptleitern miteinander vertauscht werden (Abb. 91/1). Mit dem Magnetfeld dreht sich dann auch der Rotor in der umgekehrten Richtung.

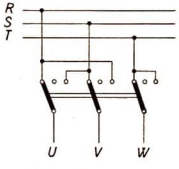


Abb. 91/1. Drehrichtungsumschaltung

5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie nutzt man die Phasenverschiebung bei einem Drehstrom zum Antrieb des Motorläufers aus? Wie erklärt sich der Name Drehstrom?
2. Erklären Sie, worin der Vorteil eines Kurzschlußläufers besteht und warum die Drehzahl des Läufers stets unter der des Drehfeldes liegt!
3. Wodurch unterscheidet sich die Sternschaltung von der Dreieckschaltung? Warum verwendet man bei Motoren den Stern-Dreieck-Schalter?

13. Gleichstromgeneratoren

1. Die Gleichrichtung durch den Kommutator. Für Wechselstrom- und Drehstromgeneratoren verwendet man als *Erregermaschine* einen *Gleichstromgenerator*. Gleichstrom wird aber auch für *Elektrolysen*, zum *Laden von Akkumulatoren*, beim *Elektroschweißen* und für andere Zwecke gebraucht. In vielen Fällen wird dieser Gleichstrom von besonderen Gleichstromgeneratoren geliefert.

Gleichstromgeneratoren arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Wechselstromgeneratoren (vgl. S. 66). Sie müssen aber zusätzlich eine Vorrichtung haben, die bewirkt, daß der Strom stets nur in einer Richtung fließt. Dies kann beispielsweise durch die Art der Stromabnahme geschehen.

Dreht sich ein Doppel-T-Anker in einem zweipoligen Magnetfeld, so wechselt die Polarität der induzierten Spannung nach jeder halben Umdrehung. Vertauscht man nun in den Zeitpunkten dieses Polaritätswechsels die Bürsten auf den Schleifringen des Generators, so kann man eine Spannung abgreifen, die zwar noch in ihrer Stärke zeitlich zwischen Null und einem Höchstwert schwankt, aber stets die gleiche Polarität behält. Man spricht dann von einem *pulsierenden Gleichstrom* (Abb. 92/1). Das

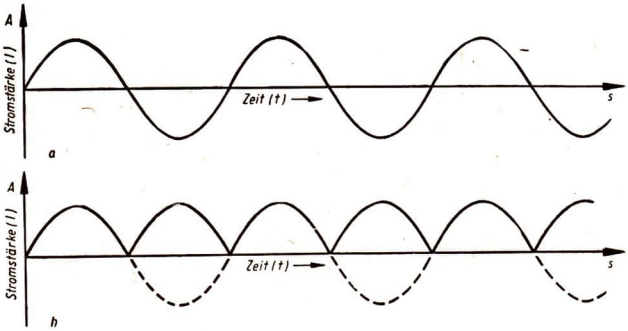


Abb. **92/1.** Pulsierender Gleichstrom

Vertauschen der Stromabnehmer erreicht man auf einfache Weise mit Hilfe eines *Kommutators* (Abb. **92/2**). Er besteht aus zwei metallischen Halbringen, die an Stelle der Schleifringe voneinander isoliert auf der Welle befestigt sind. Auf dem Kommutator schleifen zwei Kohlebürsten, die um 180° gegeneinander versetzt sind. Die Halbringe sind so angeordnet, daß die Kohlebürsten im gleichen Augenblick die von ihnen berührten Halbringe wechseln, in dem die in der rotierenden Spule induzierte Wechselspannung ihre Richtung ändert (Abb. **92/3**). Dadurch fließt der Strom im äußeren Stromkreis immer in der gleichen Richtung. Der Kommutator hat somit eine *Gleichrichterwirkung*.

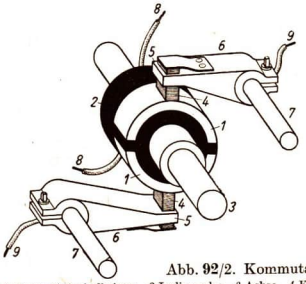


Abb. **92/2.** Kommutator.

1 Kommutatorhalbringe, *2* Isolierwalze, *3* Achse, *4* Kohlebürsten, *5* Führungskästen, *6* Bürstenhalter, *7* Bürstenträger, *8* Anschlüsse der Ankerwicklung, *9* Zuleitung zu den Maschinenklemmen

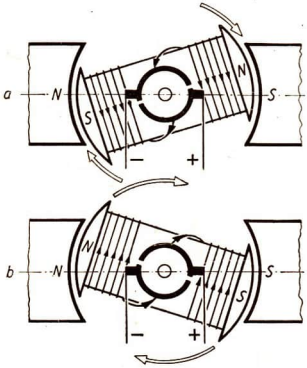


Abb. **92/3.** Wirkungsweise des Kommutators

2. Trommelanker und Kollektor. Das Pulsieren des Gleichstromes kann sich sehr störend auswirken und ist daher unerwünscht. So treten zum Beispiel bei stark pulsierenden Gleichströmen Selbstinduktionswirkungen auf wie bei einem Wechselstrom. Wie kann man nun den pulsierenden Gleichstrom glätten?

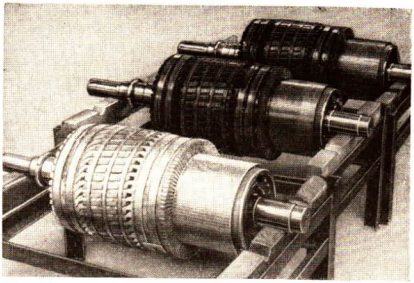


Abb. 93/1. Trommelanker

Diese *Glättung* erreicht man weitgehend durch die Verwendung eines *Trommelankers* (Abb. 93/1). Auf einen trommelförmigen Eisenkern sind viele Induktionsspulen gewickelt. Sie sind an einen vielteiligen Schleifring, an den *Kollektor* angeschlossen. Der Kollektor wirkt wie der Kommutator gleichrichtend. Hinzu kommt aber noch, daß sich durch die Schaltung der Induktionsspulen die Induktionsspannungen der einzelnen Spulen zu einer Gesamtspannung addieren. Es ändern sich zwar die Teilspannungen der einzelnen Spulen, aber durch ihre Zusammenschaltung und die am Kollektor wechselnden Anschlüsse ergibt sich eine nahezu konstante Gesamtspannung. Die noch auftretenden geringen Schwankungen können durch einen Kondensator weiter geglättet werden (vgl. S. 43).

3. Das dynamoelektrische Prinzip. Generatoren mit großer Leistung benötigen ein starkes Magnetfeld, das nur durch einen Elektromagneten erzeugt werden kann. Da der Erregerstrom für das Magnetfeld ein Gleichstrom sein muß, untersuchte man, ob beim Gleichstromgenerator nicht der Erregerstrom dem Generator selbst entnommen werden kann.

Tatsächlich ist diese sogenannte *Selbsterregung* möglich. Hierzu nutzt man die Tatsache aus, daß die Eisenkerne von Elektromagneten nach dem Abschalten des Erregerstromes noch einen geringen Restmagnetismus behalten. Beim Anlaufen des Generators genügt dieser Restmagnetismus zur Induktion einer zunächst geringen Spannung. Diese verursacht einen Strom, der auch durch die Feldwicklungen des Generators fließt. Dadurch wird das Magnetfeld verstärkt, so daß die Induktionsspannung ansteigt. Das bedingt wiederum einen stärkeren Strom und somit eine weitere Verstärkung des Magnetfeldes. So wachsen Feld und Spannung in gegenseitiger Wechselwirkung an, bis die magnetische Sättigung der Eisenteile und damit die Betriebsspannung des Generators erreicht ist.

Den Vorgang der Selbsterregung bezeichnet man als *dynamoelektrisches Prinzip*. Generatoren, die nach diesem Prinzip arbeiten, heißen *Dynamomaschinen*. Der sogenannte „Fahrraddynamo" ist dagegen trotz seiner Benennung keine Dynamomaschine, da ja sein Feld durch Permanentmagneten und nicht durch den Induktionsstrom erzeugt wird. Das dynamoelektrische Prinzip wurde 1866 von dem deutschen Elektrotechniker *Werner v. Siemens* entwickelt. Diese Erfindung war ein wichtiger Schritt für die moderne Elektrotechnik. Man konnte dadurch erstmalig die Gesetze

der elektromagnetischen Induktion zur Stromerzeugung in großem Maßstab ausnutzen. Bis dahin waren nur chemische Spannungsquellen und kleine Generatoren in der Art des Kurbelinduktors bekannt, mit denen keine hohen Leistungen erreicht werden konnten. Mit dynamoelektrischen Generatoren kann man dagegen große elektrische Leistungen erreichen. Werner v. Siemens hat zwar in technischer Hinsicht für die Entwicklung der Elektrotechnik einen großen Beitrag geleistet; aus seiner kleinen elektromechanischen Werkstatt hat sich aber unter ihm und seinen Nachfolgern ein kapitalistisches Großunternehmen entwickelt, das in großem Umfange Kriegsmaterial produzierte und heute wieder produziert und das bereits an zwei Weltkriegen verdiente.

4. Technische Gleichstromgeneratoren. Anfangs wurde bei der Elektrifizierung der Städte in den örtlichen Kraftwerken vorwiegend Gleichstrom mit einer Spannung von 110 V erzeugt. Man kannte damals die Gesetze des Wechselstromkreises nur ungenügend. Heute ist die Bedeutung der Gleichstromgeneratoren aber erheblich gesunken, da im Versorgungsnetz fast ausschließlich mit Drehstrom gearbeitet wird. Als Erregermaschinen für Drehstromgeneratoren werden jedoch noch kleinere Gleichstromgeneratoren verwendet (vgl. S. 87). Entsprechend ihren Eigenschaften setzt man verschiedene Typen von Gleichstromgeneratoren aber auch noch auf anderen Gebieten ein.

Die Gleichstromgeneratoren arbeiten heute fast alle nach dem dynamoelektrischen Prinzip. Für die Selbsterregung dieser Maschinen hat man verschiedene Schaltungen entwickelt. Nach der Art ihrer Schaltung unterscheidet man drei Haupttypen von Gleichstromgeneratoren: die *Haupt-* oder *Reihenschlußgeneratoren*, die *Nebenschlußgeneratoren* und die *Verbundgeneratoren*.

a) Haupt- oder Reihenschlußgeneratoren. Die Feld- und die Ankerwicklung sind in Reihe geschaltet (Abb. 94/1). Die in der Abbildung verwendeten Klemmenbezeichnungen sind genormt. Die Enden der Wicklungen sind an das Klemmbrett des Generators herausgeführt und hier mit dem entsprechenden Buchstaben gekennzeichnet. Die in dieser Weise geschalteten *Hauptschlußgeneratoren* liefern nur eine Spannung, wenn der äußere Stromkreis geschlossen ist. Die Spannung steigt mit zunehmender Belastung, bis das Eisen magnetisch gesättigt ist. Die Spannung ist jedoch schwer zu regeln. Hauptschlußgeneratoren finden beispielsweise beim Betrieb von Scheinwerfern mit Kohlelichtbogen Verwendung.

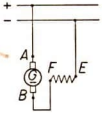


Abb. 94/1
Hauptschlußschaltung

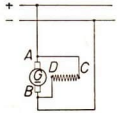


Abb. 94/2
Nebenschlußschaltung

b) Nebenschlußgeneratoren. Die Feld- und die Ankerwicklung sind parallelgeschaltet (Abb. 94/2). Die *Nebenschlußgeneratoren* erzeugen bei mäßiger Belastung eine konstante Spannung. Im Gegensatz zu den Hauptschlußgeneratoren erreicht der Nebenschlußgenerator bereits im Leerlauf, das heißt bei geöffnetem äußeren Stromkreis, seine volle Spannung. Die Leerlaufspannung ist am größten. Mit zunehmender Stromabnahme sinkt die Spannung. Da infolge des inneren Spannungsabfalls im Anker die Klemmenspannung absinkt, wird die Erregung schwächer. Dadurch sinkt die erzeugte Spannung weiter ab. Bei einem Kurzschluß fällt die Spannung fast auf Null.

Nebenschlußgeneratoren werden beispielsweise in der chemischen Industrie zur Erzeugung von Gleichstrom für die Großelektrolyse verwendet. Sie eignen sich auch gut zum Aufladen von Akkumulatorenbatterien. Ebenso sind die Lichtmaschinen der Kraftfahrzeuge Nebenschlußgeneratoren (Abbildung 95/1).

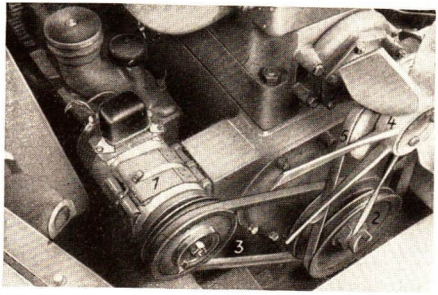


Abb. 95/1. Lichtmaschine eines Kraftfahrzeuges

1 Lichtmaschine, *2* Motorwelle, *3* Keilriementrieb der Lichtmaschine, *4* Lüfter, *5* Keilriementrieb des Lüfters

c) Verbundgeneratoren. Jeder Polschuh eines *Verbundgenerators* trägt zwei Feldwicklungen, von denen die eine in Reihe, die andere parallel zur Ankerwicklung geschaltet ist (Abb. 95/2). Dadurch werden die Vorteile beider Schaltungen ausgenutzt. Verbundgeneratoren liefern bei allen Belastungen nahezu eine konstante Spannung. Sie dienen als Stromerzeuger in Kraftanlagen, die noch mit Gleichstrom betrieben werden. Das ist zum Beispiel bei den Anlagen der Straßenbahn vieler Städte der Fall.

Auf Schiffen besteht auch bei Einhaltung besonderer Isolierungs- und Schutzvorschriften die Gefahr, daß der menschliche Körper von Strom durchflossen wird. Beim Berühren schadhafter Leitungsteile bildet nämlich der eiserne Schiffskörper eine gute Rückleitung für den Strom. Da der menschliche Körper durch Gleichstrom im allgemeinen weniger gefährdet ist als durch Wechselstrom, wird das Versorgungsnetz der Schiffe mit Gleichstrom betrieben. In den Schiffsanlagen werden die Gleichstromgeneratoren von Dieselmotoren oder Dampfturbinen angetrieben (Abb. 95/3).

Oft werden Gleichstromgeneratoren aber auch von Drehstrommotoren angetrieben. Diese Maschinenzusammenstellung bezeichnet man als *Motor-Generator-*

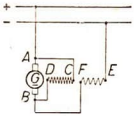


Abb. 95/2. Verbundschaltung

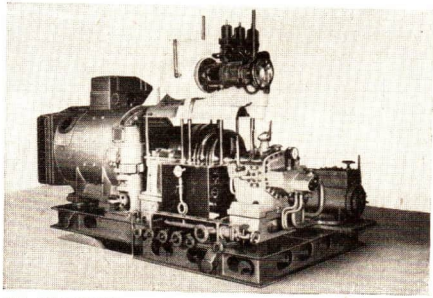


Abb. 95/3. Schiffsgeneratorenanlage

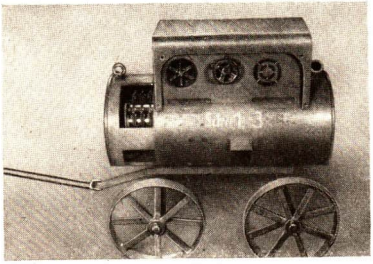


Abb. 96/1. Schweißumformer

Umformer. Ein viel verwendeter Umformer dieser Art ist der *Schweißumformer* (Abb. 96/1) für das elektrische Lichtbogenschweißen. Der von einem Drehstrommotor angetriebene Schweißgenerator ist eine Spezialkonstruktion mit besonderen Eigenschaften. Er muß unempfindlich gegen Kurzschlüsse sein und nach einem Kurzschluß schnell wieder die volle Spannung zum Zünden des Lichtbogens erzeugen. Außerdem muß die Kurzschlußstromstärke regelbar sein; denn zum Schweißen verschiedener Materialien werden unterschiedliche Stromstärken benötigt. Man benutzt Stromstärken von etwa 100 A bei einer Spannung von 15 V bis zu 500 A bei 40 V.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie hat man beim Gleichstromgenerator das Problem der Gleichrichtung der in den Spulen induzierten Wechselspannung gelöst?
2. Welchen Vorteil hat ein Trommelanker mit Kollektor gegenüber dem Doppel-T-Anker mit Kommutator?
3. Unter welcher Voraussetzung läßt sich das dynamoelektrische Prinzip nur anwenden?
4. Schildern Sie die Wirkungsweise von Haupt- und Nebenschlußgeneratoren und erklären Sie die Unterschiede bei einer wechselnden Belastung!

14. Gleichstrommotoren

1. Die Wirkungsweise des Gleichstrommotors. Mit der Umstellung der Energieversorgung auf Drehstrom ist die Bedeutung des Gleichstrommotors zwar stark zurückgegangen, aber es gibt auch heute noch wichtige Anwendungsgebiete für Gleichstrommotoren. Zum Betrieb von Straßenbahnen werden Gleichstrommotoren eingesetzt. Außerdem verwendet man Gleichstrommotoren als Anlaßmotoren in Kraftfahrzeugen. Auf Schiffen werden zahlreiche Gleichstrommotoren zum Betrieb von Pumpen, Ruder- und Spillanlagen sowie für das Ladegeschirr benötigt.

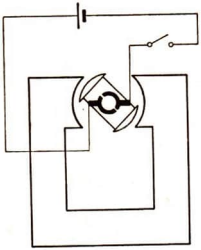
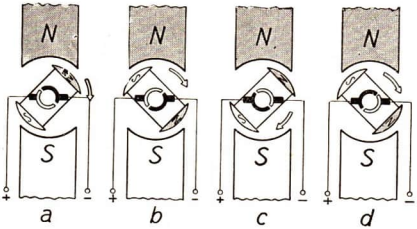


Abb. 96/2. Modell eines Gleichstrommotors

Die Gleichstrommotoren gleichen in ihrem Aufbau und in der Schaltung den Gleichstromgeneratoren. *Jeder Gleichstromgenerator kann als Motor laufen, um-*

Abb. 97/1
Verschiedene Stellungen des Ankers



gekehrt kann jeder Gleichstrommotor bei entsprechendem Antrieb elektrische Energie erzeugen. Die Abbildung 96/2 zeigt ein einfaches Modell eines Gleichstrommotors. Zwischen den Polen eines permanenten Magneten ist ein Doppel-T-Anker drehbar gelagert. Auf dem Doppel-T-Anker schleifen zwei Kohlebürsten, die an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen sind.

In der Abbildung 97/1a ist der Augenblick wiedergegeben, in dem sich der Nordpol des Feldmagneten und der Nordpol des Ankers, ebenso die beiden Südpole gegenüberstehen. Nach dem Grundgesetz der magnetischen Wirkung stoßen sie einander ab, so daß der Anker sich in der angegebenen Richtung dreht. In der Abbildung 97/1b hat sich der Anker um 90° weitergedreht. Bei dieser Stellung ziehen sich jeweils die ungleichnamigen Pole des Ankers und des Feldmagneten einander an, so daß die Drehung in der gleichen Richtung fortgesetzt wird. Liegt der Anker parallel zu den Kraftlinien des Statorfeldes, stehen sich also die Pole des Ankers und des Feldmagneten einander genau gegenüber, so wechseln die Kohlebürsten die Schleifringhälften des Kommutators. Dadurch wird die Stromrichtung im Anker umgekehrt und seine Magnetpole werden vertauscht. Abbildung 97/1c zeigt die Stellung des Ankers kurz nach diesem Wechsel. Hier stoßen wiederum die gleichnamigen Magnetpole einander ab. Nach der nächsten Vierteldrehung ziehen wieder die ungleichnamigen Pole einander an. Diese Vorgänge wiederholen sich fortlaufend, so daß der Anker rotiert.

2. Verhalten der Gleichstrommotoren bei Belastung. Da sich der Anker eines Gleichstrommotors im Magnetfeld der Feldmagneten dreht, wird in ihm eine Spannung induziert. Er wirkt also zusätzlich als Generator. Nach der Lenzschen Regel ist die Induktionsspannung ihrer Ursache, das heißt der angelegten Spannung, entgegengerichtet. Diese Gegenspannung wirkt somit dem Arbeitsstrom im Motor entgegen. Die induzierte Gegenspannung ist nach dem Induktionsgesetz um so größer, je schneller sich der Motor dreht.

Bei zunehmender mechanischer Belastung des Motors nimmt seine Drehzahl ab. Dadurch wird eine geringere Gegenspannung im Anker induziert. Folglich kann ein stärkerer Strom durch den Motor fließen. Der Motor kann nun die größere Belastung überwinden. Durch die Wechselwirkung von Drehzahl und induzierter Gegenspannung nimmt der Motor immer gerade die Stromstärke auf, die der mechanischen Belastung entspricht. Auf diese Weise regelt der Gleichstrommotor seine Energieaufnahme von selbst.

3. Technische Gleichstrommotoren. In technischen Gleichstrommotoren werden zur Erzeugung des Feldes Elektromagnete verwendet. Die Anker sind als Trommelanker

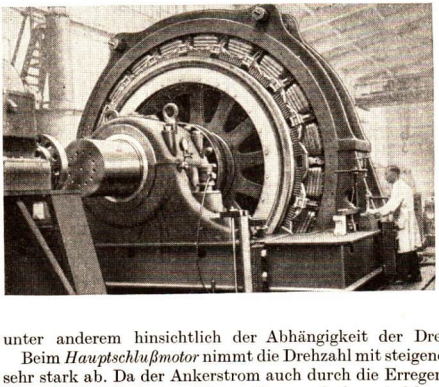


Abb. 98/1. Technischer Gleichstrommotor

mit einem Kollektor ausgerüstet (Abb. 98/1). Man spricht deshalb auch von *Kollektormotoren*. Hinsichtlich der Schaltung bestehen die gleichen Möglichkeiten wie bei den Gleichstromgeneratoren. Es gibt *Hauptschluß-*, *Nebenschluß-* und *Verbundmotoren* (Abb. 98/2). Diese Motorarten unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung.

Beim *Hauptschlußmotor* nimmt die Drehzahl mit steigender mechanischer Belastung sehr stark ab. Da der Ankerstrom auch durch die Erregerwicklungen fließt, wird das Magnetfeld bei einer größeren Stromaufnahme infolge einer erhöhten Belastung stärker. In einem stärkeren Feld wird nach dem Induktionsgesetz eine stärkere Gegenspannung induziert. Folglich verringert sich die Drehzahl. Erst bei der geringeren Gegenspannung kann der Motor einen der größeren Belastung entsprechenden stärkeren Strom aufnehmen. Hauptschlußmotoren nehmen daher bei geringer Drehzahl starke Ströme auf und entwickeln große Kräfte. Der Hauptschlußmotor hat somit ein großes Anzugsvermögen. Man verwendet ihn deshalb überall dort, wo eine von der Belastung abhängige Drehzahl erwünscht ist. Das trifft vor allem für die Straßenbahn zu.

Ohne Belastung braucht ein Motor nur eine geringe Leistung aufzunehmen. Die induzierte Gegenspannung kann in diesem Falle sehr groß sein, ohne daß der Motor in seinem Lauf behindert wird. Beim Hauptschlußmotor bewirkt aber eine geringere Stromstärke zugleich ein schwächeres Magnetfeld. Das wieder bedeutet nach dem Induktionsgesetz eine geringere Gegenspannung, so daß Stromstärke und damit die Leistung wächst. Der Motor erhöht seine Drehzahl noch weiter. Daher steigt im Leerlauf die Drehzahl des Hauptschlußmotors in unzulässigem Maße an, man sagt, der Motor „geht durch". Dabei kann der Anker durch die großen Fliehkräfte zerstört werden. *Hauptschlußmotoren dürfen deshalb nicht mit einem Riemenantrieb und anderen Kupplungsgliedern, bei denen eine völlige Entlastung des Motors möglich ist, an die Arbeitsmaschine angekuppelt werden.* Sie werden durch ein Getriebe mit der angetriebenen Maschine verbunden.

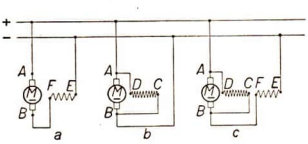
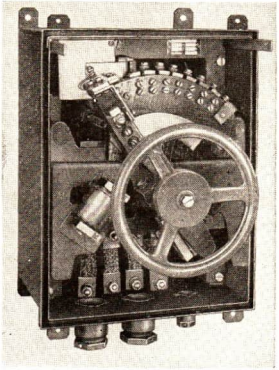


Abb. 98/2. a) Hauptschluß-, b) Nebenschluß-, c) Verbundmotor

Der *Nebenschlußmotor* hat dagegen auf Grund seines Feldes mit zunehmender Belastung nur eine geringe Drehzahlabnahme. Dafür ist sein Anzugs-

Abb. 99/1. Anlaßwiderstand



vermögen nicht so groß wie beim Hauptschlußmotor. Nebenschlußmotoren findet man in der Industrie, im Handwerk und im Haushalt überall dort, wo ein Antrieb mit möglichst gleichbleibender Drehzahl erwünscht ist.

Der *Verbundmotor* hat infolge seiner Hauptschlußwicklung ein gutes Anzugsvermögen, schwankt aber wegen seiner Nebenschlußwicklung nicht so stark in seinen Drehzahlen wie ein Hauptschlußmotor.

4. Anlassen, Drehzahlregelung und Änderung der Drehrichtung. Beim Einschalten eines Motors ist im Anker noch keine Gegenspannung vorhanden, da er sich in Ruhe befindet. Daher würde der Motor einen unzulässig hohen Einschaltstromstoß aufnehmen. Um diesen hohen Einschaltstromstoß zu vermeiden, schaltet man vor den Motor einen *Anlaßwiderstand* (Abb. 99/1). Dieser ist beim Einschalten des Motors voll eingeschaltet und wird dann stufenweise ausgeschaltet. Alle Motoren mit einer Leistung von mehr als 1 kW müssen mit einem Anlasser angefahren werden. Mit dem Anlaufen des Motors wächst die Gegenspannung, bis der Motor seine Betriebsdrehzahl und seine Betriebsstromstärke erreicht hat.

Zur *Regelung der Drehzahl* ist die letzte Stufe des Anlaßwiderstandes häufig als stufenlos regelbarer Widerstand konstruiert. Dadurch läßt sich die Klemmenspannung des Motors in gewissen Grenzen verändern. Mit abnehmender Spannung sinkt die Drehzahl des Motors.

Setzt man bei gleichem Ankerstrom die Stärke des Erregerstromes herab, so wird wegen des schwächeren Magnetfeldes eine geringere Gegenspannung im Anker induziert. Das führt aber zu einer Steigerung der Drehzahl, bis die Gegenspannung den Wert hat, der der Belastung entspricht. Auf diese Weise kann man die Drehzahl eines Gleichstrommotors über seine normale Betriebsdrehzahl hinaus steigern. Bei einem Nebenschlußmotor muß zur Feldschwächung ein Vorwiderstand vor die Nebenschlußwicklung geschaltet werden. Bei einem Hauptschlußmotor leitet man einen Teil des Ankerstromes nicht durch die Hauptschlußwicklung, sondern durch einen zu ihr parallelgeschalteten Widerstand.

Die *Drehrichtung eines Gleichstrommotors* kann geändert werden, indem man entweder die Feldwicklung oder die Ankerwicklung umpolt. Polt man beide um, etwa durch Vertauschen der beiden Außenanschlüsse, so hebt sich die Umkehrung wieder auf. Der Motor behält seine Drehrichtung bei.

5. Der Betrieb von Kollektormotoren mit Wechselstrom. Da ein Gleichstrommotor seine Drehrichtung beibehält, wenn man beide Außenanschlüsse an ihm vertauscht, kann man Gleichstrommotoren auch mit Wechselstrom antreiben. Voraussetzung hierfür ist lediglich, daß das Feld von einem Elektromagneten erzeugt wird. Erreger-

feld und Ankerfeld polen sich immer gleichzeitig entsprechend der Frequenz des Wechselstromes um. Wenn auch die Pole ständig wechseln, so bleiben sie doch für die in Abbildung **97**/1 gekennzeichneten Stellungen jeweils gleichnamige, sich abstoßende, beziehungsweise ungleichnamige, sich anziehende Pole.

Wegen des dauernden Ummagnetisierens der Eisenteile und infolge der induktiven Phasenverschiebung wird der Wirkungsgrad des Motors allerdings etwas schlechter. Während man die Eisenteile des Stators bei einem nur mit Gleichstrom betriebenen Motor aus Eisenguß herstellen kann, müssen die mit Wechselstrom betriebenen *Kollektormotoren* geblätterte Kerne haben (vgl. S. 58).

Allstrommotoren befinden sich in den meisten Haushaltsmaschinen, wie Staubsaugern, Mixgeräten, Rasierapparaten. Auch kleine Spielzeugmotoren mit elektromagnetischer Felderregung lassen sich mit Gleich- und Wechselstrom betreiben.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Begründen Sie am Beispiel der Gleichstromgeneratoren und -motoren, daß physikalische Vorgänge auch in umgekehrter Richtung ablaufen können!
2. Wie verhalten sich Haupt- und Nebenschlußmotoren bei wechselnder Belastung hinsichtlich ihrer Drehzahl? Begründen Sie die verschiedenartige Verwendung beider Motorenarten!
3. Warum muß man Gleichstrommotoren über einen Anlasser einschalten? Wie regelt man die Drehzahl?
4. Warum kann man Gleichstrom-Kollektormotoren auch mit Wechselstrom betreiben? Wie müssen die Eisenkerne bei Allstrommotoren gebaut sein?

15. Transformatoren

1. Induktionswirkungen mit Wechselstrom. Schiebt man in der Versuchsanordnung nach Abbildung **100**/1 den Gleitkontakt eines Schiebewiderstandes regelmäßig hin und her, so kann man in der Zuleitung zum Gleitkontakt eine veränderliche Spannung geringer Frequenz erzeugen. In die Zuleitung legt man nun eine Spule auf einem geschlossenen Eisenkern und ein Amperemeter. Auf dem Eisenkern befindet sich eine zweite Spule als Induktionsspule (Abb. **100**/2). An diese Spule wird ein Voltmeter mit Nullpunktsmittellage angeschlossen. Der Wechselstrom in der ersten Spule erzeugt ein Magnetfeld, das sich dauernd verändert und umgepolt wird.

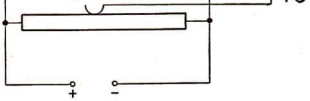


Abb. **100**/1. Versuchsanordnung zur Erzeugung einer Induktionsspannung

Abb. **100**/2. Versuche zur Wirkungsweise eines Transformators (manuelle Erzeugung der Primärspannung)

Die Feldlinien dieses magnetischen Wechselfeldes durchsetzen die Induktionsspule und induzieren in ihr ebenfalls eine Wechselspannung gleicher Frequenz. Die erzeugte Wechselspannung ist zeitlich gegenüber dem erregenden Wechselstrom verschoben und erreicht ihre Höchstwerte immer dann, wenn die Erregerstromstärke gleich Null ist und ihre Richtung wechselt.

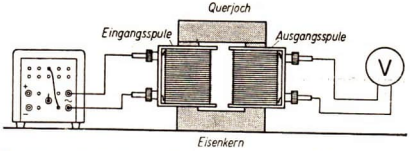


Abb. **101**/1. Versuch zur Wirkungsweise eines Transformators. Zur Vereinfachung ist nur das Voltmeter eingezeichnet.

Man schließt nun die erste Spule an eine Wechselspannung von etwa 6 V an und ersetzt die Drehspulinstrumente durch Dreheiseninstrumente (Abb. **101**/1). Das Amperemeter zeigt den Erregerwechselstrom an, der ein magnetisches Wechselfeld mit der Frequenz von 50 Hz erzeugt. Mit dem Voltmeter wird die Induktionswechselspannung gemessen.

Ein durch Wechselstrom erregter Elektromagnet erzeugt in einer Induktionsspule eine Wechselspannung.

2. Spannungswandlung im Transformator. Diese Erkenntnis wird in technischen Geräten, die man als **Umspanner** oder **Transformatoren** bezeichnet, praktisch ausgewertet. Aus Aufbauteilen läßt sich das Modell eines Transformators zusammenstellen (Abb. **101**/2). Die an die Spannungsquelle angeschlossene erste Spule nennt man *Primärspule*, die Induktionsspule, die zweite Spule, heißt *Sekundärspule*. Zur Vermeidung von Wirbelströmen sind der U-Eisenkern und das Querjoch aus dünnen, gegeneinander isolierten Weicheisenblechen hergestellt. In zwei Versuchsreihen werden Primär- und Sekundärspulen mit verschiedener Windungszahl (w_1, w_2) eingesetzt. Mit zwei Voltmetern werden jeweils die Primär- und die Sekundärspannungen (U_1, U_2) gemessen (Abb. **101**/3).

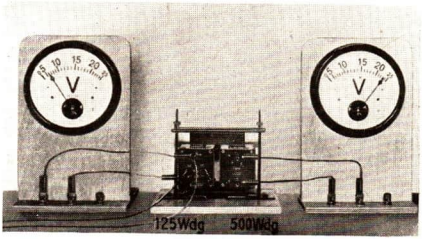


Abb. **101**/2. Modell eines Transformators

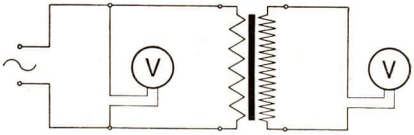


Abb. **101**/3. Nachweis der Abhängigkeit der Spannung von der Windungszahl

Versuchsreihe I ($w_2 \geqq w_1$)

Primärspule		Sekundärspule		Quotienten	
w_1	U_1	w_2	U_2	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{U_1}{U_2}$
125	6	125	5,8	1	1,03
125	6	250	11,6	0,5	0,52
125	6	500	21,4	0,25	0,28
125	6	750	33,0	0,17	0,18
125	6	1500	75,0	0,08	0,08

Versuchsreihe II ($w_2 \leqq w_1$)

Primärspule		Sekundärspule		Quotienten	
w_1	U_1	w_2	U_2	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{U_1}{U_2}$
1500	220	1500	212	1	1,04
1500	220	750	108	2	2,04
1500	220	500	72	3	3,06
1500	220	250	36	6	6,11
1500	220	125	19	12	11,6

Berechnet man für jeden Versuch die Quotienten aus den Windungszahlen beziehungsweise aus den Spannungswerten, so erkennt man, daß die beiden Quotienten in jedem Falle nahezu gleich sind:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}}.$$

An einem Transformator verhalten sich die Klemmenspannungen wie die Windungszahlen der Spulen. Mit Transformatoren kann man eine Wechselspannung in eine höhere oder niedrigere Wechselspannung umwandeln.

3. Die Leistung am Transformator. Nach dem Naturgesetz von der Erhaltung der Energie muß die von einem Transformator aufgenommene Leistung N_1 gleich der abgegebenen Leistung N_2 sein. Für einen verlustlos arbeitenden Transformator ergeben sich daher die Beziehungen:

$$N_1 = N_2,$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2.$$

Daraus kann man die Proportion bilden:

$$U_1 : U_2 = I_2 : I_1.$$

Die Stromstärken im Primär- und im Sekundärstromkreis verhalten sich umgekehrt wie die Spannungen.

Für das Verhältnis der Spannungen kann man das Verhältnis der Windungszahlen einsetzen:

$$w_1 : w_2 = I_2 : I_1.$$

Die Stromstärken im Transformator verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen der Spulen.

Diese Beziehungen gelten aber nur angenähert. Es gibt keinen völlig verlustlos arbeitenden Transformator. Die Verluste haben im wesentlichen folgende Ursachen:

a) Die Wicklungen der beiden Spulen haben einen Ohmschen Widerstand. Daher wird in ihnen ein Teil der elektrischen Energie in Wärmeenergie umgewandelt.

b) Die Eisenteile des Kerns werden dauernd ummagnetisiert. Dazu ist Energie notwendig, die ebenfalls als Wärmeenergie auftritt.

c) Auch in den einzelnen Blechen der geblätterten Eisenkerne werden noch geringe Wirbelströme induziert. Diese führen in den Eisenkernen zu einer weiteren Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie.

d) Ein geringer Teil des Magnetfeldes durchsetzt nicht die Eisenteile, sondern verläuft so durch die Luft, daß er nicht in der Sekundärspule wirksam wird. Man spricht von Streuverlusten.

An jedem Transformator treten sogenannte Energieverluste auf, so daß die Sekundärleistung immer kleiner ist als die Primärleistung. Die Gesamtenergie bleibt aber auch in diesem Falle konstant.

Das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Wirkleistung eines Transformators bezeichnet man als seinen Wirkungsgrad (η). Der Wirkungsgrad ist immer kleiner als 1. Je höher er liegt, um so geringer sind die Verluste im Transformator, und um so günstiger ist die Konstruktion.

$$\boxed{\eta = \frac{N_2}{N_1}}.$$

$$(0 < \eta < 1).$$

Mit Hilfe einer Versuchsanordnung nach Abb. **103/1** werden die Spannungen und die Stromstärken an einem

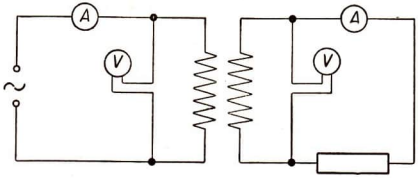


Abb. **103/1.** Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines Transformators

Transformatormodell gemessen. Aus den Meßergebnissen werden die *Primär-* und die *Sekundärscheinleistungen* berechnet. Der Wirkungsgrad kann nur näherungsweise aus den Werten der *Scheinleistung* (N_{S_1}, N_{S_2}) berechnet werden, da hier die Phasenverschiebung nicht gemessen werden kann. Damit ist der Leistungsfaktor zur Bestimmung der Wirkleistungen unbekannt.

In verschiedenen Versuchen werden unterschiedliche Eisenkerne verwendet.

a) *Volleisenkern mit losem Joch:*

$$w_1 = 250,\ U_1 = 27{,}5\ \text{V},\ I_1 = 4\ \text{A}:\ N_{S_1} = U_1 \cdot I_1 = 110\ \text{VA}$$

$$w_2 = 1500,\ U_2 = 72{,}5\ \text{V},\ I_2 = 0{,}24\ \text{A}:\ N_{S_2} = U_2 \cdot I_2 = 17{,}4\ \text{VA}$$

$$\eta \approx \frac{N_{S_2}}{N_{S_1}} \approx 0{,}16.$$

b) *Geblätterter Eisenkern mit losem Joch:*

$$w_1 = 250,\ U_1 = 52{,}5\ \text{V},\ I_1 = 4\ \text{A}:\ N_{S_1} = U_1 \cdot I_1 = 210\ \text{VA}$$

$$w_2 = 1500,\ U_2 = 228\ \text{V},\ I_2 = 0{,}45\ \text{A}:\ N_{S_2} = U_2 \cdot I_2 = 102{,}6\ \text{VA}$$

$$\eta \approx \frac{N_{S_2}}{N_{S_1}} \approx 0{,}49.$$

c) *Geblätterter Eisenkern mit Joch in Spannvorrichtung:*

$$w_1 = 250,\ U_1 = 52{,}5\ \text{V},\ I_1 = 4\ \text{A}:\ N_{S_1} = U_1 \cdot I_1 = 210\ \text{VA}$$

$$w_2 = 1500,\ U_2 = 237\ \text{V},\ I_2 = 0{,}46\ \text{A}:\ N_{S_2} = U_2 \cdot I_2 = 109\ \text{VA}$$

$$\eta \approx \frac{N_{S_2}}{N_{S_1}} \approx 0{,}52.$$

Aus den Versuchen erkennt man, wie durch die Verringerung der Wirbelstrombildung im geblätterten Eisenkern der Wirkungsgrad erheblich verbessert wird.

Die Verspannung der Eisenkerne setzt die Streuverluste herab, so daß bei gleicher Leistungsaufnahme die abgegebene Leistung noch etwas größer wird.

4. Technische Transformatoren. Technische Transformatoren sind so konstruiert, daß sie erheblich bessere Wirkungsgrade als die Modelle aus Aufbauteilen haben. Sie liegen bei 0,9 ··· 0,98. Der Wirkungsgrad eines Transformators ist von seiner Belastung abhängig. Insbesondere verschlechtert sich der Wirkungsgrad bei Belastung durch induktive und kapazitive Widerstände infolge der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke. Die Phasenverschiebung sucht man daher möglichst gering zu halten.

In allen Zweigen der Elektrotechnik, in denen mit Wechselstrom gearbeitet wird, werden Transformatoren verwendet. Viele elektrische Geräte und Apparaturen werden mit kleineren Spannungen, andere mit größeren Spannungen betrieben, als sie das Versorgungsnetz liefert.

Im Versorgungsnetz selbst werden ebenfalls Transformatoren eingesetzt. Die in den Kraftwerksgeneratoren erzeugten Spannungen werden zunächst heraufgesetzt und dann für die Verbraucher wieder heruntertransformiert.

Es gibt zwei Hauptarten von Transformatoren, *Kern-* und *Manteltransformatoren* (Abbildung **105**/1). Für den Bau von Manteltransformatoren wird zwar mehr Eisen benötigt; ihr Wirkungsgrad ist aber etwas besser, da die Streuverluste nur sehr gering sind.

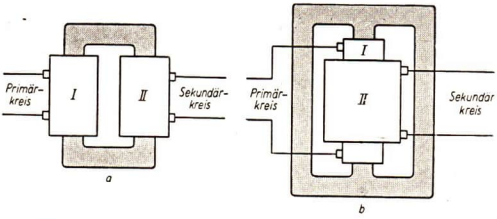


Abb. **105**/1 a) Kerntransformator, b) Manteltransformator

Da im elektrischen Versorgungsnetz mit Drehstrom gearbeitet wird, sind hierfür Transformatoren konstruiert worden, in denen die drei Wechselspannungen gleichzeitig transformiert werden können (Abb. **105**/2). In einem Gehäuse sind drei Transformatorensysteme vereinigt. Auf jedem Schenkel des dreiteiligen Eisenkerns sind eine Primär- und eine Sekundärspule übereinander gewickelt. Die drei Primärwicklungen und die drei Sekundärwicklungen können unter sich in Stern- oder Dreieckschaltung verbunden werden. Wenn ein Sternpunktleiter herausgeführt werden soll, muß die Sternschaltung angewendet werden (Abb. **105**/3).

Da in allen Transformatoren elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird, muß für eine ausreichende *Kühlung* gesorgt werden. Bei Kleintransformatoren

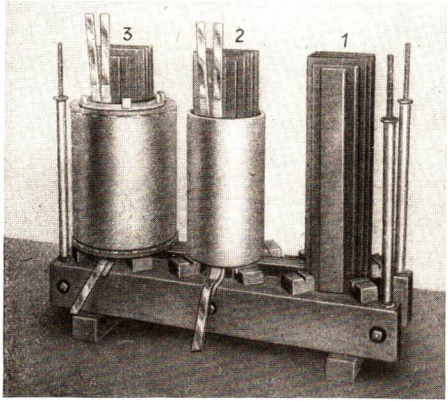


Abb. **105**/2. Drehstromtransformator, 1 Eisenkern, 2 mit aufgesetzter Primärspule, 3 mit Sekundärspule und Primärspule

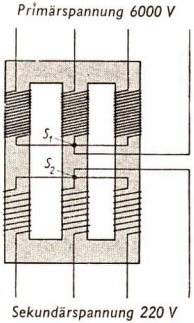


Abb. **105**/3. Sternschaltung bei einem Drehstromtransformator

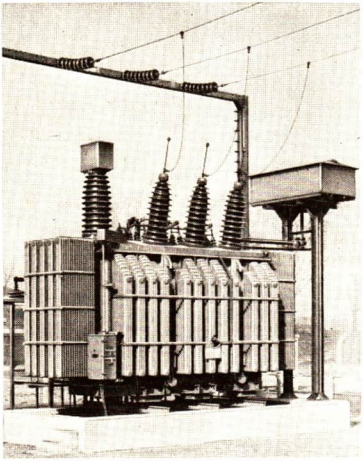


Abb. **106**/1
Ölgekühlter Großtransformator

genügt die natürliche Wärmeabgabe an die Umgebung. Größere Transformatoren haben besondere Einrichtungen für die Kühlung. Als Kühlmittel benutzt man Luft oder Öl. Transformatoren können durch Gebläse künstlich belüftet werden. Sehr häufig sind Transformatoren in ein Gehäuse eingebaut, das mit Kühlöl gefüllt und außen zur besseren Wärmeableitung mit Kühlrippen versehen ist (Abb. **106**/1). Bei Höchstleistungstransformatoren wird das Kühlöl durch eine Pumpe in Umlauf gebracht und außerhalb des Transformators in einem besonderen Kühler durch Luft oder Wasser gekühlt.

Sehr verbreitet sind die *Kleintransformatoren*. In fast jedem Haushalt findet man einen *Klingeltransformator* (Abb. **106**/2). Die Sekundärwicklung ist häufig unterteilt, so daß man Sekundärspannungen von 3 V, 5 V und 8 V entnehmen kann. Zum Betrieb der Modelleisenbahnen benutzt man etwas größere Transformatoren, die eine mehrfach unterteilte Sekundärwicklung haben. Über einen Schalter kann man in Stufen von je 2 V Spannungen von 0···20 V entnehmen. Hinter den Transformator ist ein Gleichrichter geschaltet, der den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt. Dadurch kann man die Motoren in ihrer Drehrichtung umschalten.

Ähnlich sind die *Stromversorgungsgeräte* für physikalische Versuche konstruiert (Abb. **107**/1). Für den Betrieb von Leuchtröhren sind Kleintransformatoren erforderlich, die die Netzspannung auf 3000···6000 V herauftransformieren (Abb. **107**/2). In Rundfunkgeräten werden *Netztransformatoren* verwendet, die eine geteilte Primärwicklung haben, so daß man sie an 110 V oder an 220 V anschließen kann. Sie haben mehrere Sekundärwicklungen, an denen man verschiedene Spannungen zum Betrieb der Elektronenröhren abnehmen kann (Abb. **107**/3).

Im elektrischen Versorgungsnetz werden *Großtransformatoren* eingesetzt. Die Kraftwerksgeneratoren erzeugen

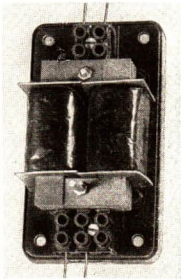


Abb. **106**/2. Klingeltransformator

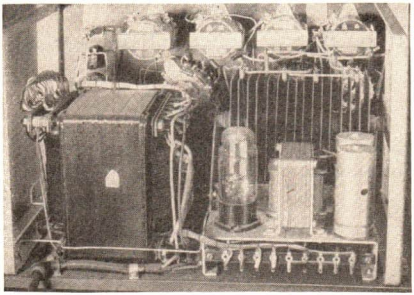


Abb. **107**/1. Großes Stromversorgungsgerät des VEB Elektro-Mechanik Berlin

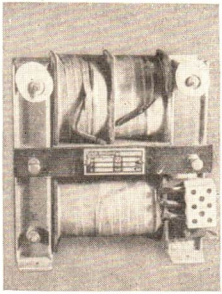


Abb. **107**/2. Kleintransformator für Leuchtröhren

die elektrische Energie meist bei einer Spannung von 6000 ··· 10000 V. Um die Leistung eines Generators von beispielsweise 30 MW bei einer Spannung von 6000 V mit Hilfe des Überlandnetzes zu übertragen, wäre eine Stromstärke von 5000 A erforderlich. Es gilt nämlich die Beziehung

$$30000000\ \mathrm{W} = 6000\ \mathrm{V} \cdot 5000\ \mathrm{A}.$$

Für die Versorgung elektrischer Vollbahnen mit Einphasen-Wechselstrom wird beispielsweise die Spannung zunächst von 6000 V auf 60000 V heraufgesetzt. Dadurch sinkt die Stromstärke auf $\frac{1}{10}$ des sonst bei gleicher Leistung auftretenden Wertes. Diese erheblich geringere Stromstärke kann man in Leitungen mit entsprechend geringem Querschnitt fortleiten. So werden durch Übertragung von Hochspannung in den Überlandleitungen große Mengen wertvollen Leitungsmaterials eingespart. Außerdem sind die Energieverluste in einer Hochspannungsleitung erheblich kleiner. Bei jeder Leitung tritt ein Spannungsabfall auf, der als Produkt aus der Stromstärke und dem Leitungswiderstand zu berechnen ist. In einer Hochspannungsleitung sind die Stromstärken zur Übertragung einer bestimmten Leistung kleiner als in einer

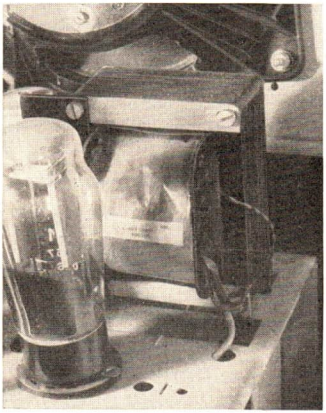


Abb. **107**/3. Netztransformator

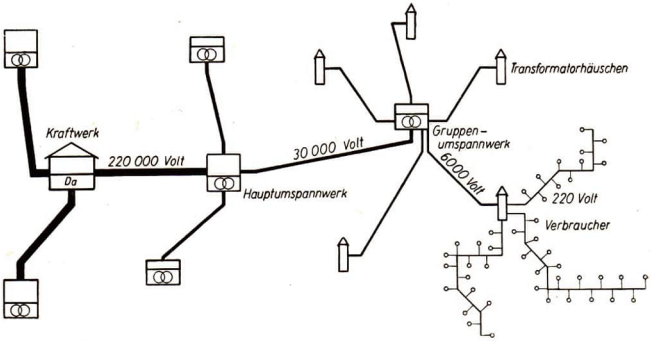


Abb. **108**/1. System der Abspannung von Hochspannung im Versorgungsnetz

Niederspannungsleitung. Da man aber mit geringeren Leitungsquerschnitten arbeitet, ist der Widerstand der Hochspannungsleitung dementsprechend größer. So ist der Spannungsabfall in beiden Leitungen gleich. Der Leistungsverlust in einer Leitung ist aber gleich dem Produkt aus Spannungsabfall und Stromstärke. Wegen der kleineren Stromstärke ist der Leistungsverlust in der Hochspannungsleitung kleiner als in einer Niederspannungsleitung. Infolge dieser beiden wirtschaftlichen Vorteile, Einsparung von Leitungsmaterial und geringerer Energieverlust, lohnt sich der Mehraufwand, der durch den Einbau der Transformatoren in das Energieversorgungsnetz entsteht. Die Einsparungen überwiegen die Kosten für die Transformatoren. Im Siebenjahrplan unserer Republik ist vorgesehen, daß bis 1965 das Energieversorgungsnetz weiter ausgebaut wird. Dabei werden erstmalig Fernleitungen mit einer Spannung von 380000 V gebaut werden.

Für die Zuleitung der elektrischen Energie zum Verbraucher wird die Spannung stufenweise in verschiedenen Umspannwerken auf 15000 ··· 30000 V, dann auf 3000 bis 6000 V und schließlich auf die Netzspannung von 220 V heruntertransformiert oder, wie man sagt, abgespannt (Abb. **108**/1.)

5. Schweißtransformatoren — Induktionsschmelzöfen. In der Technik finden verschiedene Geräte Verwendung, in denen Transformatoren zur Entwicklung von Wärme zum Metallschweißen und -schmelzen ausgenutzt werden. In Abbildung **108**/2 ist das Modell eines *Schweißtransformators* aus Aufbauteilen zusammengestellt. Als Primärspule wird eine Spule mit 1500 Windungen an

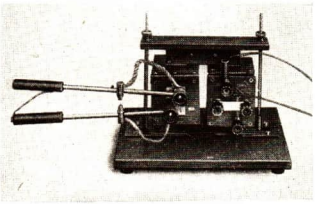


Abb. **108**/2
Modell eines Schweißtransformators

die Netzspannung von 220 V gelegt. Die Sekundärspule hat nur 10 Windungen aus dickem Kupferdraht. An ihren Klemmen sind die Teile einer *Schweißzange* angeschraubt. Zwischen den Kontaktstiften liegen zwei dünne Blechstreifen übereinander. Man mißt die Primärspannung und die Primärstromstärke und errechnet daraus die aufgenommene Leistung:

$$U_1 = 220\ \text{V},\ I_1 = 3\ \text{A}: \quad N_1 = U_1 \cdot I_1 = 660\ \text{W}.$$

Nimmt man den auf S. 104 berechneten Wirkungsgrad des Transformatorenmodells $\eta = 0{,}52$ an, so ergibt sich:

$$N_2 = \eta \cdot N_1 = 0{,}52 \cdot 660\ \text{W} \approx 343\ \text{W}.$$

Als Sekundärspannung wird $U_2 = 0{,}5$ V gemessen. Aus $N_2 = U_2 \cdot I_2$ ergibt sich:

$$I_2 = \frac{N_2}{U_2} \approx \frac{343}{0{,}5}\ \text{A} \approx 686\ \text{A}.$$

Diese große Stromstärke in der Sekundärspule führt an der Berührungsstelle zwischen den Kontaktstiften und zwischen den Blechen zu einer großen Wärmeentwicklung; denn dort ist der Widerstand beim Übergang des Stromes vom Kontaktstift zum Blech sehr groß. Dadurch schmelzen die Bleche an dieser Stelle und werden miteinander verschweißt.

Technische Maschinen, die nach diesem Grundprinzip arbeiten, nennt man *Punktschweißmaschinen* (Abb. **109**/1). In sogenannten *Rollenschweißmaschinen* sind an Stelle der Kontaktstifte zwei Rollen angebracht (Abb. **109**/2). Zwischen diesen Rollen kann man zwei dünne Bleche durch eine fortlaufende Schweißnaht verbinden. In ähnlicher Weise arbeiten *Stumpfschweißmaschinen* (Abb. **110**/1). In zwei Kupferklemmen, die an einen

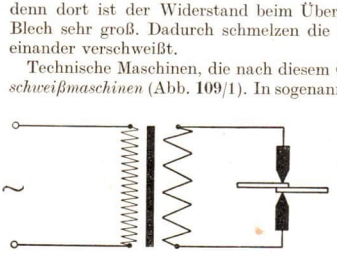


Abb. **109**/1
Punktschweißanlage

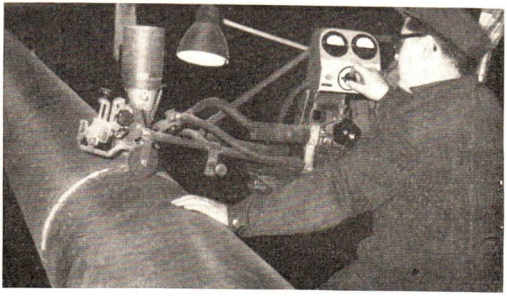


Abb. **109**/2
Rollenschweißmaschine

Schweißtransformator angeschlossen sind, werden die zwei zu verbindenden Werkstücke eingespannt. Preßt man die beiden Stücke gegeneinander, so entsteht an der Berührungsstelle wegen des großen Widerstandes eine hohe Wärmeentwicklung, so daß die beiden Werkstücke miteinander verschweißt werden. Alle diese Schweißverfahren werden unter der Sammelbezeichnung *elektrisches Widerstandsschweißen* zusammengefaßt.

Im *Induktionsschmelzofen* wird ebenfalls das Transformatorprinzip angewendet. Die Sekundärspule besteht hier aus einer einzigen kurzgeschlossenen Windung. In dem Modell aus Aufbauteilen wird sie durch das Metall der ringförmigen Schmelzrinne gebildet (Abb. **110**/2). In der technischen Ausführung stellt das metallische Schmelzgut selbst die Sekundärwindung dar. In der Schmelzrinne treten sehr hohe Stromstärken auf. Mit dem Modell kann man in kurzer Zeit Bleistücke schmelzen. Die technischen Induktionsschmelzöfen dienen vorwiegend zum Schmelzen von Edelstahllegierungen.

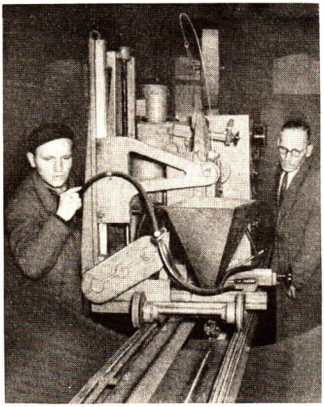


Abb. **110**/1. Stumpfschweißmaschine

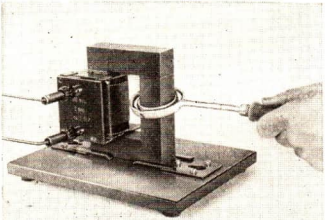


Abb. **110**/2
Modell eines Induktionsschmelzofens

6. Zündanlagen von Kraftfahrzeugen. Bei den Ottomotoren ist eine *Fremdzündung* des verdichteten Kraftstoff-Luftgemisches erforderlich. Diese erfolgt durch einen elektrischen Funken, der zwischen den Polen einer Zündkerze überspringt. Der Funke wird durch eine *Zündanlage* erzeugt. Diese besteht aus folgenden Teilen:

Spannungsquelle,
Zündspulensatz,
Zündunterbrecher mit Kondensator,
Zündverteiler,
Zündkerze.

Der Zündspulensatz ist praktisch ein Transformator. Die Sekundärspule hat mehr Windungen als die Primärspule. Als Spannungsquelle dient die Batterie des Kraft-

fahrzeugs. Bei geschlossenem Zündschalter und Zündunterbrecher fließt ein Strom durch die Primärspule.

Der Zündunterbrecher ist ein *Rotationsschalter*, der über ein Zahnradgetriebe vom Motor angetrieben wird. Eine Nockenscheibe öffnet seine Kontakte immer in dem Augenblick, in dem in einem Zylinder die Zündung erfolgen muß. Durch dieses plötzliche Abschalten des Primärstromkreises entsteht eine hohe Selbstinduktionsspannung. Sie ladet kurzzeitig einen Kondensator auf, der zu dem Unterbrecher parallel geschaltet ist. Mit dem Abklingen dieses Stromstoßes bricht das Magnetfeld der Primärspule zusammen. Dadurch wird in der Sekundärspule eine hohe Spannung induziert. Diese reicht aus, um an der Zündkerze den Zündfunken überspringen zu lassen. Mit dem Zündunterbrecher ist im gleichen Gehäuse ein zweiter Rotationsschalter, der Zündverteiler, vereinigt. Durch diesen wird die Zündspannung immer auf die Zündkerze geschaltet, die gerade zünden muß.

Neben der Batteriezündung findet man auch sogenannte *Magnetzündanlagen*. Sie ähneln im Gesamtaufbau der Batteriezündung. Als Spannungsquelle dient aber auch hier eine besondere Dynamomaschine, die mit dem Unterbrecher und dem Verteiler in einem Gehäuse untergebracht ist.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Erklären Sie die Wirkungsweise der Transformatoren mit Hilfe eines Grundversuchs zur elektromagnetischen Induktion! Welche Bedeutung haben dabei die Primär- und die Sekundärspule eines Transformators?
2. Warum gilt die theoretische Beziehung zwischen der Primär- und der Sekundärspannung und den entsprechenden Stromstärken nur angenähert?
3. Nennen Sie Transformatoren, die Sie selbst schon benutzt haben, und geben Sie die Art der Umspannung an!

16. Die elektrische Energieversorgung

1. Bedeutung der elektrischen Energie für die Volkswirtschaft. Die Versorgung mit Energie ist für das Leben der Menschen von größter Bedeutung. Wir benötigen Wärme, mechanische Energie und Licht. Vor allem ist die heutige *Industrieproduktion* von der Energieversorgung abhängig. So braucht man zur Herstellung einer Tonne Aluminium 20000 kWh, einer Tonne Elektrostahl 1000 kWh und eines Personenkraftwagens bis zu 2000 kWh Energie. Auch die Landwirtschaft benötigt für die zunehmende *Mechanisierung* immer mehr Energie. Nicht zu vergessen ist der steigende Energiebedarf unserer Haushalte. Unter allen Formen der Energie hat die elektrische Energie eine besondere volkswirtschaftliche Bedeutung. Diese Energie hat gegenüber anderen Energieformen wesentliche Vorteile.

Elektrische Energie kann durch Leitungen über große Entfernungen fortgeleitet werden.
Elektrische Energie läßt sich technisch leicht in viele andere Energieformen umwandeln.

Es wurden bereits verschiedenartige *Geräte zur Erzeugung von Wärme und Licht* beschrieben. Große Bedeutung haben die *Elektromotoren*, in denen elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird. In anderen Geräten und Apparaten,

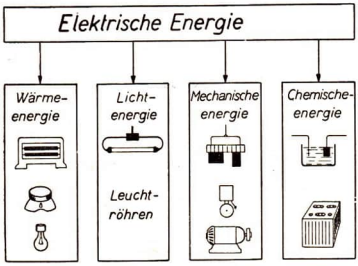


Abb. **112**/1
Schematische Übersicht über die Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen

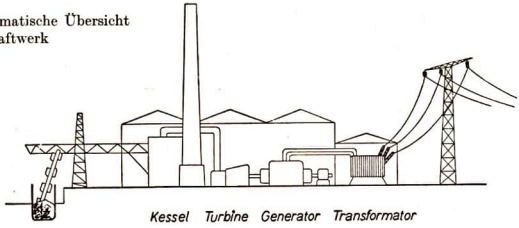
wie *Klingeln, Telefonen, Lautsprechern, automatischen Schaltern*, werden ebenfalls die magnetisch-mechanischen Wirkungen des elektrischen Stromes ausgenutzt. Aus der *chemischen Industrie* ist die Anwendung der chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes nicht fortzudenken. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer Anwendungsmöglichkeiten des elektrischen Stromes, die erst später im Unterricht besprochen werden, zum Beispiel die *drahtlose Nachrichtenübermittlung in Funk und Fernsehen*, die Erzeugung von *Röntgenstrahlen* für medizinische und technische Zwecke (Abb. **112**/1). Da der elektrische Strom so vielseitig angewendet werden kann, wird er praktisch in allen Zweigen der Volkswirtschaft benötigt.

2. Die Energieerzeugung — Kraftwerke. Die elektrische Energie wird fast ausschließlich in großen Kraftwerken in Drehstromgeneratoren erzeugt. Man unterscheidet zwei Hauptformen von Kraftwerken: *Wärmekraftwerke* und *Wasserkraftwerke*. Daneben sind kleinere Anlagen als *Windkraftwerke* und *Sonnenkraftwerke* zum Teil als Versuchsanlagen in Betrieb.

Bei den *Wärmekraftwerken* gibt es verschiedene Arten:

a) *Dampfkraftwerke* mit Dampfturbinen als Antriebsmaschinen (Abb. **112**/2). Zur Dampferzeugung dienen Kesselanlagen mit festem oder flüssigem Brennstoff (Kohle, Öl).
b) *Reaktorkraftwerke* mit Dampfturbinen als Antriebsmaschinen (Abb. **113**/1). Der Dampf wird durch die in einem Kernreaktor entwickelte Wärme erzeugt.
c) *Motorenkraftwerke* mit Dieselmotoren als Antriebsmaschinen.
d) *Gasturbinen-Kraftwerke*.

Abb. **112**/2. Schematische Übersicht über ein Dampfkraftwerk



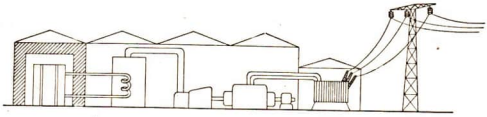


Abb. **113**/1
Schematische Übersicht über ein Reaktorkraftwerk

Die Wasserkraftwerke haben nach dem zur Verfügung stehenden Wassergefälle verschiedene Typen von Wasserturbinen als Antriebsmaschinen. Das Wassergefälle wird entweder durch Aufstauen eines großen Flusses um einige Meter hinter einem Staudamm (vgl. Abb. **120**/1) oder durch Aufstauen eines kleineren Flusses in einem Gebirgstal hinter einer Talsperrenmauer mit einer größeren Stauhöhe erzielt (Abb. **113**/2). In einigen Fällen steht auch ein natürliches hohes Wassergefälle zur Verfügung.

Welche Kraftwerke in einem Lande gebaut werden, hängt weitgehend von den geographischen Verhältnissen und den zur Verfügung stehenden Brennstoffen ab. Der Standort von Wasserkraftwerken ist immer von den geographischen Bedingungen abhängig. Der Standort der Wärmekraftwerke mit Verbrennung von Brennstoffen wird so gewählt, daß sie entweder in der Nähe der Brennstoffvorkommen liegen oder aber die Brennstoffe leicht auf dem Wasserwege zu ihnen transportiert werden können. So werden zum Beispiel die neuen *Großkraftwerke Lübbenau* und *Vetschau* ganz in der Nähe bereits vorhandener beziehungsweise neu aufzuschließender Braunkohlen-Tagebaue errichtet. Für die Kühlung und die Kondensation des Dampfes ist es erforderlich, daß Dampfkraftwerke nahe an Gewässern liegen.

Da die Brennstoffe, wie Kohle, Öl und Gase, mit der Weiterentwicklung der chemischen Industrie in zunehmendem Maße als chemische Rohstoffe benötigt werden, werden in den kommenden Jahrzehnten weitere Reaktorkraftwerke entstehen. Die aus Kernenergie gewonnene Elektroenergie wird immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Reaktorkraftwerke sind mit ihrem Standort eigentlich nur an ein

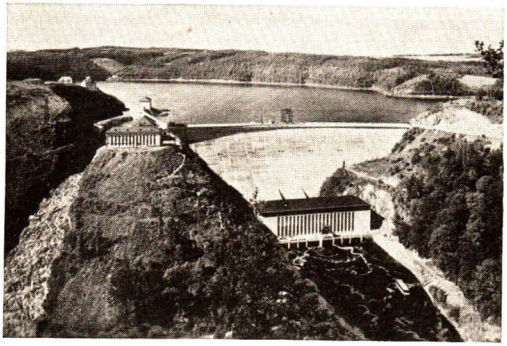


Abb. **113**/2
Bleiloch-Talsperre

Gewässer gebunden. Aus Sicherheitsgründen werden sie aber in dünn besiedelten Landschaften errichtet. Die Kraftwerksgeneratoren erzeugen die elektrische Energie meist mit einer Spannung von 6000 ··· 10000 V. Mit dem Kraftwerk ist immer ein Umspannwerk verbunden, in dem die Spannung auf 110000, 220000 und neuerdings auf 380000 V herauftransformiert wird (Abb. **114**/1).

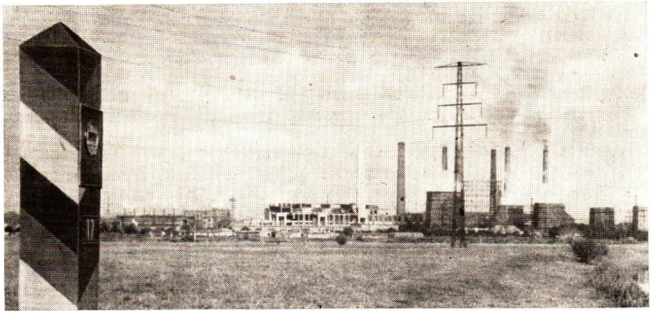


Abb. **114**/1. Kraftwerk Hirschfelde mit Hochspannungsleitung. Dieses Kraftwerk liegt an der Oder-Neiße-Friedensgrenze. Es arbeitet mit Braunkohle aus der Volksrepublik Polen und liefert ihr dafür einen Teil seiner elektrischen Energie.

3. Das Energieversorgungsnetz. Die Hochspannungsleitungen, die von den Kraftwerken in das Land hinausführen, sind untereinander zu einem Netz, dem *Verbundnetz*, verbunden. Dadurch bringt der Ausfall eines Kraftwerkes keine Störungen in der Versorgung der Verbraucher mit sich. Bei einer Störung in der Leitung kann der betroffene Leitungsabschnitt ausgeschaltet werden. Auch dabei tritt kaum eine Störung der Versorgung ein. An das Verbundnetz sind die *Hauptumspannwerke* angeschlossen (Abb. **115**/1). Das sind Transformatorenstationen, von denen aus die Versorgung eines Landteils erfolgt. Hier wird die Hochspannung auf 15000···30000 V heruntergesetzt. Von den Hauptumspannwerken führt ein Netz mit Leitungen für diese Spannungen zu einer Reihe von *Gruppenumspannwerken*, in denen die Spannung noch weiter auf 3000···6000 V heruntergesetzt wird. In ländlichen Bezirken sind die Leitungen von den Gruppenumspannwerken als Freiluftleitungen weitergeführt zu den *Transformatorenhäuschen* in den einzelnen Dörfern (Abb. **115**/2). In den Städten sind diese Leitungen meist als *Erdkabel* verlegt und führen zu den im Stadtgebiet verteilten *Transformatorenstationen*. In dieser letzten Transformationsstufe wird die Spannung auf die bekannte Netzspannung von 220 V/380 V gebracht. Ein Sternpunktleiter wird nur in dem Verbrauchernetz mitgeführt. In kleinere Wohnhäuser werden ein Hauptleiter und der Sternpunktleiter geführt (Abb. **116**/1). Hier steht also nur die Sternspannung von 220 V zur Verfügung. Damit alle Hauptleiter an-

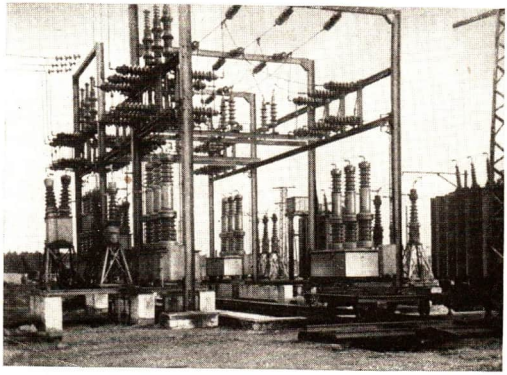
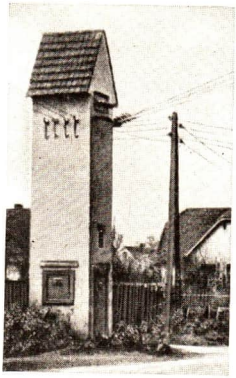


Abb. 115/1. Teilansicht eines Hauptumspannwerkes

nähernd gleichmäßig belastet werden, wechseln von Haus zu Haus die angeschlossenen Hauptleiter. In den Städten sind die Häuser vielfach über Erdkabel angeschlossen. In größeren Gebäuden, zum Beispiel Schulen, Verwaltungsgebäuden und



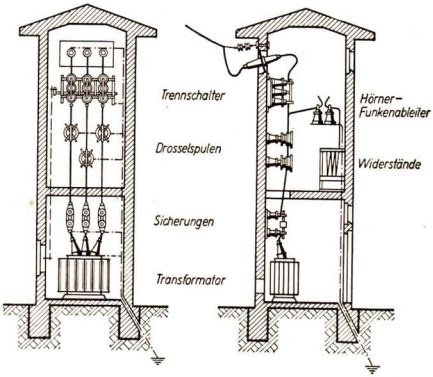


Abb. 115/2. Transformatorenhäuschen

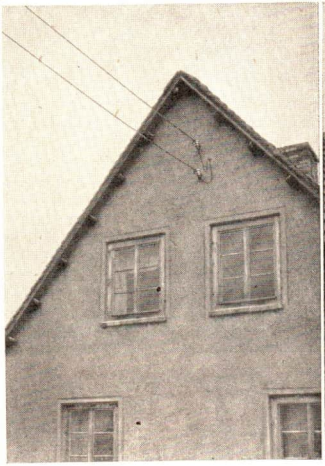


Abb. **116**/1. Anschluß eines Wohnhauses an das Versorgungsnetz

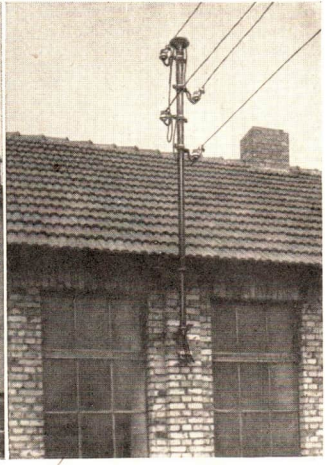


Abb. **116**/2. Anschluß der Maschinenhalle einer MTS an das Versorgungsnetz

Wohnblocks, sind die elektrischen Anlagen der Räume gruppenweise an die drei Hauptleiter angeschlossen. Werkstätten und Fabriken haben im allgemeinen eine Vierleiteranlage (Abb. **116**/2). Hier sind alle drei Hauptleiter und der Sternpunktleiter verlegt, so daß Drehstrommotoren betrieben werden können. Größere Industriebetriebe haben häufig eine eigene elektrische Energieversorgungsanlage, mit der sie ihren Betrieb ganz oder teilweise versorgen können. Einen Ausschnitt aus dem Versorgungsnetz eines mittleren Industriebetriebes zeigt die Abbildung **117**/1. Die Versorgung mit elektrischer Energie kann durch das Netz und zwei betriebseigene Generatoren erfolgen.

4. Die Energieverbraucher. Elektrische Energie wird in allen Zweigen der Wirtschaft benötigt. Hier können nur die wichtigsten Verbrauchergruppen erwähnt werden. Der Hauptverbrauch an elektrischer Energie erfolgt in der Industrieproduktion. Hier steht die Grundstoffindustrie mit ihren wichtigsten Zweigen, dem Bergbau, der Metallurgie und der chemischen Industrie, an erster Stelle. Über die Hälfte der 1956 in der DDR verbrauchten Elektroenergie benötigte die Grundstoffindustrie. Diese Energie dient zum Antrieb von Maschinen und Fördereinrichtungen mittels Elektromotoren sowie als Wärmequelle. In der chemischen Industrie wächst der Verbrauch elektrischer Energie insbesondere für elektrolytische Prozesse ständig.

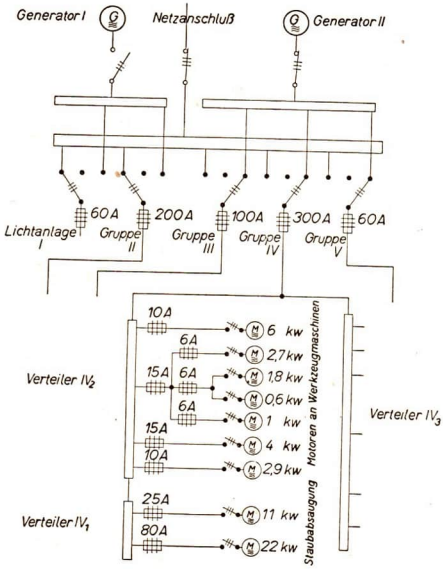


Abb. **117/1.** Ausschnitt aus dem Versorgungsnetz eines Industriebetriebes

Die Steigerung der Produktion im Rahmen des Siebenjahrplanes hat auch für die chemische Industrie einen erhöhten Elektroenergieverbrauch zur Folge.

In der metallverarbeitenden Industrie werden die meisten Werkzeugmaschinen durch Elektromotoren angetrieben. Große Mengen elektrischer Energie werden für das Elektroschweißen benötigt. Weitere wichtige Verbraucher elektrischer Energie sind die Leichtindustrie und die Lebensmittelindustrie.

In der landwirtschaftlichen Produktion findet man zahlreiche Elektromotoren zum Antrieb von Maschinen und eine Reihe von elektrischen Wärmegeräten, wie Futterdämpfer, Brutschränke, Infrarotstrahler. Das Verkehrswesen wird in zunehmendem Maße elektrifiziert. Die Deutsche Reichsbahn betreibt eine Reihe von Strecken im Raum Leipzig-

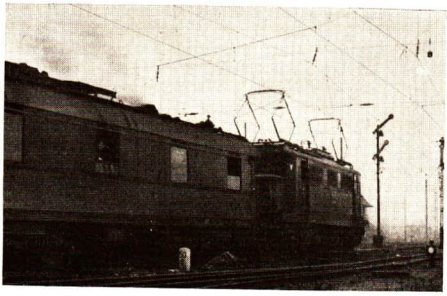


Abb. **117/2**
Fahrleitungen der Deutschen Reichsbahn

Magdeburg schon mit elektrischen Lokomotiven (Abbildung **117**/2). viele Nahverkehrsmittel in den Großstädten, wie S-Bahn, Straßenbahn und O-Bus, haben elektrischen Antrieb.

Der Verbrauch elektrischer Energie in den Haushaltungen ist in den letzten Jahren außerordentlich angestiegen. Zur Erleichterung der Hausarbeit werden immer mehr Haushaltmaschinen entwickelt: elektrische Kochgeräte, Staubsauger, Waschmaschinen, Kühlschränke, Küchenmaschinen und andere.

5. Der Energieverbrauch. Der Bedarf an elektrischer Energie ist nicht gleichmäßig auf den ganzen Tag verteilt (Abbildung **118**/1). In den Morgen- und Abendstunden ergeben sich *Spitzenbelastungszeiten*. In den Haushalten wird Strom zur Beleuchtung und zum Kochen benötigt, der Berufsverkehr erfordert eine größere Verkehrsdichte der Nahverkehrsmittel, in den Betrieben läuft die Produktion. Im Sommer sind die Belastungsspitzen nicht so ausgeprägt, und es wird insgesamt weniger Energie benötigt, weil die Beleuchtung nicht so lange und Heizgeräte kaum benutzt werden.

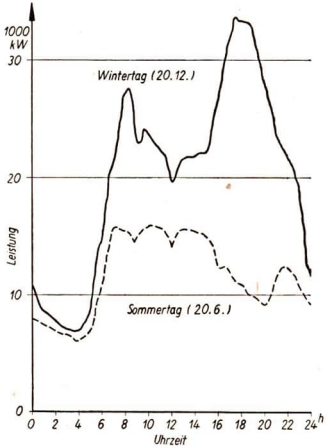


Abb. **118**/1. Belastungskurve eines Kraftwerkes

Die Leistung der Kraftwerke müßte so bemessen sein, daß sie den Anforderungen in den Hauptbelastungszeiten genügt. Das würde bedeuten, daß die zur Verfügung stehende Kraftwerksleistung während des größten Teils des Tages und der Nacht nicht ausgenutzt wird. Dem kann man durch zwei Maßnahmen entgegenwirken. In der Deutschen Demokratischen Republik besteht eine gesetzliche Regelung über die Einschränkung des Energieverbrauchs durch Industriebetriebe während der Hauptbelastungszeiten. Sparsamkeit in den Haushaltungen kann erheblich zum Abbau der Belastungsspitzen beitragen, indem man sich stets bemüht, zu diesen Zeiten möglichst wenig elektrische Energie zu verbrauchen. Darum werden die Hauptbelastungszeiten täglich in Presse und Rundfunk veröffentlicht.

Um den Spitzenbelastungsbedarf besser zu decken, werden zu diesen Zeiten Gasturbinen und Dieselaggregate in Betrieb genommen. Außerdem baut man *Pumpspeicherwerke*. Das sind Wasserkraftwerke unterhalb von Stauseen, bei denen das Wasser nach dem Ausfließen aus den Turbinen in einem Becken gesammelt wird. Das Pumpspeicherwerk ist mit großen elektrisch angetriebenen Pumpen ausgerüstet. Mit diesen Pumpen wird während der Zeiten des geringen Energiebedarfs Wasser aus dem unteren Becken in das Staubecken heraufgepumpt. Während der Spitzenbelastungszeiten werden die Pumpen abgeschaltet, und die Turbinen treiben die Generatoren an.

Die Zusammenarbeit mit anderen Ländern des sozialistischen Lagers findet ihren Ausdruck in den Beschlüssen des *Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe* vom Mai 1959,

nach denen neben anderen Vereinbarungen auch Verbindungsleitungen zwischen den Energieversorgungsnetzen der Sowjetunion, Polens, Ungarns, der Tschechoslowakischen Republik und der Deutschen Demokratischen Republik gebaut werden sollen. Zunächst werden die Netze der DDR und der ČSR miteinander verbunden. Da die Hauptbelastungszeiten in diesen beiden Ländern etwa um eine Stunde gegeneinander verschoben sind, können sie sich gegenseitig unterstützen. Noch besser werden die Spitzenbelastungen ausgeglichen werden können, wenn die anderen sozialistischen Länder ebenfalls an dieses Verbundnetz angeschlossen werden. Vor allem das bereits bestehende Verbundnetz des europäischen Teils der Sowjetunion wird zur Verbesserung der Energieversorgung in den anderen Ländern des Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe beitragen. Dies gilt erst recht, wenn es mit den Verbundnetzen Sibiriens und Transkaukasiens vereinigt wird. Man denke nur daran, daß zwischen Berlin und dem äußersten Osten der UdSSR ein Zeitunterschied von annähernd 12 Stunden besteht.

6. Die gesellschaftspolitische Bedeutung der Energieversorgung. Die Erfindung der Dampfmaschine bildete die Grundlage für den Übergang von der Produktionsweise des Frühkapitalismus in den Manufakturen zur industriellen Produktion. Mit der Entwicklung der Verbrennungskraftmaschinen und der Anwendung der elektrischen Energie in der Technik läuft die Weiterentwicklung der kapitalistischen Industrieproduktion zu ihren höchsten Entwicklungsformen in Monopolen, Konzernen und Trusts einher. In dieser Produktionsweise kommt es zu einer äußersten Zuspitzung der inneren Widersprüche. Der Besitz an Produktionsmitteln liegt in den Händen der herrschenden Klasse von Kapitalisten. Die Arbeiter, die mit den neuen Produktionsmitteln höhere Werte schaffen, sind an dem höheren Gewinn nicht beteiligt, sondern erhalten vom Unternehmer immer nur so viel Geld, wie für die Erhaltung ihrer Arbeitskraft notwendig ist. So können nicht alle Arbeitsprodukte gekauft werden, und es entstehen Überproduktionen, die zwangsläufig zu den Absatz- und Produktionskrisen der kapitalistischen Produktion führen. Von technischen Gesichtspunkten aus betrachtet, bringt die Anwendung der neuen Produktionsmittel, insbesondere der elektrischen Energie, auch in der kapitalistischen Wirtschaft eine Weiterentwicklung. Die Ausbeutung der Arbeiterklasse bleibt aber erhalten. Durch die Verschärfung des Konkurrenzkampfes und wegen der zwangsläufig auftretenden Krisen wird sie noch weiter gesteigert. Zu einigen Zugeständnissen an die Verbesserung der Lebensverhältnisse der Arbeiter werden die Kapitalisten hin und wieder gezwungen, damit die Arbeiter nicht durch längere Streiks die Existenz der Kapitalisten gefährden. Erst durch die Beseitigung der Ausbeutung des Menschen durch den Menschen in der sozialistischen Gesellschaftsordnung werden die neuen Produktionsmittel für die Verbesserung der Lebenslage aller Werktätigen planmäßig eingesetzt und weiterentwickelt.

7. Die Energiewirtschaft der Sowjetunion. *Wladimir Iljitsch Lenin* hat in diesem Sinne die gewaltige Bedeutung der elektrischen Energie für den Aufbau des Sozialismus und des Kommunismus klar erkannt. Er stellte den Grundsatz auf: *Kommunismus — das ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes.* So entwickelte er 1920 den *GOELRO-Plan* für die Elektrifizierung der Sowjetunion. Auf Grund dieses Planes wurden mehrere große Kraftwerke gebaut. Der Aufbau gewaltiger elektrischer

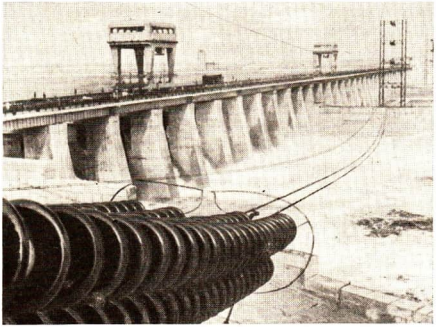


Abb. **120**/1
Wasserkraftwerk
„W. I. Lenin"
bei Kuibyschew

Energiequellen wird in der Sowjetunion seither planmäßig immer weiter vorangetrieben. Dabei sind die sowjetischen Wissenschaftler und Techniker bahnbrechend in der Neuentwicklung technischer Möglichkeiten zur Erzeugung elektrischer Energie. Es sind eine Reihe von gewaltigen Staudämmen gebaut worden, die den Lauf der großen Flüsse stauen, so daß die Wassermassen einerseits zum Antrieb riesiger Wasserturbinen und andererseits der Bewässerung weiter Ödlandgebiete dienen (Abb. **120**/1 bis **121**/1).

Im Jahre 1954 wurde bei Moskau das *erste Versuchs-Reaktorkraftwerk der Welt* mit einer Leistung von 5000 kW in Betrieb genommen (Abb. **121**/2). 1958 wurde der erste Bauabschnitt des zweiten Reaktorkraftwerkes mit 100000 kW von insgesamt 600000 kW in Betrieb genommen. Weitere Kraftwerke sind geplant. Auch auf dem Gebiet der Wärmekraftwerke wird eine Neuerung erprobt. Es ist ein *Freiluftkraftwerk* gebaut worden, bei dem Kesselanlagen, Turbinen und Generatoren nicht, wie bisher üblich, in Hallen, sondern im Freien aufgestellt sind. Durch dieses Verfahren werden die Baukosten erheblich gesenkt und die Bauzeit wesentlich verkürzt.

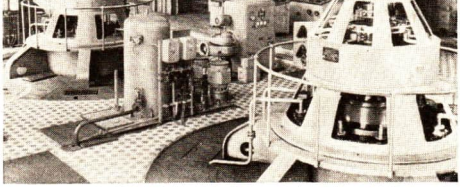
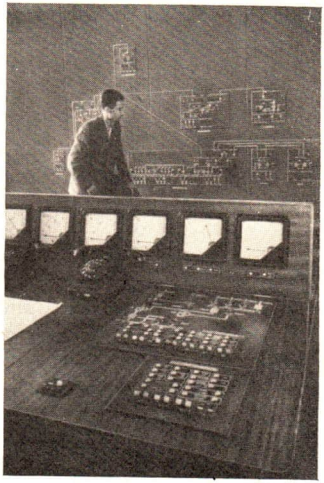


Abb. **120**/2
Blick in die Maschinenhalle eines ferngesteuerten Wasserkraftwerks



Anb. 121/1
Schaltraum
des Energiekombinats
Kischinjow

8. Die Energiewirtschaft in der Deutschen Demokratischen Republik. Für den Aufbau des Sozialismus in unserer Republik ist die Erweiterung der elektrischen Energieerzeugung von entscheidender Bedeutung.

Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges waren die Kraftwerke auf dem Gebiet der jetzigen Deutschen Demokratischen Republik stark zerstört und in ihrer technischen Ausrüstung weitgehend veraltet. Unter großen Schwierigkeiten wurden zunächst die Kriegsschäden beseitigt, so daß der notwendigste Bedarf an elektrischer Energie gesichert war. Aber noch jahrelang waren Stromabschaltungen in der Industrie und für die Haushaltungen notwendig, weil die Entwicklung der Energieerzeugung mit dem ständig steigenden Bedarf nicht Schritt halten konnte. Um neue Kraftwerke errichten zu können, mußten nämlich zuerst die Metallurgie und der Maschinenbau entwickelt werden. Die Konstruktion und der Bau von leistungsfähigen Kesselanlagen, Dampfturbinen und Großgeneratoren machten es dann möglich, die erforderlichen Kraftwerke zu bauen (Abb. 123/1). Damit trat eine wesentliche Verbesserung der Energieversorgung ein. Über die errungenen Erfolge geben die folgenden Tabellen Auskunft.

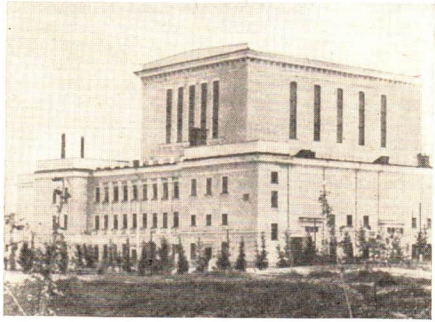


Abb. 121/2
Reaktorkraftwerk
in der Sowjetunion

Tabelle 1: Entwicklung der elektrischen Energieerzeugung auf dem Gebiet der DDR seit 1945

Jahr	10^6 kWh	1936 ≙ 100
1936	14000	100
1946	11536	82
1948	14599	104
1950	19466	139
1952	23183	165
1954	26044	186
1956	31182	223
1958	34874	249

Tabelle 2: Geplante Kapazität der neuen Großkraftwerke der DDR (in 1000 kW)

Hirschfelde	330
Vockerode	384
Trattendorf	450
Berzdorf	500
Bärwalde	1000
Espenhain	1200
Vetschau	1200
Lübbenau	1300

Im Zeitraum des Siebenjahrplanes zur Entwicklung der Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik bis 1965 wird bei uns die Grundlage für den Sieg des Sozialismus geschaffen und der Bedarf der Bevölkerung an Verbrauchsgütern immer besser befriedigt. In kürzester Frist werden so die DDR und die anderen sozialistischen Staaten den friedlichen wirtschaftlichen Wettbewerb mit dem kapitalistischen System gewinnen.

Um diese stürmische Entwicklung der gesamten Volkswirtschaft voranzutreiben, muß die Energiewirtschaft vorrangig entwickelt werden. Sie liefert ja die notwendige Energie für die Vergrößerung der Industrieproduktion. Weitere Energie wird für die Mechanisierung und Automatisierung gebraucht. Auch die höheren Leistungen der Landwirtschaft erfordern mehr Energie.

Das *Gesetz über den Siebenjahrplan* zur Entwicklung der Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik in den Jahren 1959 bis 1965 sagt darüber:

„Eine der grundlegenden Voraussetzungen für die weitere schnelle Entwicklung der Volkswirtschaft und die Erhöhung des Lebensstandards der Bevölkerung ist die vorrangige Entwicklung der Energiewirtschaft.

Das hohe Entwicklungstempo und der technische Fortschritt in allen Zweigen der Volkswirtschaft sowie der wachsende Lebensstandard der Bevölkerung führen zu einem weiteren schnellen Anstieg des Elektroenergiebedarfs. Deshalb ist die starke

Erhöhung der Elektroenergieerzeugung eine der grundlegenden und vorrangigen volkswirtschaftlichen Aufgaben. Durch den Bau neuer Kraftwerke und die Erweiterung bestehender Anlagen ist die Kraftwerksleistung bis 1965 auf 196% zu erhöhen. Es sind neue Kraftwerkskapazitäten mit einer Gesamtleistung von 6500 MW zu installieren. Die Erzeugung von Elektroenergie ist von 34,9 Milliarden kWh im Jahre 1958 auf 63 Milliarden kWh im Jahre 1965 zu erhöhen. Die Pro-Kopf-Produktion steigt damit von 2010 kWh im Jahre 1958 auf 3590 kWh im Jahre 1965. Im Vordergrund steht der Bau von großen modernen Wärmekraftwerken auf Braunkohlenbasis mit niedrigem spezifischem Brennstoffverbrauch. Die erste Baustufe des Großkraftwerkes Lübbenau ist 1959 in Betrieb zu nehmen. Der Aufbau dieses Kraftwerkes, das zu den größten Wärmekraftwerken in Europa zählen wird, ist bis 1964 mit einer Gesamtkapazität von 1300 MW zu beenden. Bis 1965 ist im Großkraftwerk Vetschau eine Kapazität von 1000 MW aufzubauen. Ein weiteres Großkraftwerk mit 550 MW entsteht bis 1965 im Kombinat „Schwarze Pumpe".

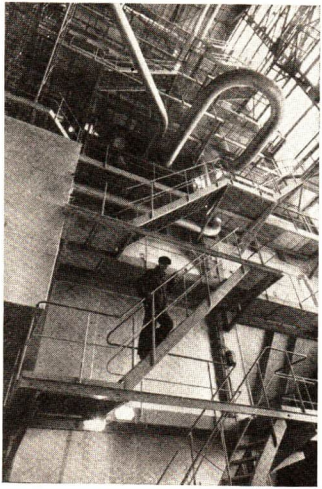


Abb. **123**/1. Kraftwerk Lübbenau im Bau

Zur Übertragung von Elektroenergie von den neuen großen Kraftwerken in der Lausitz nach den Verbraucherschwerpunkten Berlin, Halle, Leipzig und Karl-Marx-Stadt sind erstmalig in der Deutschen Demokratischen Republik 380-kV-Freileitungen zu errichten.

Im Jahre 1962 ist das erste Reaktorkraftwerk der Deutschen Demokratischen Republik in Betrieb zu nehmen."

Aus diesen Auszügen ist klar zu erkennen, wie in einem sozialistischen Staat die Versorgung mit elektrischer Energie planmäßig entwickelt wird. Darüber hinaus geben sie einen guten Einblick in die Struktur des Energieversorgungssystems der Deutschen Demokratischen Republik. Entsprechend den reichen Braunkohlevorkommen in unserer Republik sind die meisten Kraftwerke Dampfkraftwerke mit Braunkohlenfeuerung. Sie haben ihre Standorte im Braunkohlengebiet selbst oder an Wasserstraßen, auf denen die Braunkohle leicht herangeschafft werden kann. Da die Braunkohle aber ein wichtiger chemischer Grundstoff ist, der in immer größerem Umfang in der chemischen Industrie gebraucht wird, muß man in absehbarer Zeit die Wärmeenergie für die Dampfkraftwerke in steigendem Maße aus der Kernenergie gewinnen. Daher wird in der Deutschen Demokratischen Republik zur Zeit das erste Reaktorkraftwerk gebaut.

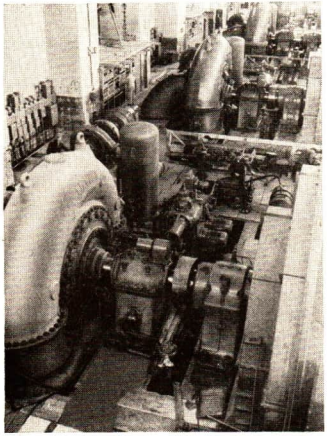


Abb. **124/1**
Bau eines Pumpspeicherwerkes

Der Bau von Kohlekraftwerken wird in unserer Republik nicht nur deswegen bevorzugt, weil hier Braunkohlevorkommen liegen, sondern vor allem deshalb, weil diese Art von Kraftwerken verhältnismäßig schnell und mit geringen Kosten errichtet werden kann. Zwar ist ein Wasserkraftwerk billiger in der Unterhaltung, es benötigt auch keine Rohstoffe für die Umwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie; jedoch kommt es in der gegenwärtigen Zeit darauf an, das Energieaufkommen in kürzester Zeit so hoch wie möglich zu steigern. Das ist nur durch den Bau von Wärmekraftwerken auf Braunkohlebasis möglich. Deshalb sind die Wasserkraftwerke in der Deutschen Demokratischen Republik von geringerer Bedeutung für die Energieerzeugung. Sie gewinnen aber an Bedeutung durch den Umbau zu Pumpspeicherwerken (Abb. **124/1**).

Beim Ausbau des Versorgungsnetzes werden neue Methoden angewendet. Einmal wird ein Verbundnetz mit einer Spannung von 380000 V aufgebaut, um noch größere Einsparungen an Leitungsmaterial und Energieverlusten zu erzielen, zum anderen sind die neuen Leitungsmasten Spannbetonkonstruktionen. Dadurch werden große Mengen wertvollen Stahls eingespart. Durch die Rekonstruktion werden die alten Versorgungsnetze auf den neuesten Stand der technischen Entwicklung gebracht.

So ist die Deutsche Demokratische Republik als junger sozialistischer Staat darum bemüht, durch den Aufbau eines modernen, allen Anforderungen entsprechenden Energieversorgungsnetzes eine ausreichende Energieversorgung der Industrie und der Landwirtschaft zu sichern und die Grundlagen für eine ständige Verbesserung der Lebensverhältnisse aller Werktätigen zu schaffen. Dennoch wird es auch in Zukunft stets nötig sein, mit elektrischer Energie sparsam umzugehen. Besonders während der Spitzenbelastungszeiten muß jeder bestrebt sein, alle entbehrlichen Stromverbraucher abzuschalten. Dadurch helfen wir mit, die Ziele unseres Siebenjahrplanes vorfristig zu erfüllen.

II. Mechanik

17. Die Kraft

1. Die Relativität der Bewegung. Mit Hilfe einer Langhobelmaschine wird die Oberfläche großer Werkstücke bearbeitet. Dazu ist das Werkstück auf einem Schlitten aufgespannt und wird mit dem Schlitten gegen das Werkzeug, den Hobelmeißel, bewegt. Somit befindet sich das Werkstück gegenüber der Hobelmaschine in Bewegung. In bezug auf den Schlitten, auch wenn sich dieser bewegt, ist aber das Werkstück in Ruhe. Die Hobelmaschine wiederum ist gegenüber der Erde in Ruhe, bewegt sich aber in bezug auf das Sonnensystem. Sie führt einmal die Drehbewegung der Erde mit aus und bewegt sich außerdem mit der Erde um die Sonne. Auch die Sonne steht nicht still. Sie rotiert und bewegt sich mit ihren Planeten auf bestimmten Bahnen durch den Weltraum. Die Wissenschaftler haben weiterhin festgestellt, daß sich alle Sternsysteme in Bewegung befinden.

Wird die Bewegung eines Körpers, beispielsweise der Erde, beschrieben, so muß ein anderer Körper, z. B. die Sonne, angegeben werden, auf den sich die Angaben beziehen. Einen solchen Körper bezeichnet man als *Bezugssystem*. Im allgemeinen ist dieses Bezugssystem die Erdoberfläche. Es hat sich eingebürgert, dieses Bezugssystem nicht besonders zu nennen. Fehlt die Angabe des Bezugssystems, so bezieht sich die Aussage über den Bewegungszustand auf die Erdoberfläche.

Ein im Gepäcknetz eines fahrenden Eisenbahnzuges liegender Koffer ist gegenüber dem Zug, oder wie man auch sagt, relativ zum Zug, in Ruhe. Er ist jedoch gegenüber der Erdoberfläche, also relativ zur Erdoberfläche, in Bewegung. Man spricht daher von einer *relativen Ruhe* und von einer *relativen Bewegung*. Für jeden Körper gibt es ein Bezugssystem, gegenüber dem er in Ruhe ist, während er sich gleichzeitig gegenüber anderen Bezugssystemen bewegt.

Auch wenn sich ein Körper als Ganzes in relativer Ruhe befindet, so sind bekanntlich die Moleküle, aus denen der Körper aufgebaut ist, in ständiger Bewegung. Die Bausteine der Atome, beispielsweise die Elektronen, sind ebenfalls in ständiger Bewegung.

Alles in der Natur ist in ständiger Bewegung.

2. Der Begriff der Kraft. Bewegte Körper können miteinander in Berührung kommen. Sie können beispielsweise zusammenstoßen. Dadurch werden die Bewegungszustände der Körper verändert. So kann sich zum Beispiel der eine Körper langsamer als vorher bewegen, während sich der andere schneller bewegt. Diese Bewegungsänderungen müssen eine Ursache haben. Man bezeichnet sie als **Kraft**.

Die Kraft ist die Ursache einer Bewegungsänderung.

Aber nicht nur mechanische Kräfte, sondern auch magnetische oder elektrische Kräfte können Bewegungsänderungen verursachen.

3. Die Wirkungen der Kräfte. Eine Kraft ist nur an ihren Wirkungen zu erkennen. Der Begriff Kraft stellt eine Abstraktion dar. Durch das Einwirken einer Kraft werden an einem Körper bestimmte Bewegungsänderungen hervorgerufen. Die Kraft ist stets die Ursache.

Kräfte können nur auf Grund ihrer Wirkungen erkannt werden.

Mit Hilfe der Muskelkraft kann beispielsweise ein Handwagen in Bewegung gesetzt werden. Somit *ändert die Muskelkraft den Bewegungszustand eines Körpers.* Diese Wirkung einer Kraft bezeichnet man als **dynamische Kraftwirkung**.

Eine andere Wirkung der Kraft ist die *Verformung eines Körpers.* Hierbei wird nicht der gesamte Körper, etwa eine Stange aus Knetmasse, in seinem Bewegungszustand verändert. Es werden nur einzelne Teile des Körpers, solange die Kraft auf sie einwirkt, bewegt. Der Körper wird verformt, er wird deformiert. Während bei der Knetmasse die Deformation auch nach dem Einwirken der Kraft erhalten bleibt, gibt es andere Körper, beispielsweise Federn, die nach dem Aufhören der Kraftwirkung ihre alte Form wieder annehmen. Bei allen Körpern ist eine Gegenkraft wirksam, die auf der Elastizität beruht. Verursacht eine Kraft die Deformation eines Körpers, so bezeichnet man diese Wirkung der Kraft als **statische Kraftwirkung**.

Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so treten im allgemeinen sowohl statische als auch dynamische Kraftwirkungen gleichzeitig auf. Schiebt beispielsweise eine Lokomotive einen Güterwagen, so werden die Pufferfedern verformt — statische Kraftwirkung. Außerdem wird der Güterwagen bewegt — dynamische Kraftwirkung. In vielen Fällen überwiegt jedoch eine der Kraftwirkungen, so daß die andere vernachlässigt werden kann. Wird ein Fußball durch den Fuß weggestoßen, so tritt nur eine geringe elastische Verformung ein, während der Ball eine große Bewegungsänderung erfährt. Wird dagegen die Feder eines Luftgewehres gespannt, so wird fast die gesamte Kraft zum Spannen der Feder verwendet. Die Bewegungsänderung ist nur gering. Dadurch, daß man den einen Vorgang vernachlässigt, vereinfacht sich die Darstellung. Von dieser Methode wird in der Physik soweit als möglich Gebrauch gemacht.

Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird dessen Bewegungszustand verändert (dynamische Kraftwirkung) beziehungsweise der Körper wird deformiert (statische Kraftwirkung).

Läßt man einen Stein fallen, so bewegt er sich immer schneller in Richtung der Erdoberfläche. Auf den Stein wirkt die *Anziehungskraft der Erde*, die auch als *Schwerkraft* bezeichnet wird. Sie ist die Ursache für die ständig schneller werdende Bewegung des Steins. Aber auch auf einen am Boden liegenden Stein wirkt die Schwerkraft. Infolgedessen hat er ein Gewicht. Die Wirkung dieser Kraft führt zu einer Verformung der Unterlage und des Steines. Da zur Verformung fester Körper jedoch meist große Kräfte notwendig sind, ist die durch das Gewicht des Steines hervorgerufene Deformation nur sehr gering.

4. Die Kraft als Vektor. Wirkt auf das freie Ende einer einseitig eingespannten Blattfeder aus Stahl die Anziehungskraft eines Magneten, so wird die Feder in Richtung des Magneten gebogen (Abb. **127**/1). Entfernt man den Magneten von der Blattfeder so wird die Blattfeder, weniger stark durchgebogen, da die Anziehungs-

kraft kleiner geworden ist. Die gleiche Wirkung erzielt man, wenn der Angriffspunkt der Kraft nach dem eingespannten Ende der Blattfeder hin verschoben wird, indem man den Magneten in dieser Richtung verrückt.

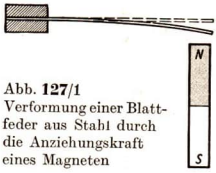


Abb. **127**/1
Verformung einer Blattfeder aus Stahl durch die Anziehungskraft eines Magneten

Die Kraftwirkung ist von der *Größe der einwirkenden Kraft*, der *Richtung* und dem *Angriffspunkt der Kraft* abhängig. Eine physikalische Größe, deren Bestimmung nur dann möglich ist, wenn der Betrag und die Richtung, in der sie wirkt, bekannt sind, bezeichnet man als **Vektor**. So sind beispielsweise die Kraft und die Geschwindigkeit Vektoren. Bei manchen Vektoren, zum Beispiel Kräften, ist auch der Angriffspunkt von Bedeutung. Die Gerade, deren Lage durch den Vektor gekennzeichnet ist, nennt man die *Wirkungslinie*.

Genügt zur Festlegung einer physikalischen Größe die Angabe des Betrages, so spricht man von einem **Skalar**. Die Temperatur und die Zeit sind Skalare.

Die Kraft ist ein Vektor. Sie wird durch ihren Betrag, ihre Richtung und ihren Angriffspunkt bestimmt.

Eine vektorielle Größe wird durch eine *gerichtete Strecke* dargestellt (Abb. **127**/2). Ihre Länge ist dem Betrag des Vektors proportional.

Während der Betrag eines Vektors beispielsweise durch F oder $|\mathfrak{F}|$ gekennzeichnet wird, wird der Vektor selbst durch $\mathfrak{F}$ angegeben.

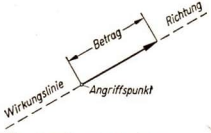


Abb. **127**/2. Kraftvektor

5. Die Krafteinheit. Als Einheit für die Kraft wurde die Gewichtseinheit, das **Kilopond**, gewählt.

Die Einheit der Kraft ist das Kilopond. Ein Kilopond ist das Gewicht des Urkilogramms auf der geographischen Breite von 45° und in Meeresspiegelhöhe.

Abgeleitete Krafteinheiten sind das **Megapond** (Mp), das **Pond** (p) und das **Millipond** (mp).

$$1\ \text{Mp} = 1000\ \text{kp},$$
$$1\ \text{p} = 0{,}001\ \text{kp},$$
$$1\ \text{mp} = 0{,}001\ \text{p}.$$

6. Die statische Kraftmessung. Da die Verlängerung einer Schraubenfeder der wirkenden Kraft in einem bestimmten Bereich proportional ist, werden sehr oft Schraubenfedern zur Kraftmessung verwendet (Abb. **127**/3). Solche *Kraftmesser*, auch *Dynamometer* genannt, nutzen die statische Wirkung der Kraft. Bei der Kraftmessung halten sich die zu messende Kraft und die auf der Elastizität beruhende Gegenkraft das Gleichgewicht.

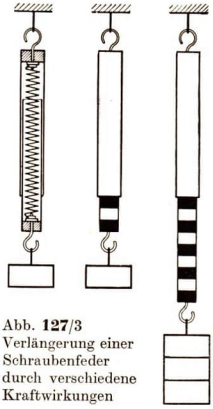


Abb. **127**/3
Verlängerung einer Schraubenfeder durch verschiedene Kraftwirkungen

7. Fragen und Aufgaben:

1. Sie steigen in die haltende Straßenbahn, gehen durch den Wagen, während die Straßenbahn anfährt, und setzen sich hin. Beim Halten der Straßenbahn stehen Sie auf und steigen aus. Beschreiben Sie Ihre Bewegungen und die der Straßenbahn relativ zu den verschiedenen Bezugssystemen Straßenbahnwagen, Erdoberfläche, Sonne!
2. Beim Handballspielen werfen Sie den Ball einem Mitspieler zu, der ihn aber nicht fängt, sondern auf die Erde treffen läßt. Erklären Sie an diesem Beispiel die Wirkungen von Kräften!
3. Nennen Sie Beispiele, bei denen Ihr Gewicht die Verformung eines Körpers bewirkt!
4. Begründen Sie an Beispielen aus dem Unterrichtstag in der Produktion, daß durch Kräfte Körper verformt werden können!
5. Warum sind Kräfte und Geschwindigkeiten Vektoren, aber die Arbeit und die Leistung nicht?
6. Wickeln Sie einen nicht geglühten Eisendraht 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. Wie groß sind die entsprechenden Kräfte?

13. Die Zusammensetzung von Kräften

1. Gleichgerichtete Kräfte. Hängt man an eine *Federwaage* ein Wägestück, so wirkt dieses mit der Kraft $\mathfrak{F}_1$ an der Feder. Wird ein weiteres Wägestück an die Federwaage gehängt, so wirkt dieses mit der Kraft $\mathfrak{F}_2$ in der gleichen Richtung wie die Kraft $\mathfrak{F}_1$. Infolgedessen erhöht sich die an der Feder angreifende Kraft um die Kraft $\mathfrak{F}_2$. *Die Gesamtkraft ist die Summe der beiden Einzelkräfte.* Zu dem gleichen Ergebnis kommt man, wenn noch weitere Kräfte auf die Federwaage wirken (Abb. **128**/1). Untersucht man die Wirkungslinien der an der Federwaage angreifenden Kräfte, so stellt man fest, daß sie zusammenfallen.

Haben gleichgerichtete Kräfte die gleiche Wirkungslinie, so ist die Gesamtkraft gleich der Summe der Einzelkräfte (Abb. 128/2).

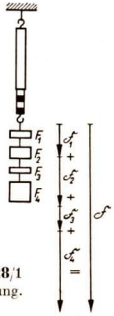
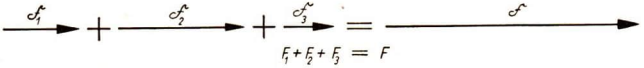


Abb. **128**/1
Die an einer Federwaage angreifenden Kräfte addieren sich in ihrer Wirkung.



$F_1 + F_2 + F_3 = F$

Abb. **128**/2. Addition gleichgerichteter Kräfte

Die Wirkung der Einzelkräfte ändert sich nicht, wenn man die einzelnen Gewichtsstücke durch lange Fäden miteinander verbindet (Abb. **129**/1). Auch in diesem Falle ist die Gesamtkraft gleich der Summe der Einzelkräfte. Durch die längeren Fäden werden lediglich *die Angriffspunkte der Kräfte auf ihrer gemein-*

samen Wirkungslinie verschoben, ohne daß dabei die Richtung der Kräfte verändert wird. Somit ist die Lage des Angriffspunktes auf der Wirkungslinie ohne Einfluß auf die Kraftwirkung.

Der Angriffspunkt einer Kraft kann auf ihrer Wirkungslinie verschoben werden, ohne daß sich die Kraftwirkung ändert.

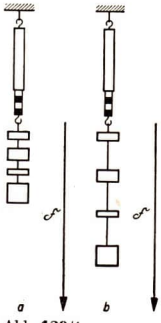


Abb. **129**/1
Kräfte können auf ihrer Wirkungslinie verschoben werden.

Umgekehrt kann jede Kraft $\mathfrak{F}$ durch Einzelkräfte ersetzt werden. Die Wirkungslinien dieser Kräfte müssen dann mit der Wirkungslinie von $\mathfrak{F}$ zusammenfallen und die gleiche Richtung wie die Kraft $\mathfrak{F}$ haben.

Die Lokomotive eines Güterzuges muß eine bestimmte Zugkraft ausüben, um den Zug in Bewegung zu setzen. Die Größe dieser Kraft richtet sich nach der Anzahl der Wagen, nach ihrer Beladung und nach der Steigung der Strecke. Aus wirtschaftlichen Gründen soll von einer Lokomotive ein möglichst schwerer Güterzug gezogen werden. Zur Überwindung einer Steigung ist eine größere Zugkraft erforderlich als auf ebener Strecke. Reicht in diesem Falle

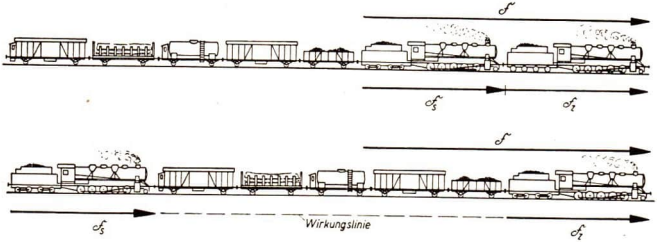


Abb. **129**/2. Die notwendige Gesamtkraft wird durch die beiden Teilkräfte $\mathfrak{F}_z$ und $\mathfrak{F}_s$ ersetzt.

die Zugkraft einer Lokomotive nicht aus, so wird eine zweite Lokomotive eingesetzt. Dabei ist es gleichgültig, ob die zweite Lokomotive den Zug schiebt oder ihn gemeinsam mit der ersten Lokomotive zieht. In beiden Fällen wird die erforderliche Gesamtkraft durch die Summe der beiden Einzelkräfte der Lokomotive aufgebracht (Abb. **129**/2).

2. Entgegengesetzt gerichtete Kräfte. Soll mit Hilfe der Muskelkraft eine Last gehoben werden, so muß man das Gewicht dieser Last überwinden. Beim Heben einer Last wirken daher zwei Kräfte, die zwar die gleiche Wirkungslinie, aber entgegengesetzte Richtungen haben. *Der Körper kann nur dann angehoben werden, wenn die Muskelkraft $\mathfrak{F}$ größer als das Gewicht $\mathfrak{G}$ ist* (Abb. **130**/1). Sind die beiden

Kräfte $\mathfrak{F}$ und $\mathfrak{G}$ gleich groß, so heben sich ihre Kraftwirkungen auf. Es herrscht Gleichgewicht. Die Last wird weder gehoben, noch senkt sie sich.

Fährt ein *Schiff* stromaufwärts, so wirken auf der gleichen Wirkungslinie zwei Kräfte in entgegengesetzter Richtung: die von der Schraube und die von der Strömung ausgeübten Kräfte. Der Betrag der Gesamtkraft ist gleich der Differenz der Beträge der beiden Teilkräfte. Die Richtung der Gesamtkraft stimmt mit der Richtung der größeren Teilkraft überein (Abb. **130**/2).

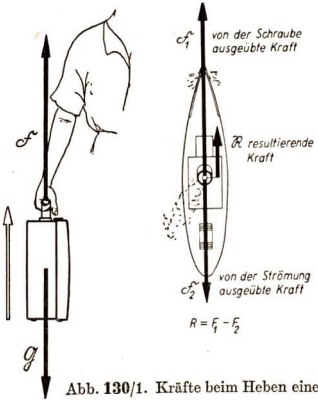


Abb. **130**/1. Kräfte beim Heben einer Last

Abb. **130**/2 Zusammensetzung zweier Kräfte, die auf der gleichen Wirkungslinie liegen, aber entgegengesetzte Richtung haben

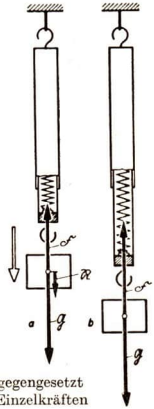


Abb. **130**/3 Ermittlung der Gesamtkraft bei entgegengesetzt gerichteten Einzelkräften

Auch an einer belasteten *Federwaage* sind zwei Kräfte wirksam: die Schwerkraft, die das Wägestück in Richtung der Erdoberfläche zieht, und die auf der Elastizität beruhende Gegenkraft der Feder, die einen Widerstand gegenüber der Formveränderung darstellt.

Solange die Schwerkraft größer als die Federkraft ist, wird die Feder verlängert. Entgegengesetzte Richtungen von Kräften kennzeichnet man durch verschiedene Vorzeichen. So kann beispielsweise die Richtung der Schwerkraft mit positivem Vorzeichen, und die der Federkraft mit negativem Vorzeichen versehen werden. Die Gesamtkraft ergibt sich dann durch Addition der beiden Einzelkräfte (Abbildung **130**/3).

Haben Einzelkräfte die gleiche Wirkungslinie, so ist die Gesamtkraft die Summe der Einzelkräfte.
Das Vorzeichen der Gesamtkraft kennzeichnet die Wirkungsrichtung.

Infolge der Schwerkraft wird die Feder der belasteten Federwaage so weit verlängert, bis die Federkraft und das Gewicht ihrem Betrage nach gleich groß sind. Diesen Zustand bezeichnet man als *Gleichgewicht der Kräfte.*

Wirken auf einen frei beweglichen Körper zwei Kräfte, die auf der gleichen Wirkungslinie liegen, aber entgegengesetzte Richtung haben, so ist der Körper dann im Gleichgewicht, wenn die Beträge der beiden Kräfte gleich groß sind.

Dieses Gesetz wird bei der statischen Kraftmessung angewandt.

3. Kräfte beliebiger Richtung. Wirken mehrere Kräfte unterschiedlicher Richtung auf einen Körper ein, so kann das Gleichgewicht dadurch hergestellt werden, daß man *zu jeder einzelnen Kraft eine gleich große Gegenkraft wirken läßt* (Abb. **131**/1).

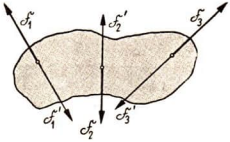


Abb. **131**/1. Die Kräfte $\mathfrak{F}_1$, $\mathfrak{F}_2$ und $\mathfrak{F}_3$ werden durch die Gegenkräfte $\mathfrak{F}_1'$, $\mathfrak{F}_2'$ und $\mathfrak{F}_3'$ im Gleichgewicht gehalten.

Man kann jedoch das Gleichgewicht auch durch eine einzige Gegenkraft herbeiführen. An einem Nagel greifen zwei verschieden stark gespannte Federwaagen mit den Kräften $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ an (Abb. **131**/2a). Läßt man mittels einer dritten Federwaage eine Kraft $\mathfrak{F}_3$ geeigneter Größe und Richtung auf den Nagel wirken, so herrscht auch nach dem Lockern des Nagels Gleichgewicht (Abb. **131**/2b). Somit hält die Kraft $\mathfrak{F}_3$ den Kräften $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ das Gleichgewicht. Die Kraft $\mathfrak{F}_3$ ist aber auch mit einer gleich großen, aber entgegengesetzt gerichteten Kraft $\mathfrak{R}$ im Gleichgewicht (Abb. **131**/2c). Daraus folgt, daß die Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ durch die Kraft $\mathfrak{R}$ ersetzt werden können. Man bezeichnet daher die Gesamtkraft $\mathfrak{R}$ als die **Resultierende** der beiden Einzelkräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$.

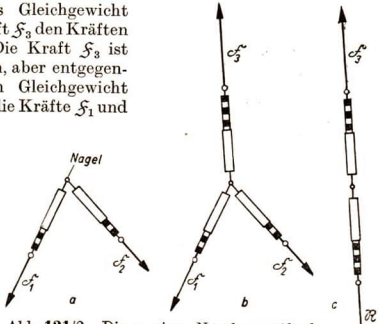


Abb. **131**/2. Die an einen Nagel angreifenden Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ werden durch die Gegenkraft $\mathfrak{F}_3$ im Gleichgewicht gehalten.

Man zeichnet die Kraftvektoren $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ entsprechend ihrer Größe und Lage und ergänzt die Zeichnung zum Parallelogramm. Die Resultierende $\mathfrak{R}$ ist dann die Diagonale dieses *Parallelogramms der Kräfte* (Abbildung **131**/3).

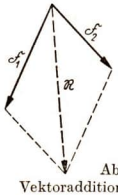


Abb. **131**/3
Parallelogramm der Kräfte

Die Ermittlung der Resultierenden mit Hilfe des *Vektorparallelogramms* wird als *geometrische Addition* oder *Vektoraddition* bezeichnet. Sie darf nicht mit der allgemein bekannten *algebraischen Addition* verwechselt werden. Greifen beispielsweise in einem Punkt zwei Kräfte $\mathfrak{F}_1$ und $\mathfrak{F}_2$ an, deren Wirkungslinien senkrecht aufeinander stehen, so

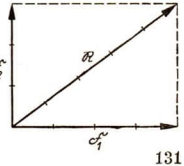


Abb. **131**/4
Vektoraddition zweier senkrecht aufeinander stehender Kräfte

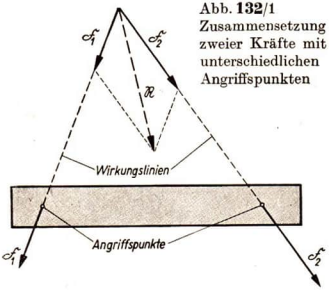


Abb. **132**/1 Zusammensetzung zweier Kräfte mit unterschiedlichen Angriffspunkten

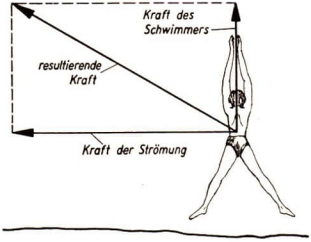


Abb. **132**/2. Überqueren eines Flusses

ergibt sich die Resultierende $\mathfrak{R}$ auf Grund der in Abb. **131**/4 wiedergegebenen Konstruktion. Da $\mathfrak{F}_1$ den Betrag 4 kp und $\mathfrak{F}_2$ den Betrag 3 kp hat, so folgt nach der vektoriellen Addition für $\mathfrak{R}$ der Betrag 5 kp. Mit Hilfe der algebraischen Addition würde man den Betrag 7 kp erhalten. Dieser Wert entspricht nicht den wirklichen Verhältnissen. Die Kraft von 2 kp geht aber nicht verloren, sondern bewirkt Spannungen im Innern des Körpers.

Greifen zwei Kräfte an einem Körper mit verschiedenen Angriffspunkten an, so kann man die Kräfte bis zu dem Schnittpunkt der beiden Wirkungslinien verschieben. Mit Hilfe des Kräfteparallelogramms kann die Größe und die Richtung der Resultierenden ermittelt werden (Abb. **132**/1).

Kräfte werden vektoriell addiert. Die Resultierende zweier Kräfte wird mit Hilfe des Parallelogramms der Kräfte ermittelt.

Die Abb. **132**/2 zeigt einen Schwimmer, der einen Fluß senkrecht zur Strömungsrichtung durchqueren will. An dem Schwimmer greifen

Abb. **132**/3. Schleppen eines Hochseeschiffes

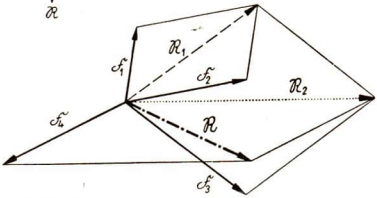


Abb. **132**/4. Bestimmung der Resultierenden bei mehr als zwei Einzelkräften

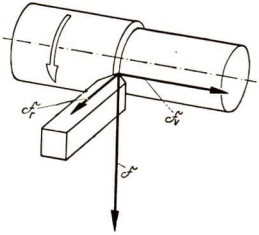


Abb. **132**/5. Darstellung der am Drehstahl wirkenden Kräfte

zwei Kräfte an: Die infolge der Schwimmbewegung ausgeübte Kraft und die Kraft des strömenden Wassers. Diese beiden Kräfte ergeben eine Resultierende, durch deren Wirkung sich der Schwimmer schräg über den Fluß bewegt.

Hochseeschiffe werden im allgemeinen von zwei Schleppern aus dem Hafen bugsiert. Jeder dieser Schlepper übt auf das Schiff eine Kraft aus. Auch diese beiden Kräfte setzen sich zu einer resultierenden Kraft zusammen (Abb. **132**/3).

Greifen an einem Körper mehr als zwei Kräfte an, so ermittelt man zunächst die Resultierende $\mathfrak{R}_1$ von zwei Einzelkräften. Sodann bestimmt man die Resultierende $\mathfrak{R}_2$ aus $\mathfrak{R}_1$ und einer weiteren Einzelkraft. Dieses Zusammensetzen der Kräfte wird so lange fortgeführt, bis sämtliche Einzelkräfte erfaßt sind (Abb. **132**/4).

Mit Hilfe dieses Verfahrens kann auch dann die Resultierende mehrerer Kräfte ermittelt werden, wenn deren Wirkungslinien nicht in einer Ebene liegen. So wirken beispielsweise die auf einen Drehstahl einwirkenden Kräfte in verschiedenen Ebenen (Abb. **132**/5). Die Vorschubkraft $\mathfrak{F}_v$ und die Rückkraft $\mathfrak{F}_r$ bilden die Resultierende $\mathfrak{R}_w$. Diese setzt sich mit der Hauptschnittkraft $\mathfrak{F}$ zu der Gesamtresultierenden $\mathfrak{R}$ zusammen. Die Kräfte $\mathfrak{R}_w$, $\mathfrak{F}$ und $\mathfrak{R}$ liegen in der Diagonalebene des von den Kräften $\mathfrak{F}_r$, $\mathfrak{F}_v$ und $\mathfrak{F}$ gebildeten Quaders (Abb. **133**/1).

Liegen die Kräfte in einer Ebene, so kann die Resultierende am zweckmäßigsten mit Hilfe des *Kräftepolygons* ermittelt werden. Wendet man dieses Verfahren auf zwei Kräfte an, so entsteht das *Kräftedreieck* (Abb. **133**/2). Die Anwendung des Kräftepolygons auf mehr als zwei Kräfte zeigt die Abb. **133**/3. Eine andere Möglichkeit, das Kräftepolygon zu zeichnen, ist in Abb. **133**/4 wiedergegeben.

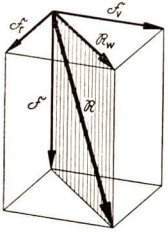


Abb. **133**/1. Zusammensetzen der Resultierenden aus den am Drehstahl wirkenden Kräften

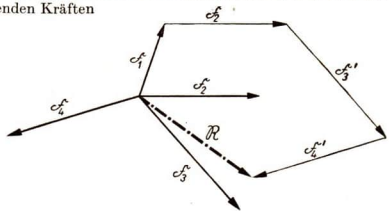


Abb. **133**/3. Bestimmung der Resultierenden mit Hilfe eines Kräftepolygons

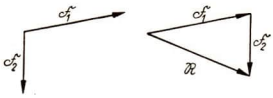


Abb. **133**/2
Zusammensetzen zweier Kräfte mit Hilfe des Kräftedreiecks

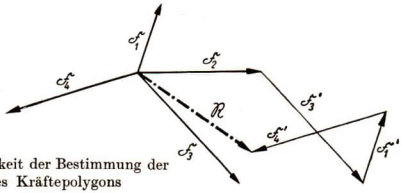
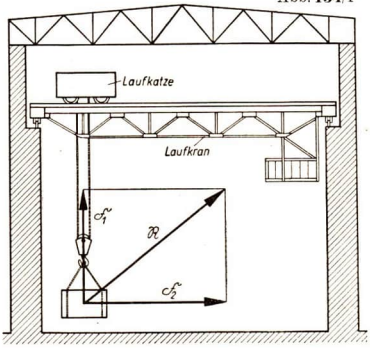


Abb. **133**/4. Weitere Möglichkeit der Bestimmung der Resultierenden mit Hilfe des Kräftepolygons

4. Fragen und Aufgaben:

1. Sie helfen einer Frau, die auf sandigem Weg mit großer Anstrengung einen Handwagen zieht. Wie groß ist jetzt die Kraft, mit der der Wagen bewegt wird? Fertigen Sie eine Skizze an (vgl. Abb. **128**/2)! Warum ist es — theoretisch — gleichgültig, ob Sie den Wagen ziehen oder schieben (vgl. Frage 1 auf Seite 136)?
2. Warum kommen Sie schneller vorwärts, wenn Sie den Wind im Rücken haben, als wenn Sie bei Windstille gehen oder gegen den Wind? Beschreiben Sie diesen Tatbestand als physikalischen Vorgang! Nennen Sie Anwendungen der Windkraft!
3. In der Abbildung **134**/1 ist schematisch ein Brückenkran dargestellt. Erklären Sie auf Grund der Zeichnung, welche Kräfte auf die Last einwirken und welche Bewegung sich daraus ergibt?
4. Ein Paddelboot fährt aus einem Fluß in einen See hinaus. Dabei wirken vorübergehend drei Kräfte auf das Boot: außer der Antriebskraft infolge der Paddelbewegung (F_A) noch die Strömung des Flusses (F_S) und die Windkraft (F_W). Ermitteln Sie durch Zeichnung die resultierende Kraft bei selbstgewählten Richtungen der Kräfte! Für die Beträge der Kräfte gilt die Proportion: $F_W : F_S : F_A = 1 : 2 : 5$.

Abb. **134**/1



19. Die Zerlegung von Kräften

1. Die Zerlegung in senkrecht aufeinanderstehende Komponenten. Ein Arbeiter, der einen Wagen zieht, übt eine Kraft $\mathfrak{F}$ auf den Wagen aus (Abb. **134**/2). Durch diese Kraft wird nicht nur der Wagen fortbewegt, sondern gleichzeitig die Vorderachse des Wagens angehoben. Die Kraft $\mathfrak{F}$ kann somit in ihrer Wirkung durch zwei Teilkräfte, *Komponenten* genannt, ersetzt werden. In diesem Falle ist die horizontal wirkende Teilkraft, die *Bewegungskomponente*, und die vertikale Teilkraft, die *Hubkomponente*. Mit Hilfe des Kräfteparallelogramms können die Größen der Bewegungskomponente und die der Hubkompo-

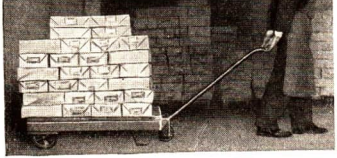


Abb. **134**/2. Kraftwirkung beim Wagenziehen

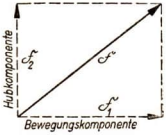
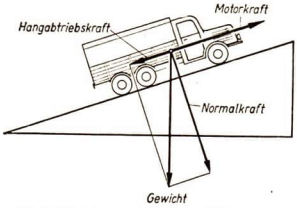


Abb. **134**/3. Zerlegung der Kraft $\mathfrak{F}$ in eine waagerechte und in eine senkrechte Komponente



nente ermittelt werden (Abb. **134**/3). Je steiler die Deichsel gehalten wird, um so größer ist die Hubkomponente. Eine gegebene Kraft kann somit in Komponenten zerlegt werden, wenn deren Richtungen bekannt sind. Die Abbildung **135**/1 zeigt die Kraftzerlegung an einem Körper, der sich auf der schiefen Ebene befindet. Die Richtungen der Hangabtriebskraft und der Normalkraft liegen fest.

Abb. **135**/1. Das Gewicht des Körpers wird in die Hangabtriebskraft und die Normalkraft zerlegt.

2. Die Zerlegung in Komponenten beliebiger Richtung. Die Abbildung **135**/2 zeigt die Zerlegung von Kräften. Solche Kraftzerlegungen werden bereits bei der Konstruktion von Maschinen ausgeführt, um Rückschlüsse auf die Ausführung einzelner Konstruktionsteile zu ziehen. So zeigt beispielsweise die Kraftzerlegung an dem Turmdrehkran, daß der Ausleger auf Druck, während seine Haltevorrichtung auf Zug beansprucht wird. Daher kann sie als Seil ausgeführt werden, während der Ausleger eine feste Konstruktion, beispielsweise eine Gitterkonstruktion, sein muß.

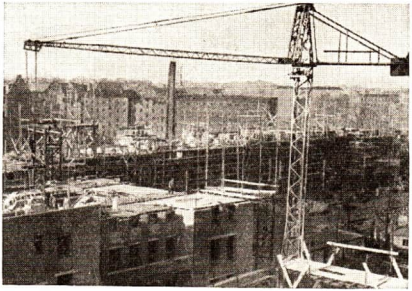


Abb. **135**/2
Kraftzerlegung an dem Ausleger eines Turmdrehkranes

In der Abbildung **135**/3 ist ein *Dachbinder* wiedergegeben, wie er bei Werkhallen verwendet wird. Sein Gewicht wird im wesentlichen von den Sparren aufgenommen. Die in Richtung der Sparren wirkenden Teilkräfte werden von diesen auf die Wände übertragen. Dort erfolgt wiederum eine Kraftzerlegung, und zwar in eine senkrecht nach unten und eine waagerecht nach außen wirkende Komponente. Die senkrechten Kräfte wirken auf die Mauer als Druckkräfte. Die waagerechten Kräfte

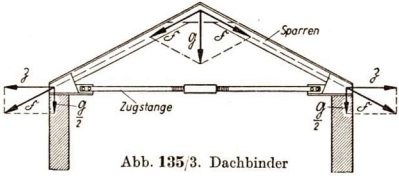


Abb. **135**/3. Dachbinder

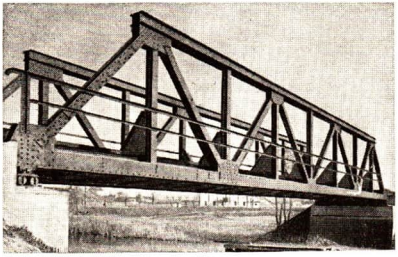


Abb. **136**/1. Gitterträgerbrücke

sind Kippkräfte. Daher werden meist die Mauern durch Zugstangen miteinander verbunden, die diese waagerechten Kräfte aufnehmen und damit jede Kippwirkung auf die Mauern vermeiden. Derartige Zusammensetzungen aus Stäben in Form von Dreiecken, die Druck- und Zugkräfte aufnehmen und fest miteinander verbunden sind, nennt man *Fachwerke*. Sie haben für das Bauwesen eine außerordentlich große Bedeutung und bilden die Grundlage für den Stahl- und Leichtmetallbau (Abb. **136**/1).

3. Die Kräfte bei einer Bewegung auf einer vorgeschriebenen Bahn. Soll zum Beispiel ein Eisenbahnwagen zum Beladen oder Entladen verschoben werden, so erfolgt dies auf kleineren Bahnhöfen häufig mit einer Zugmaschine. Sie kann im allgemeinen nur neben dem Gleis fahren. Infolgedessen erfolgt der Zug schräg zur Bewegungsrichtung des Wagens. Daher kann die Kraft der Zugmaschine nicht voll zu seiner Fortbewegung ausgenutzt werden (Abb. **136**/2). Auf Grund der Zugkraft sind zwei Teilkräfte wirksam. Die eine Komponente fällt in die Bewegungsrichtung, und die andere steht senkrecht zu ihr. Die *Bewegungskomponente* $\mathfrak{F}_B$ gibt die Größe der Kraft an, mit der der Eisenbahnwagen bewegt wird. Durch die andere Komponente, die *Druckkomponente* $\mathfrak{F}_D$ beziehungsweise Normalkraft, wird eine Druckkraft auf die Schienen ausgeübt. Diese Teilkraft geht für die Bewegung verloren. Durch sie wird sogar die Reibung vergrößert und damit die Bewegung behindert.

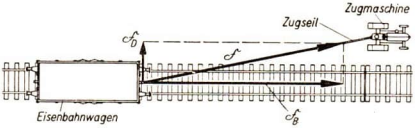


Abb. **136**/2. Kraftzerlegung bei einer Bewegung auf einer vorgeschriebenen Bahn

Wirkt auf einen zwangsläufig geführten Körper eine Kraft, die unter einem Winkel gegen die Bahn gerichtet ist, so ist für die Bewegung des Körpers nur die Bewegungskomponente wirksam.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Abbildung **134**/2 zeigt die Zerlegung einer Kraft beim Ziehen eines Wagens. Ermitteln Sie durch Kraftzerlegung die Kraftkomponenten beim Schieben eines Wagens! Die Schubkraft betrage 30 kp und sei 30° gegen die Waagerechte geneigt! Welche Bedeutung haben die Komponenten?
2. Fertigen Sie eine Skizze eines Dachbinders Ihres Wohnhauses (der Schule) an und zeichnen Sie die Kraftzerlegung ein!

3. Bei einer Haltevorrichtung ist an einem Haken, der in einer Wand eingelassen ist, ein Seil befestigt. Das Seil ist gegen die Waagerechte um 30° nach unten gerichtet. Zerlegen Sie in einer Skizze die Zugkraft in eine waagerechte und in eine senkrechte Komponente! Welche Bedeutung haben diese Kraftkomponenten für die Befestigung des Hakens?
4. Bei Erdarbeiten werden Feldbahnloren auf kurzen Strecken durch Menschenkraft verschoben. Unter welchen Umständen wird nicht die volle Kraft des Arbeiters für die Fortbewegung der Lore ausgenutzt? Fertigen Sie eine Skizze an!

20. Parallele Kräfte

1. Die Zusammensetzung paralleler Kräfte. Eine Lokomotive soll auf einer Drehscheibe so aufgestellt werden, daß die gesamte Last auf den Drehzapfen in der Mitte der Scheibe wirkt. Die Resultierende des Lokomotivgewichts und des Tendergewichts soll somit in Richtung des Drehzapfens verlaufen (Abb. **137**/1a).

Die beiden Kräfte $\mathfrak{F}_L$ und $\mathfrak{F}_T$ verlaufen parallel. Die Resultierende kann daher nicht in der bisherigen Weise ermittelt werden, weil die Wirkungslinien der Kräfte sich nicht schneiden.

Zur Ermittlung der Resultierenden wird in den Angriffspunkten der Kräfte $\mathfrak{F}_L$ und $\mathfrak{F}_T$ je eine Kraft $\mathfrak{K}_L$ beziehungsweise $\mathfrak{K}_T$ hinzugefügt. Diese beiden Kräfte sind gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet, und haben die gleiche Wirkungslinie. Da sie im Gleichgewicht sind, wird an der Gesamtwirkung nichts geändert (Abb. **137**/1 b). Von den Kräften $\mathfrak{K}_T$ und $\mathfrak{F}_T$ sowie $\mathfrak{F}_L$ und $\mathfrak{K}_L$ werden die resultierenden Kräfte $\mathfrak{T}$ und $\mathfrak{L}$ ermittelt. Die Wirkungslinien dieser Kräfte schneiden sich im Punkt S. Werden nun die Angriffspunkte der Kräfte $\mathfrak{L}$ und $\mathfrak{T}$ bis zum Schnittpunkt S verschoben, so erhält man mit Hilfe des Kräfteparallelogramms die Resultierende $\mathfrak{R}'$. Die Wirkungslinie der Resultierenden $\mathfrak{R}'$ ist parallel zu den Kräften $\mathfrak{F}_L$ und $\mathfrak{F}_T$. Sie ist die Gesamtkraft der beiden parallelen Teilkräfte. Die Resultierende wird auf ihrer Wirkungslinie so weit verschoben, bis ihr Angriffspunkt A auf die Verbindungslinie A_1A_2 fällt.

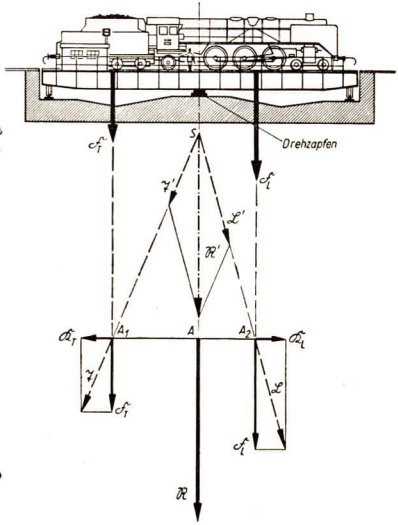


Abb. **137**/1. Zusammensetzung paralleler Kräfte

2. Die Zerlegung paralleler Kräfte. Soll eine Kraft in zwei zu ihr parallele Komponenten zerlegt werden, so geht man von den gleichen Überlegungen aus, wie dies bei der Zusammensetzung paralleler Kräfte der Fall war. In der Abbildung **138**/1 ist an einem Brückenkran die Zerlegung einer Kraft in zwei zu ihr parallele Komponenten veranschaulicht.

3. Fragen und Aufgaben:

1. An einer römischen Schnellwaage hängt eine Last von 8 kp. Die Länge des Waagebalkens zwischen den Angriffspunkten der Last und des Laufgewichts (G = 1 kp) beträgt 36 cm. Bestimmen Sie durch Zeichnung mit Hilfe der Zusammensetzung paralleler Kräfte den Drehpunkt und die Länge von Kraftarm und Lastarm! Kontrollieren Sie das Ergebnis mit Hilfe des Hebelgesetzes! Vergessen Sie nicht, den Maßstab für Längen und Kräfte anzugeben!
2. 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. Stellen Sie zeichnerisch nach Art der Abbildung **138**/1 fest, welche Kräfte auf die Reckständer wirken!

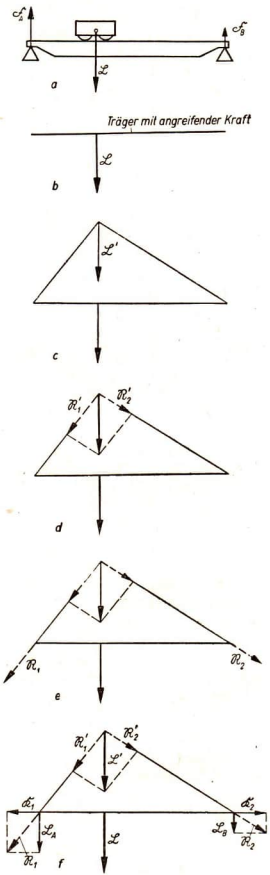


Abb. **138**/1. Zerlegung einer Kraft in zwei zu ihr parallele Komponenten

21. Das Drehmoment

1. Das Drehmoment. Bei der bisherigen Anwendung des Hebelgesetzes wurde vorausgesetzt, daß die Kraftrichtung senkrecht zum Hebel liegt. Dies trifft jedoch meist nicht zu. Die Abbildung **139**/1 zeigt eine belastete Briefwaage. An dem Hebelarm greift im Punkt A das Gewicht des Wägestückes an (Abb. **139**/2). Der Punkt A kann sich nur auf einer Kreisbahn bewegen. Daher wird die Bewegung durch die Komponente $\mathfrak{G}_1$, die tangential zu der Kreisbahn im Punkte A angreift, hervorgerufen.

Verbindet man die Punkte C und D mit dem Drehpunkt O, so entstehen zwei Dreiecke (Abbild. **139**/3). Die beiden Dreiecke AOC und AOD sind flächengleich, da sie die gleiche Grundlinie $\overline{AO} = a_1$ und die gleiche Höhe $\overline{AD}$ haben. Die

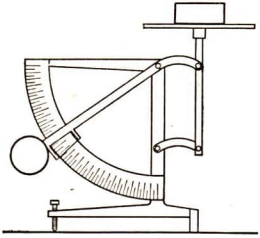


Abb. **139**/1. Belastete Briefwaage

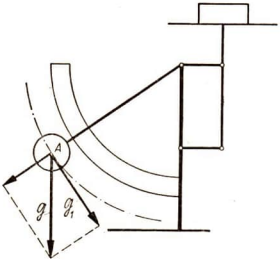


Abb. **139**/2. Kraftzerlegung an der Briefwaage

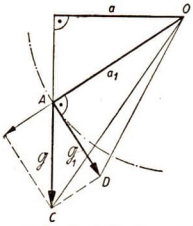


Abb. **139**/3. Kräfte an der Briefwaage

Punkte C und D liegen auf einer Parallelen zu a_1. Der Flächeninhalt des Dreiecks AOD beträgt

$$A = \frac{1}{2}\, G_1 \cdot a_1 .$$

Der Inhalt des Dreiecks AOC ist, wenn man $\overline{AC} = G$ als Grundlinie nimmt,

$$A = \frac{1}{2}\, G \cdot a .$$

Aus diesen beiden Gleichungen folgt:

$$G \cdot a = G_1 \cdot a_1 .$$

Greift eine Kraft schräg an einem Hebel an, so ist für die Kraftwirkung das Produkt aus der Länge des Hebels und der senkrecht an ihm angreifenden Kraftkomponente maßgebend. Auf Grund der Gleichung kommt man zu dem gleichen Ergebnis, wenn man das Produkt aus der Kraft und ihrem senkrechten Abstand vom Drehpunkt bildet. Der senkrechte Abstand einer Kraft von der Drehachse heißt *Kraftarm*. Man bezeichnet das Produkt aus der Kraft und dem Kraftarm als das **Drehmoment**.

Das Drehmoment einer Kraft ist gleich dem Produkt aus der Kraft und dem Kraftarm.

2. Der Momentensatz. Wirkt auf einen Körper ein Drehmoment, so führt dieser Körper eine Drehbewegung aus. Läßt man auf den Körper

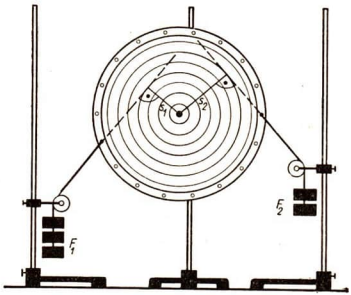


Abb. **139**/4. Momentenscheibe

ein zweites Drehmoment wirken, das ihn in entgegengesetzter Richtung dreht, so kann man durch geeignete Wahl der Kraft erreichen, daß der Körper in Ruhe bleibt. Die beiden Drehmomente sind dann gleich groß.

Mit Hilfe der in Abbildung **139**/4 wiedergegebenen Versuchsanordnung kann die Wirkung von Drehmomenten auf einem drehbar gelagerten Körper untersucht werden. *Die Scheibe ist dann im Gleichgewicht, wenn die rechtsdrehenden Momente ebenso groß sind wie die linksdrehenden Momente.*

Die linksdrehenden Momente werden mit einem positiven und die rechtsdrehenden Momente mit einem negativen Vorzeichen versehen. Bildet man die Summe aller Drehmomente, so ist diese im Gleichgewichtsfall gleich Null. Diese Zusammenhänge werden durch den **Momentensatz** erfaßt.

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

$$\boxed{F_1 \cdot s_1 + F_2 \cdot s_2 + F_3 \cdot s_3 + \cdots + F_n \cdot s_n = 0}\,.$$

Bezeichnet man die Drehmomente mit M_1, $M_2 \ldots$, so gilt die Gleichung:

$$\boxed{M_1 + M_2 + M_3 + \cdots + M_n = 0}\,.$$

Auch beim Hebel sind die Produkte aus Kraft und Kraftarm sowie aus Last und Lastarm Drehmomente, die im Falle des Gleichgewichtes gleich groß sind (Abb. **140**/1). Da beide Drehmomente gegensinnig sind, sind ihre Vorzeichen unterschiedlich. Die Summe der Drehmomente ist somit im Gleichgewichtsfalle gleich Null.

Die Aufstellung des Momentensatzes stellte eine Erweiterung der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse dar. *Der Momentensatz schließt das Hebelgesetz als Sonderfall ein.* Er ist umfassender als das Hebelgesetz.

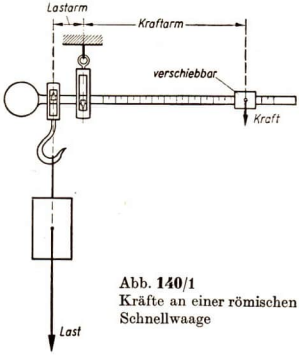


Abb. **140**/1
Kräfte an einer römischen Schnellwaage

4. Fragen und Aufgaben:

1. Berechnen Sie die Drehmomente bei der römischen Schnellwaage in Aufgabe 1 auf S. 138! Stellen Sie die Momente zeichnerisch durch Rechtecke dar und vergleichen Sie deren Flächeninhalt! Welche andere physikalische Größe wird dadurch graphisch dargestellt? Bestätigen Sie an diesem Beispiel den Momentensatz!
2. Nennen Sie Maschinen und Geräte, die Sie vom Unterrichtstag in der Produktion kennen, bei denen Drehmomente auftreten! Geben Sie Beispiele für die Möglichkeit der Veränderung der Drehmomente an einer Maschine!
3. Warum ist das Hebelgesetz ein Sonderfall des Momentensatzes?

22. Der Schwerpunkt

1. Der Begriff des Schwerpunktes. Unterstützt man ein Lineal mit einem Finger, so kann man einen Unterstützungspunkt finden, bei dem das Lineal im Gleichgewicht ist. Einen solchen Unterstützungspunkt gibt es für jeden Körper. Man bezeichnet diesen Punkt, bei dessen Unterstützung ein nur der Schwerkraft unterworfener Körper in allen Lagen in Ruhe bleibt, als Schwerpunkt.

2. Die Bestimmung des Schwerpunktes. Bei regelmäßigen, geometrisch einfachen Körpern, wie sie in Abbildung **141**/1 wiedergegeben sind, kann der Schwerpunkt

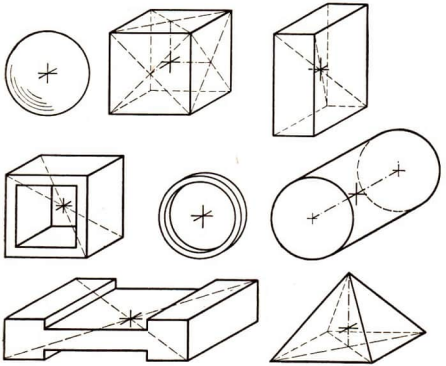


Abb. **141**/1. Schwerpunkt einiger Körper. Er kann auch außerhalb des Körpers liegen.

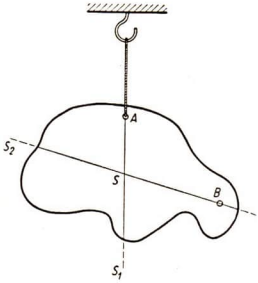


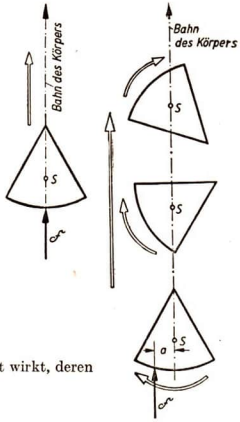
Abb. **141**/2. Experimentelle Bestimmung des Schwerpunktes

leicht bestimmt werden. Er stimmt in diesem Falle mit dem *Symmetriezentrum* überein. Voraussetzung ist, daß der Körper durchweg aus dem gleichen Material besteht.

Bei unregelmäßig geformten Körpern kann der Schwerpunkt am einfachsten experimentell bestimmt werden. Man hängt zu diesem Zweck den Körper an zwei beliebigen Punkten A und B frei beweglich auf (Abb. **141**/2). Die Lote S_1 und S_2 durch die Aufhängepunkte kennzeichnen zwei Schwerlinien des Körpers. Da alle Schwerlinien durch den Schwerpunkt gehen, so ist der Schnittpunkt zweier Schwerlinien der Schwerpunkt des Körpers.

3. Das Einwirken einer beliebigen Kraft auf einen frei beweglichen Körper. Wirkt auf einen frei beweglichen Körper eine Kraft, so hat diese eine Bewegungsänderung des Körpers zur Folge. Verläuft die Wirkungslinie dieser Kraft durch den Schwerpunkt des Körpers, so bewegt sich der Körper in Richtung der Kraft (Abb. **142**/1). Eine solche *fortschreitende Bewegung* heißt **Translation.**

Abb. **142**/1. Bahn eines Körpers, wenn die Wirkungslinie der angreifenden Kraft durch den Schwerpunkt geht



Geht die Wirkungslinie der Kraft nicht durch den Schwerpunkt, so führt der Körper zusätzlich eine *Drehbewegung*, eine **Rotation** aus (Abb. **142**/2).

Dieses Problem ist beispielsweise beim *Fußballspielen* von Bedeutung. Es kommt häufig nicht nur darauf an, den Ball in einer bestimmten Richtung zu schießen, sondern ihn außer in Translation auch in Rotation zu versetzen, da die Richtung des Balles nach dem Auftreffen eine andere ist als bei nicht rotierendem Ball.

Für den Flug einer *Rakete* ist es wichtig, daß die Wirkungslinie der resultierenden Antriebskraft durch den Schwerpunkt der Rakete gehen. Ist dies nicht der Fall, so weicht die Rakete von ihrer Bahn ab und kann sich überschlagen.

Abb. **142**/2. Bahn eines Körpers, auf den kurzzeitig eine Kraft wirkt, deren Wirkungslinie nicht durch den Schwerpunkt geht

4. Fragen und Aufgaben:

1. Warum rotiert ein Diskus während seines Fluges? Wie vermeidet man beim Kugelstoß die Rotation der Kugel während des Fluges?
2. Warum muß beim Start einer Rakete die Wirkungslinie der Antriebskraft durch den Schwerpunkt gehen?
3. Überlegen Sie sich, wie man experimentell die Lage des Schwerpunktes bei einem Menschen bestimmen kann? Wofür ist die Kenntnis der Lage des Schwerpunktes von Wichtigkeit?

23. Die Gleichgewichtslagen — Die Standfestigkeit

1. Die Gleichgewichtslagen eines Körpers. Ein Körper befindet sich im Gleichgewicht, wenn alle auf ihn einwirkenden Drehmomente sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben. Man unterscheidet drei **Gleichgewichtslagen.** Sie lassen sich mit Hilfe eines Lineals veranschaulichen.

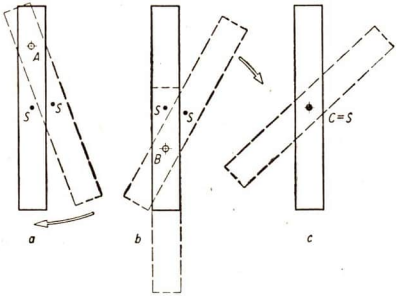


Abb. **142**/3. Gleichgewichtslagen eines um eine Achse drehbaren Lineals
a) Unterstützung in A: Stabiles Gleichgewicht
b) Unterstützung in B: Labiles Gleichgewicht
c) Unterstützung in C: Indifferentes Gleichgewicht

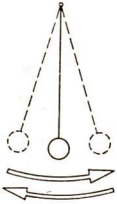


Abb. **143**/1. Ein Pendel, das aus seiner Ruhelage gebracht ist, schwingt stets um die stabile Gleichgewichtslage.

a) Stabiles Gleichgewicht (Abb. **142**/3a). Der Schwerpunkt liegt unterhalb der Drehachse und befindet sich in der tiefstmöglichen Lage. Nach jeder Verschiebung geht der Schwerpunkt wieder in die Ausgangslage zurück. Der Körper ist wieder im stabilen Gleichgewicht. Im stabilen Gleichgewicht befinden sich alle aufgehängten Körper, zum Beispiel das *Pendel* (Abb. **141**/1), die Lampe, die Last an einem Kran usw.

Der Schwerpunkt eines beweglichen Körpers sucht stets eine möglichst tiefe Lage einzunehmen. Sie ist bei einem hängenden Körper erreicht, wenn der Schwerpunkt senkrecht unter dem Unterstützungspunkt liegt. Der Körper ist dann im stabilen Gleichgewicht. Bei einer Störung des Gleichgewichts kehrt er selbsttätig in die alte Lage zurück.

b) Labiles Gleichgewicht (Abb. **142**/3b). Der Schwerpunkt liegt senkrecht über der Drehachse. Bei der kleinsten Verschiebung geht der Körper aus dieser labilen Gleichgewichtslage in die stabile über. Der Schwerpunkt bewegt sich dabei aus der gegebenen höchsten Lage in die tiefstmögliche Lage.

Bei der Registrierung von Erdbeben verwendet man *Seismographen* (Abb. **143**/2). Ein solcher Seismograph ist beispielsweise das *Wiechert-Pendel*. Es besteht aus einer großen Eisenmasse (etwa 1000 kg), die wie ein umgekehrtes Pendel auf einem Gelenk steht. Dieses Pendel befindet sich im labilen Gleichgewicht. Mit Hilfe von zwei horizontal wirkenden Federn wird ein Umkippen verhindert. Bei langsamen Bodenbewegungen, wie sie von fernen Erdbeben herrühren, macht das Pendel infolge seiner großen Masse und der darauf beruhenden Trägheit die Bewegung des mit dem Erdboden verbundenen Gehäuses nicht mit. Bereits eine geringfügige Bewegung des Erdbodens genügt, das Pendel aus dem labilen Gleichgewicht zu bringen, so daß es dadurch eine Bewegung nach der entgegengesetzten Seite ausführt. Ein Hebelgestänge überträgt diese Pendelschwingung auf den Schreibarm. Durch die Rückstellkraft der Federn wird das Pendel immer wieder in die labile Gleichgewichtslage gebracht. Die große Empfindlichkeit dieses Gerätes ist durch die labile Gleichgewichtslage des Pendels gegeben.

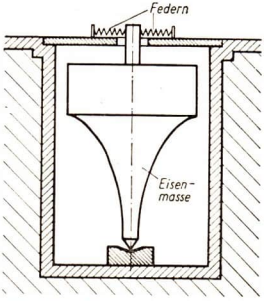


Abb. **143**/2. Wiechert-Pendel

Ein hängender Körper befindet sich im labilen Gleichgewicht, wenn der Schwerpunkt senkrecht über dem Unterstützungspunkt liegt. Bei einer noch so geringen Verschiebung geht der Schwerpunkt in eine tiefere, stabile Lage über.

c) Indifferentes Gleichgewicht (Abb. **142**/3c). Geht die Drehachse durch den Schwerpunkt des Körpers, so wird bei einer Drehung der Schwerpunkt weder

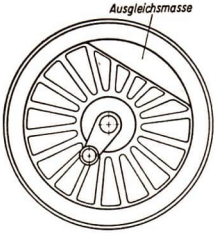


Abb. **144**/1. Treibrad an der Lokomotive

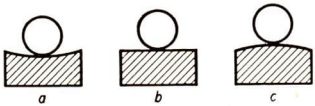


Abb. **144**/2 Gleichgewichtslagen einer Kugel

a) Stabiles Gleichgewicht; b) indifferentes Gleichgewicht; c) labiles Gleichgewicht

gehoben noch gesenkt. Der Körper ist bezüglich dieser Drehachse in jeder Lage im Gleichgewicht.

Im indifferenten Gleichgewicht befinden sich viele rotierende Teile, wie *Schwungräder*, *Schwungscheiben* und *Fahrzeugräder*. Auch die Treibräder der Lokomotive sind im indifferenten Gleichgewicht. Bei ihnen wird die Masse der Kurbel durch eine segmentförmige Masse auf der entgegengesetzten Seite der Drehachse ausgeglichen (Abb. **144**/1). Dieser Ausgleich bei Rädern, insbesondere bei sehr schnell rotierenden, ist erforderlich, da sonst das Rad schlagen würde. Eine Überbeanspruchung der Lager wäre die Folge.

Fallen Schwerpunkt und Unterstützungspunkt zusammen, so ist der Körper im indifferenten Gleichgewicht.

Die Gleichgewichtslage liegender Körper hängt weitgehend von der *Form der Unterlage* ab. So zeigt die Abbildung **144**/2 als Beispiel die drei Gleichgewichtslagen einer Kugel bei unterschiedlich geformter Unterstützungsfläche.

2. Die Standfestigkeit. Körper im stabilen Gleichgewicht, beispielsweise Stühle, fallen um, wenn sie infolge einer Kraftwirkung genügend weit um eine Kante gekippt werden. Jeder stehende Körper kann aus dem stabilen in den labilen Gleichgewichtszustand gebracht werden, indem sein Schwerpunkt so weit bewegt wird, daß er über der Kippkante liegt (Abb. **144**/3). Bewegt man nun den Stuhl wieder etwas zurück, so geht er in die ursprüngliche stabile Gleichgewichtslage über. Wird er jedoch über die labile Gleichgewichtslage hinaus weiterbewegt, so kippt er um. Er geht dabei in eine andere, ebenfalls stabile Gleichgewichtslage über.

Die Eigenschaft eines Körpers, entgegen einer Kraftwirkung im stabilen Gleichgewicht zu verbleiben, wird als **Standfestigkeit** des Körpers bezeichnet.

Zur Untersuchung der Standfestigkeit dient der in Abbildung **144**/4 wiedergegebene Versuch. Im Schwerpunkt S eines Holzquaders wirkt sein Gewicht $\mathfrak{G}$.

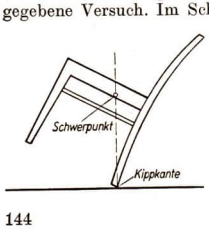


Abb. **144**/3. Ein Stuhl ist aus seiner stabilen Gleichgewichtslage so weit gekippt worden, daß er sich im labilen Gleichgewicht befindet.

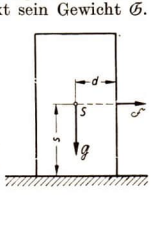


Abb. **144**/4. Zum Kippen des Körpers aus dem stabilen Gleichgewicht muß ein Drehmoment auf ihn ausgeübt werden.

Durch die Kraft $\mathfrak{F}$ wird der Quader angekippt und der Schwerpunkt gehoben. Hört die Kraftwirkung auf, so geht der Holzquader wieder in seine ursprüngliche stabile Gleichgewichtslage zurück.

Die Wirkungslinie der Kraft $\mathfrak{F}$ verläuft durch den Schwerpunkt des Quaders. Der Kraftarm ist gleich dem Abstand s, so daß auf den Holzquader das Drehmoment $F \cdot s$ ausgeübt wird. Man bezeichnet dieses Moment als *Kippmoment*. Ihm entgegengesetzt gerichtet ist das *Standmoment* $G \cdot d$. Wie Versuche zeigen, *bleibt der Körper so lange im stabilen Gleichgewicht, wie das Kippmoment kleiner als das Standmoment ist* (Abb. **145**/1). Ist jedoch das Kippmoment größer als das Standmoment, so kippt der Körper und geht in eine andere stabile Gleichgewichtslage über. Der Schwerpunkt nimmt entsprechend der neuen Standfläche die tiefstmögliche Lage ein.

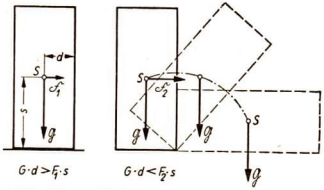


Abb. **145**/1. Wirkung des Standmoments und des Kippmoments

Die Standfestigkeit eines Körpers ist somit um so größer, je größer das Standmoment und je kleiner das Kippmoment ist. Da das Standmoment durch das Produkt $G \cdot d$ bestimmt wird, ist die Standfestigkeit um so größer, je größer das Gewicht (G) des Körpers und je größer der Kraftarm (d) ist. Berücksichtigt man das Kippen nach verschiedenen Seiten, so zeigt sich, daß durch Vergrößern der Standfläche die Standfestigkeit verbessert wird. Aus der Größe des Kippmoments $F \cdot s$ kann gefolgert werden, daß dieses bei konstanter Kraft um so kleiner ist, je kleiner s ist, je niedriger somit der Schwerpunkt liegt. Kleineres Kippmoment bedeutet aber größere Standfestigkeit.

Die Standfestigkeit eines Körpers ist um so größer, je größer sein Gewicht und die Unterstützungsfläche sind und je tiefer der Schwerpunkt liegt.

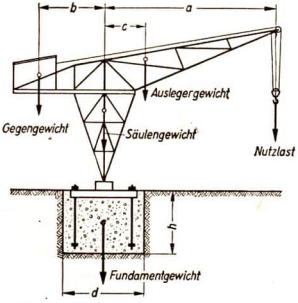


Abb. **145**/2. Drehkran

Die Standfestigkeit ist in der Industrie von großer Bedeutung. Sie muß bei der Konstruktion und bei der Aufstellung von Maschinen, besonders bei Hebezeugen und anderen Anlagen mit überhängenden Teilen, berücksichtigt werden. Die Abbildung **145**/2 zeigt schematisch einen *Drehkran*. Aus den verschiedenen an dem Kran angreifenden Kräften und den dazugehörigen Kraftarmen ergeben sich das Standmoment und die Kippmomente. Der Kran ist dann standfest, wenn die Summe aller Kippmomente kleiner als das Standmoment ist. Die Berechnungen werden für den maximal belasteten Kran durchgeführt. Außerdem wird hierbei noch ein bestimmter Sicherheitsfaktor berücksichtigt, damit auch bei Sturm

die Standfestigkeit gewährleistet ist. Bei Drehkränen besteht der Fundamentklotz meist aus Kiesbeton und hat eine quadratische Grundfläche (Abb. **145**/2). Die Größe dieses Fundamentklotzes ist von der Größe des Kranes und dessen Tragfähigkeit abhängig.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Legen Sie ein möglichst schweres, aber nicht zu großes Wägestück in eine Ecke einer leeren, länglichen Pappschachtel! Stellen Sie die Schachtel an den Rand eines Tisches und probieren Sie aus, wie weit Sie die Schachtel mit dem unbeschwerten Ende über den Rand des Tisches schieben können, ohne daß sie herunterfällt! Erklären Sie den Vorgang!
2. Beschreiben Sie den Gleichgewichtszustand eines Jungen, der einen Handstand macht! Unter welcher Bedingung ist es möglich, auf den Händen zu laufen? Bei welcher Barrenübung kommt derselbe Gleichgewichtszustand vor?
3. Warum steht man in einem Fahrzeug beim Anfahren, Bremsen und in Kurven breitbeinig sicherer als mit geschlossenen Füßen?
4. Bestimmen Sie die Kippmomente und das Standmoment des in Abb. **145**/2 dargestellten Drehkrans? Wann ist der Kran standfest?
5. Unter welchen Voraussetzungen kann man Fahrzeuge hoch beladen bzw. als Doppelstock-Fahrzeuge bauen?

24. Die verschiedenen Arten der Bewegung — Die Geschwindigkeit

1. Allgemeines über Bewegungen. Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird sein Bewegungszustand geändert. *Stimmt die Wirkungslinie der Kraft mit der Bewegungsrichtung überein*, wie dies beispielsweise bei einem anfahrenden Zug der Fall ist, *so wird nur der Betrag der Geschwindigkeit des Körpers geändert.* Die von der Lokomotive ausgeübte Kraft wirkt bei geraden horizontalen Gleisen in der Bewegungsrichtung und ändert lediglich den Betrag der Geschwindigkeit des Zuges.

Wirkt die Kraft jedoch in schräger Richtung auf einen Körper, so wird sowohl der Betrag der Geschwindigkeit als auch deren Richtung geändert. Dies tritt beispielsweise dann ein, wenn ein Fußballspieler einen ihm zugespielten Ball sofort weiterschießt.

Für die Untersuchung von Bewegungsvorgängen ist es häufig zweckmäßig, den Körper nicht in seiner wirklichen Ausdehnung zu betrachten. Man nimmt vielmehr an, daß die Masse des gesamten Körpers in seinem Schwerpunkt vereinigt sei. So denkt man sich bei der Bestimmung der Erdbahn um die Sonne die gesamte Erdmasse im Erdmittelpunkt vereinigt. Soll jedoch die Drehung der Erde um ihre Achse untersucht werden, so ist die genannte Vereinfachung nicht mehr zulässig. Infolgedessen sind die Bewegungsgesetze, die sowohl für die fortschreitende als auch für die Drehbewegung gelten, entsprechend komplizierter als die Gesetze, die nur für die fortschreitende oder nur für die Drehbewegung gelten.

2. Die verschiedenen Arten der Bewegung. Man unterscheidet zwei verschiedene Arten der Bewegung: die *fortschreitende Bewegung* oder *Translation* und die *Drehbewegung* oder *Rotation*. Ein Körper kann entweder nur eine dieser Bewegungen durchführen, oder er kann auch beide gleichzeitig durchführen. Während beispielsweise ein Eisenbahnzug nur eine Translation ausführt, ergibt sich für die Lokomotive auf der Drehscheibe eine Rotation. Für die Bewegung der Erde um die

Sonne gelten dagegen beide Bewegungsarten gleichzeitig. Die Erde rotiert um ihre eigene Achse und bewegt sich außerdem auf einer elliptischen Bahn um die Sonne.

Bei der fortschreitenden Bewegung eines Eisenbahnwagens sind die Bahnen aller Punkte des Wagenkastens zueinander parallele Geraden (Abb. **147**/1).

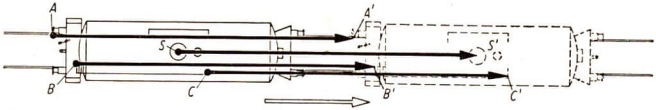


Abb. **147**/1. Translation eines Eisenbahnwagens auf einer geraden Schienenstrecke. Jeder Punkt bewegt sich auf einer Geraden; alle Geraden sind parallel zueinander.

Bei einer Drehbewegung, wie sie die Lokomotive auf der Drehscheibe ausführt, *bewegen sich alle Punkte, außer denen, die auf der Drehachse liegen, auf konzentrischen Kreisen* (Abb. **147**/2). Auch die Schwungräder von Maschinen führen Drehbewegungen aus. Handelt es sich jedoch hierbei um Räder eines fahrenden Eisenbahnzuges, so überlagert sich der Rotation eine Translation. Es entstehen sogenannte Radkurven (Abb. **147**/3).

Bei der genauen Analyse von Bewegungen wird auch die Geschwindigkeit des Körpers untersucht. Man unterscheidet hinsichtlich der Geschwindigkeit folgende Arten der Bewegung: die *gleichförmige Bewegung* und die *ungleichförmige Bewegung*.

Eine Bewegung ist gleichförmig, wenn *sich der Körper auf einer geradlinigen Bahn bewegt und in gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt*, wenn er somit eine *konstante Geschwindigkeit* hat. Dies ist bei einem Eisenbahnzug der Fall, der sich auf gerader Strecke mit gleicher

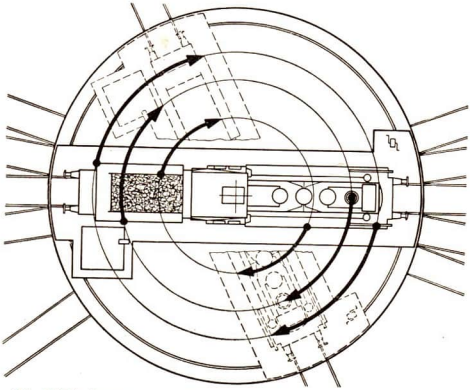


Abb. **147**/2. Rotation einer Lokomotive auf einer Drehscheibe. Alle Punkte bewegen sich auf konzentrischen Kreisen.

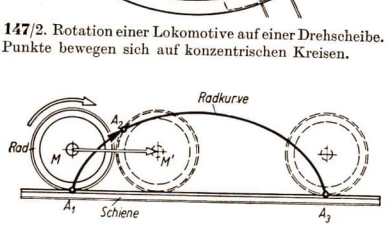


Abb. **147**/3. Radkurve

Geschwindigkeit bewegt. Auch ein Flugzeug bewegt sich zwischen den Start- und Landungsmanövern meist gleichförmig. Genaugenommen wird dieser Zustand nie ganz erreicht. Die Abweichungen sind aber bei vielen Bewegungsvorgängen, wie bei den genannten Beispielen, so klein, daß sie vernachlässigt werden können.

Werden die für die gleichförmige Bewegung genannten Bedingungen, nämlich gleichbleibende Geschwindigkeit und geradlinige Bahn, nicht eingehalten, so ist die Bewegung *ungleichförmig*. Beispielsweise bewegt sich jeder Körper auf einer Kreisbahn ungleichförmig, auch wenn der Betrag seiner Geschwindigkeit konstant ist. Die Richtung der Geschwindigkeit ändert sich bei der Kreisbewegung ständig. So ist auch die Bewegung der Erde um die Sonne eine ungleichförmige, da sich die Erde einerseits auf einer elliptischen Bahn bewegt und andererseits der Betrag der Geschwindigkeit in Sonnennähe größer ist als in Sonnenferne.

3. Die Geschwindigkeit als Vektor. Da der Weg, auf dem sich der Körper bewegt, eine bestimmte Richtung hat, ist die Geschwindigkeit selbst auch eine gerichtete Größe, ein Vektor.

Die Geschwindigkeit ist ein Vektor.

Abb. **148/1**
Parallelogramm der Geschwindigkeiten

In der Abbildung **132/2** war am Beispiel eines über einen Fluß schwimmenden Jungen mit Hilfe des Kräfteparallelogramms die resultierende Kraft ermittelt worden. Auf Grund dieser wirkenden Kräfte hat der Schwimmer in Flußrichtung eine bestimmte Geschwindigkeit v_1 und senkrecht zur Flußrichtung die Geschwindigkeit v_2. Daraus ergibt sich die resultierende Geschwindigkeit v_R (Abb. **148/1**). Die Richtung der resultierenden Geschwindigkeit stimmt mit der resultierenden Kraftrichtung überein.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Überlegen Sie sich, welche verschiedenen Arten der Bewegung Sie an Ihrem Fahrrad beobachten können, wenn Sie in gerader Richtung bzw. eine Kurve fahren! Denken Sie auch an die Bewegung der Räder!
2. Welche Bewegung führt ein Auto, das auf gerader Straße fährt, relativ zur Erdoberfläche bzw. relativ zum Erdmittelpunkt aus?
3. Nennen Sie Beispiele für Bewegungen, bei denen der Betrag der Geschwindigkeit gleich bleibt, während die Richtung sich ändert, und Bewegungen, bei denen es umgekehrt ist! Begründen Sie, warum die Geschwindigkeit ein Vektor ist!

25. Die gleichförmige Bewegung

1. Das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz und das Weg-Zeit-Gesetz. Da die Geschwindigkeit ein Vektor ist, wird sie nicht nur durch ihren Betrag, sondern auch durch ihre Richtung gekennzeichnet. Legt ein Fußgänger in gleichen Zeiten gleiche Wegstrecken zurück, so ist seine Geschwindigkeit ihrem Betrage nach konstant. Behält der Fußgänger dabei auch ständig die gleiche Richtung bei, so führt er eine

gleichförmige Bewegung aus. Eine gleichförmige Bewegung ist grundsätzlich nur auf einer geraden Strecke möglich (Abb. **149**/1). Ist die Bahn krummlinig, so ändert sich dauernd die Richtung der Geschwindigkeit. Für die gleichförmige Bewegung gilt das bereits bekannte **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz**:

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

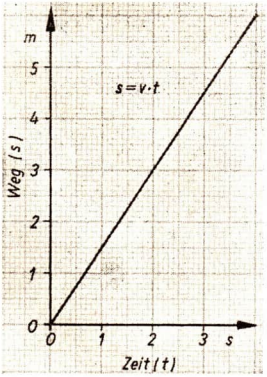
Die Geschwindigkeit ist gleich dem Quotienten aus dem Weg und der Zeit. Bei einer gleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit in jedem Zeitpunkt der Bewegung konstant.

Wird als Längeneinheit das Meter (m) und als Zeiteinheit die Sekunde (s) verwendet, so ergibt sich als *Maßeinheit der Geschwindigkeit* das **Meter je Sekunde** ($m \cdot s^{-1}$). Weitere Maßeinheiten für die Geschwindigkeit sind das Kilometer je Sekunde ($km \cdot s^{-1}$) und das Kilometer je Stunde ($km \cdot h^{-1}$).

Mit Hilfe der Gleichung $v = \frac{s}{t}$ kann v berechnet werden, wenn s und t bekannt sind. Soll jedoch der Weg s ermittelt werden, während v und t bekannt sind, so muß man die Gleichung umformen. Man multipliziert beide Seiten der Gleichung mit t und erhält das **Weg-Zeit-Gesetz** der gleichförmigen Bewegung:

$$\boxed{s = v \cdot t}\,.$$

Abb. **149**/1 Nur bei einer geradlinigen Bewegung und konstanter Geschwindigkeit ergibt sich eine gleichförmige Bewegung.



Bei einer gleichförmigen Bewegung ist der Weg gleich dem Produkt aus der Geschwindigkeit und der Zeit.

Mit Hilfe einer graphischen Darstellung kann man die Beziehung zwischen dem Weg, der Geschwindigkeit und der Zeit veranschaulichen. Die Zeitwerte werden auf der Abszisse und die Weg- beziehungsweise Geschwindigkeitswerte auf der Ordinate abgetragen. In der Abbildung **149**/2 ist das *Weg-Zeit-Diagramm* einer gleichförmigen Bewegung dargestellt. Es ergibt sich eine ansteigende Gerade. Stellt man in ähnlicher Weise das *Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm* her, so erhält man eine zur Abszisse parallele Gerade (Abb. **150**/1).

Abb. **149**/2. Weg-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung, $v = 1{,}5\ m \cdot s^{-1}$

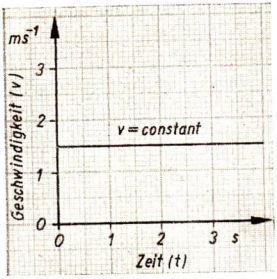


Abb. **150/1.** Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung, $v = 1{,}5\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$

Aus dem Weg-Zeit-Diagramm kann man beispielsweise entnehmen, welchen Weg ein Fußgänger ($v = 1{,}5\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$) in einer bestimmten Zeit zurücklegt, beziehungsweise welche Zeit er für einen bestimmten Weg benötigt. Das gleiche gilt für die gleichförmige Bewegung anderer Körper, nur muß dann das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm entsprechend den anderen Werten gezeichnet werden.

Die gleichförmige Bewegung ist die einzige Bewegungsart, *bei der auf den Körper keine Kraft einwirkt, beziehungsweise die Resultierende aller einwirkenden Kräfte gleich Null ist.* Der Sonderfall, daß keine Kraft wirkt, kommt jedoch praktisch nicht vor. Jeder sich bewegende Körper unterliegt irgendwelchen Kräften. So wirken auf jeden bewegten Körper auf der Erde die Schwerkraft und die Reibungskraft.

Die Wirkung der Schwerkraft kann beispielsweise dadurch aufgehoben werden, daß sich der Körper auf einer horizontalen Ebene bewegt. Läßt man außerdem an dem Körper eine der Reibungskraft gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft angreifen, so wird damit die Wirkung der Reibung aufgehoben. Beispielsweise kann infolge der Zugkraft der Lokomotive die Bewegung eines Eisenbahnzuges annähernd gleichförmig sein. Das gleiche gilt auch für ein Flugzeug, das infolge der Zugkraft der Motoren trotz des Luftwiderstandes eine annähernd gleichförmige Bewegung erreicht.

2. Die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Augenblicksgeschwindigkeit. Infolge der Wirkung der Schwerkraft und der Reibung sind die meisten Bewegungen ungleichförmig. Aber auch andere Ursachen können zu einer ungleichförmigen Bewegung führen.

Beobachtet man die Fahrt eines Kraftwagens im Straßenverkehr, so ändert sich seine Geschwindigkeit ständig. Der Kraftfahrer muß die Bewegung seines Autos dem übrigen Straßenverkehr anpassen. Das führt dazu, daß er bald schneller, bald langsamer fahren muß, daß er zum Beispiel vor Kreuzungen anhält und anschließend wieder anfährt usw. Die Zeitabschnitte, in denen die Geschwindigkeit des Autos konstant ist, sind sehr klein. Es interessiert in diesem Zusammenhang gar nicht so sehr die Geschwindigkeit, die das Auto in jedem Augenblick hat, die *Augenblicksgeschwindigkeit*, sondern die durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der es die gesamte Fahrtstrecke zurückgelegt hat. Aus dieser Geschwindigkeit, die man als *Durchschnittsgeschwindigkeit* bezeichnet, kann der Kraftfahrer Rückschlüsse darauf ziehen, welche Zeit er für eine ähnliche Strecke benötigt. Für die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit gilt die bereits bekannte Gleichung

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

wobei s sie gesamte Fahrtstrecke und t die für die Fahrt benötigte Zeit bedeuten.

Einige Durchschnittsgeschwindigkeiten

Gegenstand	Geschwindigkeit	
	$m \cdot s^{-1}$	$km \cdot h^{-1}$
Gletscher	$6{,}4 \cdot 10^{-6}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$
Schnecke	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	$5{,}4 \cdot 10^{-3}$
Leitungselektronen	$1 \cdot 10^{-3}$	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$
Blutkreislauf	$8 \cdot 10^{-2}$	0,29
Paternosteraufzug	0,3	1,1
Fußgänger	1,4	5
Förderband	1,5···2,0	5,4··· 7,2
Fallschirmspringer	3 ···5	10,8···18
Radfahrer	5,6	20
Langstreckenläufer (10 km)	5,6	20
Biene	6,5	23
Ozean-Frachtdampfer	7	25
100 m-Läufer (Weltrekord)	9,9	35,6
Straßenbahn	11	40
Regentropfen	11	40
Güterzug	12,5···15,3	45···55
Motorrad	12 ···18	43···65
Personenzug	14 ···18	50···65
Kraftwagen (P 50)	18 ···22	65···80
Schnelldampfer	20	72
Lastenaufzug in Bergwerk	20 ···30	72···108
Geschossener Fußball	24	86
Schnellzug	22 ···25	80···90
Rennpferd	25	90
Bob	45	162
Schwalbe	40 ···70	144···252
Propellerflugzeug (IL 14)	88,9	320
Düsenflugzeug (Tu 104)	236	850
Kleinkalibergeschoß (v_0)	330	1188
Schall in Luft, 0°C	332	1195
Erdumdrehung (Punkt am Äquator)	464	1670
Gewehrgeschoß (v_0)	870	3130
Mond um die Erde	1000	3600
Schall im Wasser (19°C)	1461	5260
1. Kosmische Geschwindigkeit	$7{,}9 \cdot 10^3$	$28{,}4 \cdot 10^3$
Sputnik 3	$8 \cdot 10^3$	$28{,}8 \cdot 10^3$
2. Kosmische Geschwindigkeit	$11{,}2 \cdot 10^3$	$40{,}3 \cdot 10^3$
Erde auf Bahn um Sonne	$29{,}4 \cdot 10^3$	$1{,}1 \cdot 10^5$
Künstlicher Planet „XXI. Parteitag“ um Sonne	$32 \cdot 10^3$	$1{,}2 \cdot 10^5$
Sternschnuppe	$50 \cdot 10^3$	$1{,}8 \cdot 10^5$
Licht im luftleeren Raum	$3 \cdot 10^8$	$1{,}1 \cdot 10^9$

In der vorstehenden Tabelle sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten einiger wichtiger Vorgänge aus den verschiedensten Bereichen zusammengestellt. Dabei sind nur allgemeine und am häufigsten auftretende mittlere Werte angegeben.

Bei den vorbereitenden Untersuchungen für die Weltraumfahrt wurde auch die Frage gestellt, *welche Geschwindigkeit der Mensch noch auszuhalten vermag.* Er verträgt jede nur erreichbare Geschwindigkeit. Von Bedeutung sind für den Menschen nicht die hohen Geschwindigkeiten, sondern die starken Geschwindigkeitsänderungen, die bei einem Weltraumflug auftreten können.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Messen Sie bei einer Eisenbahn- oder Autofahrt mit Hilfe der Kilometersteine die in bestimmten Zeitabschnitten zurückgelegten Strecken und berechnen Sie daraus die Geschwindigkeit! Was schließen Sie aus der Tatsache, daß die Werte nicht gleich sind?
2. Die dritte kosmische Rakete (Lunik III) legt auf ihrer ellipsenförmigen Bahn um die Erde eine Strecke von 1284300 km in 367,6 Stunden zurück. Berechnen Sie aus diesen Werten die mittlere Bahngeschwindigkeit! Vergleichen Sie die Geschwindigkeit der Rakete mit anderen Geschwindigkeiten in der Tabelle auf S. 151!
3. Wann weichen die Werte für die Augenblicksgeschwindigkeit und die Durchschnittsgeschwindigkeit bei einem Kraftwagen bzw. bei einem Eisenbahnzug nicht oder nur wenig voneinander ab?

26. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

1. Die beschleunigte Bewegung. Die Ursache einer Bewegungsänderung ist eine Kraft. Ein Schwimmer, der aus einer strömungsfreien Bucht in die Strömung des Flusses hinausschwimmt, wird von ihr erfaßt und abgetrieben. Infolge der von der Strömung ausgeübten Kraft ändert sich seine Geschwindigkeit.

Auch der in Abbildung **153**/1 wiedergegebene Versuch zeigt eine ähnliche Wirkung der Kraft. Durch den schräg zur Bewegungsrichtung wirkenden Luftstrom wird die geradlinige Bahn der Kugel krummlinig. Außerdem wird die Geschwindigkeit der Kugel geändert, sie wird beschleunigt.

Würde der Luftstrom jedoch so wirken, wie es die Abbildung **153**/2 zeigt, so würde die Bewegung der Kugel zunächst verzögert werden, bis sie zum Stillstand kommt. Anschließend wird die Kugel wieder beschleunigt, aber die neue Bewegungsrichtung ist der alten entgegengesetzt gerichtet.

Wirkt schließlich der Luftstrom in der Richtung, wie es die Abbildung **153**/3 darstellt, so wird die Kugel nicht bis zum Stillstand abgebremst, sondern sie ändert gleichzeitig die Bewegungsrichtung. Sie rollt schließlich in Richtung des Luftstromes. Auch hierbei wird die Kugel zunächst gebremst und dann wieder beschleunigt.

Die Änderung der Geschwindigkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraumes heißt **Beschleunigung**. Nimmt die Geschwindigkeit ab, so ist die Beschleunigung negativ. Eine *negative Beschleunigung* wird häufig auch als *Verzögerung* bezeichnet.

Bei einer beschleunigten Bewegung ändert sich die Geschwindigkeit. Die Ursache der Beschleunigung eines Körpers ist eine auf den Körper einwirkende Kraft.

Abb. **153/1**
Änderung der Bahn und der Geschwindigkeit einer gleichförmig bewegten Kugel

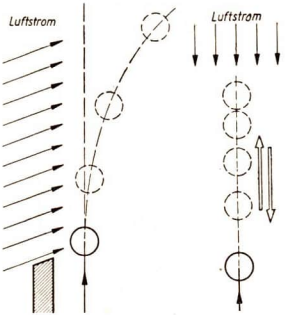


Abb. **153/2.** Die Richtung des Luftstromes ist der Bewegungsrichtung entgegengesetzt gerichtet.

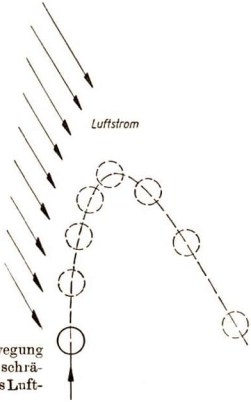


Abb. **153/3.** Bewegung einer Kugel bei schräger Richtung des Luftstromes.

Die Beschleunigung ist wie die Kraft ein *Vektor*. Wirken auf einen Körper mehrere beschleunigende Kräfte ein, so kann mit Hilfe des *Parallelogramms der Beschleunigungen* die resultierende Beschleunigung ermittelt werden. Das Parallelogramm der Beschleunigungen wird in der gleichen Weise gezeichnet wie das Parallelogramm der Kräfte und das Parallelogramm der Geschwindigkeiten.

Die Beschleunigung ist ein Vektor.

2. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Ist die Krafteinwirkung auf einen Körper konstant, so ist auch die Geschwindigkeitsänderung, das heißt die Beschleunigung, konstant. Man spricht in diesem Falle von einer *gleichmäßig beschleunigten Bewegung*. Eine solche konstante Kraft ist beispielsweise die *Hangabtriebskraft*. Sie wirkt auf alle, eine schiefe Ebene herabrollenden Körper (Abb. **153/4**).

Abb. **153/4.** Die vom Gewicht herrührende Kraftkomponente, die Hangabtriebskraft, in Richtung der schiefen Ebene bewirkt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

3. Das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung. Zwischen den Größen *Weg*, *Zeit*, *Geschwindigkeit* und *Beschleunigung* einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung bestehen quantitative Beziehungen. Die in Abbildung **153/5** wiedergegebene Versuchsanordnung

Abb. **153/5.** Schiefe Ebene zur Ableitung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

zeigt, wie man die entsprechenden Gesetze nachweisen kann. Man mißt bei diesem Versuch die nach 1, 2, 3 ... Sekunden auf der schiefen Ebene zurückgelegten Wege.

Die Geschwindigkeit nach einem bestimmten Zeitabschnitt, beispielsweise nach 4 s, wird wie folgt ermittelt: Man wählt die Ablaufstrecke so, daß die Kugel gerade 4 s lang auf der schiefen Ebene rollt. Dann läßt man sie auf eine waagerechte Bahn übergehen. Die Kugel ist dadurch nicht mehr der Wirkung der Hangabtriebskraft ausgesetzt. Daher geht die gleichmäßig beschleunigte Bewegung auf der schiefen Ebene in eine gleichförmige Bewegung auf waagerechter Bahn über. Die Geschwindigkeit der Kugel kann auf der waagerechten Ebene als Quotient aus dem Weg und der Zeit bestimmt werden. In der folgenden Tabelle sind zur Untersuchung der Abhängigkeit des Weges und der Geschwindigkeit von der Zeit die Werte einer Meßreihe wiedergegeben. In der ersten Spalte ist jeweils die Zeit angegeben, während der die Kugel auf der schiefen Ebene rollte.

Abhängigkeit des Weges und der Geschwindigkeit von der Zeit

Zeit (t) s	Weg der Kugel auf der schiefen Ebene (s) cm	Geschwindigkeit der Kugel zum Zeitpunkt t (v) $cm \cdot s^{-1}$	$\frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Zeit}}$ $\left(\frac{v}{t}\right)$ $cm \cdot s^{-2}$
1	3,1	6,2	6,20
2	12,1	12,5	6,25
3	27,4	18,5	6,17
4	49,6	25,0	6,25
5	77,1	31,0	6,20
6	110,1	37,0	6,17

Aus der Tabelle erkennt man, daß mit *zunehmender Zeit die erreichte Geschwindigkeit größer* wird. Bildet man den Quotienten aus diesen beiden Werten, so ist dieser annähernd konstant.

Zu dem gleichen Ergebnis kommt man, wenn die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit der beschleunigten Bewegung graphisch dargestellt wird (Abb. **154**/1). *Je länger die beschleunigte Bewegung andauert, um so größer ist die erreichte Geschwindigkeit.*

$v \sim t$, somit $\frac{v}{t} = \text{konst.}$

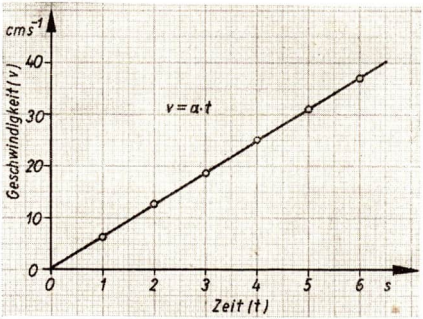


Abb. **154**/1. Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Geschwindigkeit der Zeit proportional.

Bezeichnet man in der Gleichung $\frac{v}{t}$ = konstant den konstanten Wert mit a, so ist

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

Die Konstante a ist die Beschleunigung. Da die Geschwindigkeit die Maßeinheit $m \cdot s^{-1}$ und die Zeit t die Einheit s hat, ergibt sich als *Maßeinheit der Beschleunigung* $m \cdot s^{-2}$.

Aus der Gleichung $a = \frac{v}{t}$ folgt auch, daß bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung die Geschwindigkeit in gleichen Zeiten um gleiche Beträge zunimmt (vgl. hierzu auch die Meßwerte der Tabelle auf S. 154).

In der auf Seite 154 wiedergegebenen Versuchsreihe hat die Beschleunigung den Mittelwert 6,21 $m \cdot s^{-2}$. Die Abweichungen von diesem Mittelwert sind auf Meßfehler zurückzuführen.

Löst man die Gleichung für die Beschleunigung nach v auf, so erhält man

$$\boxed{v = a \cdot t}\,.$$

Diese Beziehung nennt man das **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz** der gleichmäßig beschleunigten Bewegung.

Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Geschwindigkeit gleich dem Produkt aus der Beschleunigung und der Zeit.

4. Das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung. Aus der Versuchsreihe kann noch eine weitere gesetzmäßige Beziehung zwischen dem Weg und der Zeit abgeleitet werden. Zeichnet man auf Grund der gefundenen Werte das Weg-Zeit-Diagramm, so erhält man die in Abbildung **155**/1 wiedergegebene Kurve. Sie hat die Form einer Parabel. Daraus folgt, daß *der von der Kugel zurückgelegte Weg nicht der Zeit, sondern dem Quadrat der Zeit propor-*

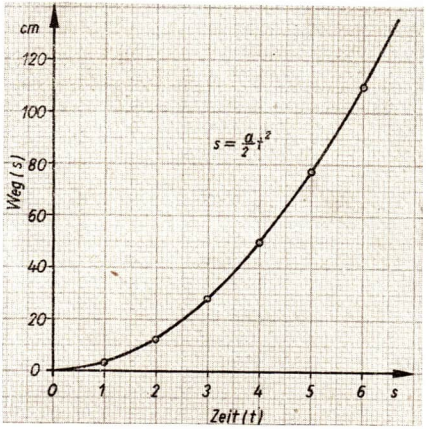


Abb. **155**/1. Weg-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

tional ist. Diese Folgerung wird dadurch bestätigt, daß man annähernd einen konstanten Wert erhält, wenn man den Quotienten aus dem Weg s und dem Quadrat der Zeit t bildet. Es ergibt sich im Mittel der Zahlenwert 3,07. Bezeichnet man diese Konstante mit b und untersucht ihre Maßeinheit, so ergibt sich $m \cdot s^{-2}$. Somit hat b die gleiche Maßeinheit wie die Beschleunigung. Ein Vergleich der aus dem Versuch gewonnenen Zahlenwerte für b und a zeigt, daß

$$b = \frac{a}{2}$$

ist. Setzt man in die Gleichung

$$\frac{s}{t^2} = b$$

für b den Wert $\frac{a}{2}$ ein, so erhält man

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

folglich

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

Man bezeichnet diese Beziehung als das **Weg-Zeit-Gesetz** der gleichmäßig beschleunigten Bewegung.

Bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist der Weg gleich dem halben Produkt aus der Beschleunigung und dem Quadrat der benötigten Zeit.

5. Die Anwendung der Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung. Mit Hilfe der Gesetze für die gleichförmige und die gleichmäßig beschleunigte Bewegung können viele Aufgaben gelöst werden, die sich beispielsweise aus der *Bewegung von Fahrzeugen* im Straßenverkehr ergeben.

Ein verantwortungsbewußter Kraftfahrer versucht nie, mit seinem Fahrzeug Geschwindigkeitsrekorde aufzustellen und durch seine Raserei sich und andere zu gefährden. Er wird ferner stets bemüht sein, eine bestimmte Geschwindigkeit einzuhalten, die für sein Fahrzeug hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs besonders günstig ist. Der Kraftfahrer wird daher versuchen, diese Geschwindigkeit nach dem Bremsen oder Anhalten möglichst schnell wieder zu erreichen. Er muß deshalb die mittlere Beschleunigung kennen, die der Motor seinem Fahrzeug beim Anfahren erteilen kann. Bei dem heutigen starken Straßenverkehr sind nicht die großen Spitzengeschwindigkeiten, sondern ein gutes *Beschleunigungsvermögen* von besonderer Wichtigkeit.

Zur Bestimmung der mittleren Beschleunigung eines Motorrades muß man den Weg und die auf diesem Weg erreichte Geschwindigkeit messen. Bei einem derartigen Versuch wurde nach einer Fahrtstrecke von 20 m am *Geschwindigkeitsmesser* eine Geschwindigkeit von $36\ km \cdot h^{-1} = 10\ m \cdot s^{-1}$ abgelesen. Somit sind der Weg s und die Geschwindigkeit v bekannt, während die Beschleunigung a und die Zeit t, in der die Geschwindigkeit erreicht wurde, unbekannt sind.

In den beiden Gleichungen

$$t = \frac{v}{a} \quad \text{und} \quad s = \frac{a}{2} \cdot t^2$$

sind jeweils zwei Größen unbekannt. Setzt man die erste Gleichung in die zweite ein, so erhält man

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

In der Gleichung ist nur noch eine Unbekannte, nämlich die Beschleunigung a, enthalten. Multipliziert man diese Gleichung mit $\frac{a}{s}$, so ergibt sich

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

Setzt man in diese Gleichung die für v und s gefundenen Werte ein, so erhält man

$$a = \frac{10^2}{2 \cdot 20} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{m}} = 2{,}5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

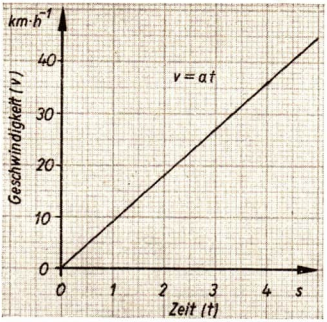


Abb. **157**/1. Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm eines Motorrades

Mit Hilfe dieses Wertes für die Beschleunigung kann man unter Verwendung der Gleichung $t = \frac{v}{a}$ die Zeit, in der die Beschleunigung erfolgt, bestimmen. Man erhält $t = 4$ s. Somit erreicht das Motorrad auf einer Strecke von 20 m und in einer Zeit von 4 s eine Geschwindigkeit von 36 km · h^{-1} (Abb. **157**/1).

6. Fragen und Aufgaben:

1. Untersuchen Sie an verschiedenen Beispielen, welche Kräfte die Bewegungen von Fahrzeugen und Menschen beschleunigen bzw. verzögern!
2. Sie messen bei einem anfahrenden Eisenbahnzug die Wegstrecken, die der Zug vom Beginn der Fahrt an zurücklegt und die dazugehörigen Zeiten. Wie können Sie feststellen, ob die Antriebskraft während der Beobachtungszeit nahezu konstant war oder nicht?
3. Ein Radfahrer legt auf einer glatten, gleichmäßig abfallenden Straße, ohne zu treten, vom Beginn der Fahrt in 20 s eine Strecke von 100 m zurück. Welche Geschwindigkeit würde er nach insgesamt 225 m erlangen, wenn er nicht bremsen würde?

27. Der freie Fall

1. Der freie Fall als gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Auf alle Körper an der Erdoberfläche wirkt die Schwerkraft. Ist sie die einzige wirkende Kraft und kann sich der Körper frei in Richtung zum Erdmittelpunkt bewegen, so bezeichnet man diesen Vorgang als **freien Fall**. Er kann jedoch nur angenähert erreicht werden, da im allgemeinen der Luftwiderstand als zusätzliche Kraft auf den Körper einwirkt. Daher können die Gesetze des freien Falles nur auf solche Körper angewendet werden, bei denen auf Grund ihrer Form und ihres Gewichts *der Luftwiderstand vernachlässigt werden kann.*

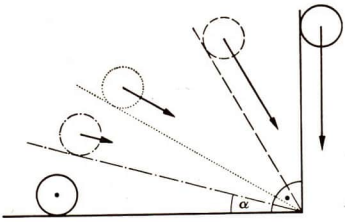


Abb. **158/1** Beträgt der Neigungswinkel der schiefen Ebene 90°, so fällt der Körper frei.

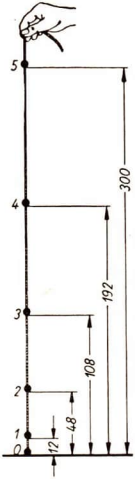


Abb. **158/2** Fallschnur

Jede Bewegung entlang einer schiefen Ebene ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Je größer die *Neigung einer schiefen Ebene* ist, um so größer ist auch die Beschleunigung eines auf ihr herabrollenden Körpers. Die Beschleunigung erreicht ihren größten Wert, wenn die schiefe Ebene eine Neigung von 90° hat. Die Bewegung auf der schiefen Ebene geht dann in den freien Fall über (Abb. **158**/1).

Mit Hilfe der in Abbildung **158**/2 wiedergegebenen *Fallschnur* kann nachgewiesen werden, daß auch *der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist.* Die Schnur wird so gehalten, daß die unterste Kugel den Fußboden berührt. Verhalten sich die Abstände der Kugeln vom Fußboden wie 1 : 4 : 9 : 16 : 25, so schlagen die Kugeln nach dem Loslassen in gleichen Zeitabständen auf. Die Strecken, die die Kugeln durchfallen, sind dem Quadrat der benötigten Zeit proportional. Sie verhalten sich somit wie $1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2 : 5^2$. Das ist aber die Bedingung einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung; denn nach dem Weg-Zeit-Gesetz ist $s \sim t^2$.

Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

2. Die Fallgesetze. Durch Versuche mit verschiedenen frei fallenden Körpern zeigte sich, daß ein Körper beim freien Fall in der ersten Sekunde ungefähr 5 m zurücklegt. Beträgt die Fallzeit 2 s, so fällt der Körper etwa 20 m. Auch bei Versuchen mit anderen Körpern, bei denen der Luftwiderstand vernachlässigt werden kann, ergaben sich für gleiche Fallzeiten gleiche Fallstrecken. Daraus folgt: *Alle Körper fallen gleich schnell.* Bei Körpern mit großem Luftwiderstand sind die in bestimmten Zeiten durchfallenen Wege kleiner.

Die Ursache dafür, daß alle Körper gleich schnell fallen, ist die auf alle Körper wirkende Schwerkraft. Durch sie wird eine konstante Beschleunigung erreicht. Diese Beschleunigung wird **Fallbeschleunigung** genannt.

Die Fallbeschleunigung ist vom Gewicht und vom Stoff des fallenden Körpers unabhängig.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß man nur dann vom freien Fall sprechen kann, wenn alle außer der Schwerkraft auftretenden Kräfte, wie der Luftwiderstand und der Auftrieb, vernachlässigt werden können. In vielen Fällen kann aber der

Luftwiderstand und der Auftrieb nicht vernachlässigt werden. Bei solchen Bewegungen wird die Beschleunigung des fallenden Körpers wesentlich vermindert. Ein Blatt Papier oder eine Vogelfeder fällt infolge des großen Luftwiderstandes nur langsam. Das gleiche gilt für einen mit Luft gefüllten Ballon, bei dem zum Luftwiderstand noch ein großer Auftrieb hinzukommt.

Die Wirkung des Luftwiderstandes wird beim *Fallschirmspringen* ausgenutzt. Durch die besondere Form des Fallschirmes wird ein großer Luftwiderstand erreicht, so daß der Springer mit annähernd konstanter Geschwindigkeit auf die Erde sinkt.

Beseitigt man die Luft als Ursache des Auftriebs und des Luftwiderstandes, so unterliegen auch leichte Körper, wie Federn und Papier, nur der Fallbeschleunigung. Einen solchen Zustand erreicht man in einer *Fallröhre*, in der die Luft stark verdünnt werden kann. Läßt man in der Fallröhre eine Bleikugel, eine Feder und ein Stück Papier zur gleichen Zeit fallen, so erreichen alle drei Körper das andere Ende der Röhre in der gleichen Zeit (Abb. **159**/1). Alle Körper fallen mit der gleichen Geschwindigkeit.

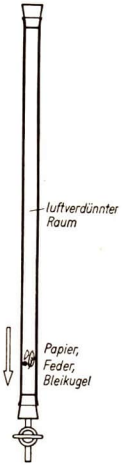


Abb. **159**/1 Fallröhre

Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell.

Im Mittelalter war die Meinung weit verbreitet, daß schwere Körper schneller fallen als leichte. Es ist das Verdienst des bedeutenden italienischen Naturforschers *Galileo Galilei*, daß er als erster diese irrtümliche Annahme widerlegte. Bis dahin war es üblich, neue wissenschaftliche Erkenntnisse allein auf Grund theoretischer Überlegungen zu gewinnen. Er begnügte sich aber nicht damit, einfach das zu übernehmen, was andere auf Grund von Überlegungen gefunden hatten. Er führte genaue Versuche durch und wertete sie gründlich aus. *Galilei* kam dadurch zu wesentlichen neuen Erkenntnissen. Auf Grund seiner systematischen experimentellen Arbeit kann Galilei als der Begründer der *Experimentalphysik* angesehen werden.

Galilei untersuchte zunächst die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung mit Hilfe der schiefen Ebene. Diese Arbeit ließ ihn auch die Vorgänge beim freien Fall genauer untersuchen. So führte er am schiefen Turm von Pisa Fallversuche durch.

Die Fallbeschleunigung wird mit dem Buchstaben g bezeichnet. Durch Berücksichtigen der Fallbeschleunigung g anstelle der allgemeinen Beschleunigung a in den Gesetzen der gleichmäßig beschleunigten Bewegung erhält man die *Fallgesetze*:

Weg-Zeit-Gesetz des freien Falles: $\boxed{s = \frac{g}{2} \cdot t^2}$;

Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz des freien Falles: $\boxed{v = g \cdot t}$;

Geschwindigkeit-Weg-Gesetz des freien Falles: $\boxed{v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}}$.

3. Die Fallbeschleunigung. Die Fallbeschleunigung kann experimentell mit Hilfe von Fallversuchen ermittelt werden. Man mißt zu diesem Zweck die Zeit, in der ein frei fallender Körper eine bestimmte Strecke durchfällt. Wird der Luftwiderstand hierbei nicht berücksichtigt, so erhält man nur angenäherte Werte. Versuche haben ergeben, daß die Fallbeschleunigung den Wert

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

hat.

Da die Ursache der Fallbeschleunigung die Schwerkraft ist, hat die Fallbeschleunigung an verschiedenen Orten der Erde unterschiedliche Werte. So wie die Schwerkraft vom Äquator zum Pol zunimmt, wird auch die Fallbeschleunigung vom Äquator zum Pol hin größer. Sehr genau durchgeführte Versuche haben ergeben, daß die Fallbeschleunigung für den Äquator, den 50. Breitengrad und den Pol in Meeresspiegelhöhe die Werte

$$g_0 = 9{,}78049\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2},$$
$$g_{50} = 9{,}81079\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2},$$
$$g_{90} = 9{,}83221\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$$

haben.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Leiten Sie das Geschwindigkeit-Weg-Gesetz des freien Falles aus den beiden anderen Gesetzen ab, indem Sie die Gleichung für v nach t auflösen und diesen Wert in das Weg-Zeit-Gesetz einsetzen!
2. Bei einer Feuerwehrübung springt ein Mann aus dem 3. Stock eines Gebäudes ($h = 12$ m) in das Sprungtuch. Wie lange dauert der Fall und mit welcher Geschwindigkeit trifft der Mann auf? Was ist zu den berechneten Werten zu sagen?
3. Berechnen Sie die Fallgeschwindigkeit für eine Höhe von 10 m, 40 m und 90 m und geben Sie eine proportionale Beziehung zwischen v und s an!

28. Zusammengesetzte Bewegungen

1. Der Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen. Häufig führt ein Körper zwei Bewegungen gleichzeitig aus. Geht man beispielsweise auf einem fahrenden Schiff von der einen Schiffsseite zur anderen, so setzt sich die Bewegung relativ zum Schiff mit der Schiffsbewegung zu einer resultierenden Bewegung zusammen. *Die beiden Bewegungen überlagern sich, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.* Man würde den Endpunkt der zusammenge-

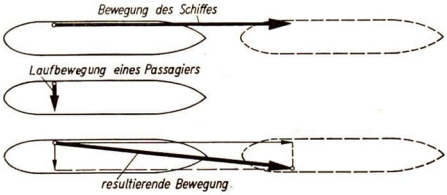


Abb. **160**/1. Zusammensetzung zweier Bewegungen

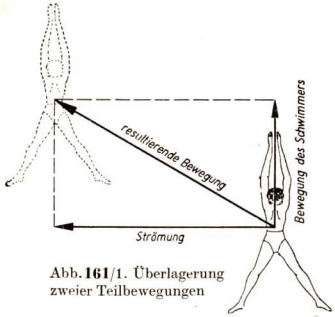


Abb. **161**/1. Überlagerung zweier Teilbewegungen

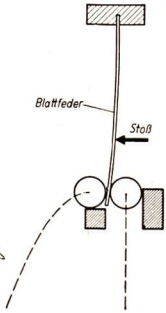


Abb. **161**/2. Wurfapparat
Die Blattfeder hält bis zum Wurf die senkrecht fallende Kugel fest.

setzten Bewegung auch dadurch erreichen, daß man die beiden Bewegungen hintereinander ausführt (Abb. **160**/1). Dabei ist es gleichgültig, welcher Weg zuerst zurückgelegt wird.

Auch die resultierende Bewegung, die ein den Fluß überquerender Schwimmer ausführt, läßt sich mit Hilfe des Parallelogramms der Wege bestimmen (Abbildung **161**/1).

Die *Unabhängigkeit der einzelnen Bewegungen* kann mit der in Abbildung **161**/2 wiedergegebenen Versuchsanordnung nachgewiesen werden. Wird die eine Kugel waagerecht geworfen, während eine zweite gleichzeitig frei fällt, so schlagen beide Kugeln im gleichen Zeitpunkt auf den Boden auf. Daraus folgt, daß die senkrechte Fallbewegung durch die überlagerte waagerechte Bewegung nicht gestört wird. Die Fallzeit bleibt die gleiche.

Durch ähnliche Versuche kam der englische Physiker *Isaac Newton* zu dem **Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen.**

Führt ein Körper mehrere Bewegungen gleichzeitig aus, so überlagern sich die Teilbewegungen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

2. Der Wurf. Die Bewegung eines geworfenen Körpers, beispielsweise eines Balles, setzt sich aus zwei *Teilbewegungen* zusammen. Der Ball bekommt beim Abwurf eine bestimmte *Anfangsgeschwindigkeit* (v_0) und führt infolgedessen eine gleichförmige Bewegung aus. Der Ball fällt aber gleichzeitig infolge der Schwerkraft. Diese beiden Bewegungen überlagern sich zu einer resultierenden Bewegung. Ihre Form ist davon abhängig, ob der Wurf *waagerecht*, *schief* oder *senkrecht* erfolgt.

a) Der waagerechte Wurf. Der *waagerechte Wurf* setzt sich aus einer gleichförmigen Bewegung in waagerechter Richtung und der senkrechten Fallbewegung zusammen. Zur Untersuchung der Bahnkurve verwendet man ein rechtwinkliges Koordinatensystem. Die Richtung der Abszisse stimmt mit der Wurfrichtung und die der negativen Ordinate mit der Richtung des freien Falles überein. Für die gleichförmige Bewegung ergibt sich die Gleichung

$$x = v_0 \cdot t.$$

Da die Fallbewegung in Richtung der negativen Ordinate vor sich geht, gilt die Gleichung

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

Die resultierende Bewegung ist eine *Parabel* (Abb. **162**/1).

Mit Hilfe der beiden oben genannten Gleichungen kann man die Koordinaten jedes Bahnpunktes ermitteln, indem man für t die entsprechenden Werte einsetzt. In der folgenden Tabelle sind Werte für x und y jeweils nach 1, 2, 3, 4 und 5 Sekunden angegeben. Die sich aus diesen Koordinaten ergebende Kurve ist in Abb. **162**/2 wiedergegeben.

Die Bahnkoordinaten eines waagerechten Wurfes

($v_0 = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$)

Zeit (t) s	Horizontaler Weg (x) m	Fallweg (y) m
1	20	− 5
2	40	−20
3	60	−45
4	80	−80
5	100	−125

Löst man die Gleichung

$$x = v_0 \cdot t$$

nach t auf, so ergibt sich

$$t = \frac{x}{v_0}.$$

Diesen Wert setzt man in die Gleichung

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

ein:

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

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

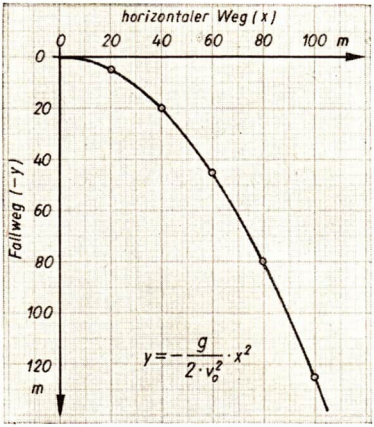


Abb. **162**/1. Die Wurfbahn eines waagerecht geworfenen Körpers

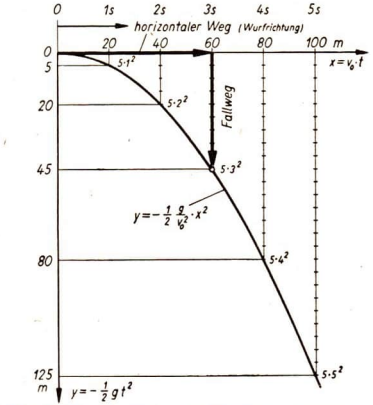


Abb. **162**/2. Ermittlung der Wurfbahn eines waagerecht geworfenen Körpers

Man bezeichnet die so gewonnene Gleichung als *Bahngleichung eines waagerecht geworfenen Körpers*. Es ist die Gleichung einer Parabel.

Die *Flugdauer* t_h des Körpers ist gleich der Zeit, die er zum Durchfallen der Strecke s_h benötigt. Setzt man diesen Wert in die Gleichung $s = \frac{g}{2} \cdot t^2$ ein, so ergibt sich

$$s_h = \frac{g}{2} \cdot t_h^2 .$$

Folglich ist

$$\boxed{t_h = \sqrt{\frac{2 \cdot s_h}{g}}} .$$

Ist die Flugdauer bekannt, so ergibt sich die *Wurfweite* aus der Gleichung für die gleichförmige Bewegung:

$$\boxed{s_w = v_0 \cdot t_h} .$$

Werden bei einem Wurf die Wurfweite und die Flugdauer gemessen, so hat man die notwendigen Meßwerte, um die Anfangsgeschwindigkeit zu berechnen. Sie ergibt sich aus der Gleichung

$$v_0 = \frac{s_w}{t_h} .$$

Die Versorgung von Expeditionsmitgliedern in unwegsamen Gegenden kann oftmals nur aus der Luft erfolgen. Beispielsweise können Lebensmittel, Brennstoffe, Kleidungsstücke oder andere gegen Stoß nicht empfindliche Gegenstände vom Flugzeug ohne Fallschirm abgeworfen werden. Fliegt das Flugzeug den Stützpunkt der Expedition in waagerechter Richtung an, so ist der Abwurf einer solchen *Versorgungsbombe* ein waagerechter Wurf. Die Bombe hat im Moment des Auslösens vom Flugzeug die Anfangsgeschwindigkeit v_0 in horizontaler Richtung, die mit der Flugzeuggeschwindigkeit übereinstimmt. Die Fallzeit t_h ergibt sich aus der Höhe des Flugzeuges über dem Erdboden nach der Gleichung

$$t_h = \sqrt{\frac{2 \cdot s_h}{g}} .$$

Daraus folgt für die Wurfweite

$$s_w = v_0 \cdot t_h = v_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s_h}{g}} .$$

Der Pilot kann somit den Punkt auf der Erdoberfläche genau bestimmen, über dem er die Bombe abwerfen muß, damit diese die von den Expeditionsmitgliedern markierte Stelle erreicht und dort geborgen werden kann.

Auf ähnliche Weise werden auch Schiffbrüchige durch den Abwurf von zusammengelegten Schlauchbooten, die mit Druckluftflaschen verbunden sind, aus Seenot gerettet. Durch den Stoß beim Aufschlagen des Bootes auf das Wasser wird das Ventil der Druckluftflasche geöffnet und das Schlauchboot aufgeblasen.

b) Der schiefe Wurf. Wird der Körper nicht horizontal, sondern unter einem beliebigen Winkel gegenüber der Horizontalen geworfen, so spricht man von einem *schiefen Wurf*. Den Winkel zwischen der Wurfrichtung und der Horizontalen bezeichnet man als *Neigungswinkel* α (Abb. **164**/1).

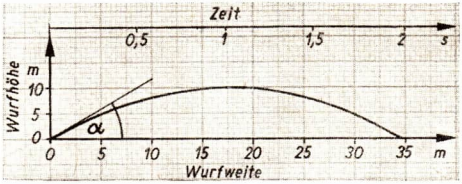


Abb. **164**/1. Wurfkurve beim schiefen Wurf

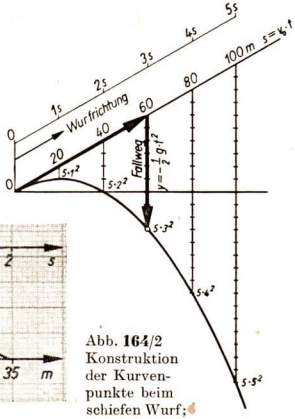


Abb. **164**/2 Konstruktion der Kurvenpunkte beim schiefen Wurf; $v_0 = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $\alpha = 30°$

Auch beim schiefen Wurf handelt es sich um eine resultierende Bewegung. Sie setzt sich aus einer gleichförmigen Bewegung und der gleichmäßig beschleunigten Fallbewegung zusammen. Die einzelnen Bahnpunkte kann man ähnlich wie beim waagerechten Wurf finden, indem man die Bewegungen für bestimmte Zeitabschnitte nacheinander betrachtet. In der Abbildung **164**/2 ist nach diesem Verfahren die Wurfbahn konstruiert worden. Zur Konstruktion können die Werte der Tabelle auf S. 162 verwendet werden. Die Bahn beim schiefen Wurf ist wie beim waagerechten Wurf eine Parabel; aber ihre Achse fällt nicht mehr mit der y-Achse zusammen, sondern verläuft parallel zu ihr.

Die Bahn beim schiefen Wurf kann mit Hilfe eines Wasserstrahles veranschaulicht werden (Abb. **164**/3). Untersucht man die Wurfweite und die Steighöhe in Abhängigkeit vom Neigungswinkel, so kommt man zu folgenden Ergebnissen:

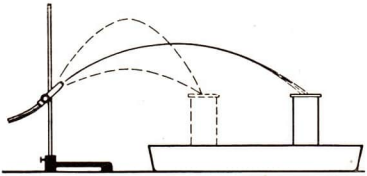


Abb. **164**/3. Veranschaulichung der Wurflinie mit Hilfe eines Wasserstrahles. Das Strahlrohr läßt sich so drehen, daß man den Neigungswinkel ändern kann.

1. *Die Weite des Wurfes und die Steighöhe sind vom Neigungswinkel abhängig.*
2. *Erfolgen zwei Würfe unter Neigungswinkeln, die sich zu 90° ergänzen, so ergeben sich gleiche Wurfweiten.*
3. *Die größte Wurfweite erhält man bei einem Neigungswinkel von 45°.*
4. *Die größte Steighöhe ergibt sich bei einem Neigungswinkel von 90°.*

Für den schiefen Wurf lassen sich ähnliche Gesetze aufstellen wie für den waagerechten Wurf.

Wie Messungen und Beobachtungen ergaben, gelten die Gesetze des schiefen Wurfes nur dann genau, wenn außer der Schwerkraft keine weitere Kraft die Bewegung des Wurfkörpers beeinflußt.

Der die Bewegung hemmende Luftwiderstand verursacht eine Abweichung der Bewegungsbahn des geworfenen Körpers von der Wurfparabel. Man bezeichnet die Wurfbahn eines Körpers unter Berücksichtigung des Luftwiderstands als *ballistische Kurve* (Abb. **165**/1). Da der Luftwiderstand durch Vergrößern der Bahngeschwindigkeit des Wurfkörpers sehr stark anwächst, ist die Ermittlung der ballistischen Kurve für Geschosse von großer Bedeutung. Die Wurfweiten der Geschosse werden bei unterschiedlichem Neigungswinkel des Geschützrohres empirisch ermittelt.

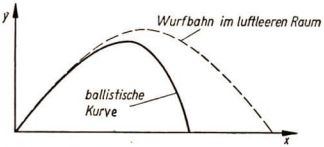


Abb. **165**/1. Ballistische Kurve

Weitere Bahnabweichungen treten dadurch auf, daß man die Geschosse bei ihrer Bewegung im Geschützrohr in schnelle Umdrehung versetzt. Dadurch wird ein Überschlagen der Geschosse vermieden.

c) Der senkrechte Wurf. Beim *senkrechten Wurf nach oben* liegen die die beiden Bewegungen verursachenden Kräfte auf der gleichen Wirkungslinie, haben aber entgegengesetzte Richtung. Der in der Zeit t zurückgelegte Weg s ergibt sich als Summe der beiden Teilbewegungen, wobei für die Fallbewegung ein negatives Vorzeichen eingesetzt wird. Es gilt daher für den Weg und die Geschwindigkeit:

$$\boxed{s = v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2}, \qquad \boxed{v = v_0 - g \cdot t}.$$

Beim senkrechten Wurf nach oben verringert sich die Geschwindigkeit des geworfenen Körpers, bis er schließlich seinen höchsten Punkt, den *Umkehrpunkt*, erreicht hat. In diesem Punkt ist die Geschwindigkeit gleich Null. Der Körper ändert nunmehr seine Bewegungsrichtung, es erfolgt ein freier Fall. Auf Grund dieser Tatsache kann man die Steigzeit t_h berechnen. Es gilt die Gleichung

$$t_h = \frac{v_0}{g}.$$

Setzt man diesen Wert in die Gleichung für den Weg ein, so erhält man die Steighöhe

$$s_h = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Nach dem senkrechten Wurf kommt der Körper schließlich wieder nach der Zeit $\bar{t}$ beim Ausgangspunkt an. Die Wurfweite s ist also Null. Somit gilt die Gleichung

$$v_0 \cdot \bar{t} - \frac{g}{2} \cdot \bar{t}^2 = 0,$$

wobei $\bar{t}$ die Summe aus der Steigzeit und der Fallzeit ist. Aus dieser Gleichung läßt sich $\bar{t}$ berechnen. Man erhält für $\bar{t}$ zwei Werte, da es sich um eine quadratische Gleichung handelt. Der eine Wert, $\bar{t}_1 = 0$, bedeutet den Zeitpunkt des Abwurfes. Der zweite Wert ist

$$\bar{t}_2 = 2\frac{v_0}{g}.$$

Die Gesamtzeit für Steigen und Fallen ist gleich der doppelten Steigzeit, das heißt, der Körper braucht zum Steigen und Fallen die gleiche Zeit.

$$\boxed{t = \frac{v_0}{g}}$$

Beim senkrechten Wurf nach oben ist die Steigzeit gleich der Fallzeit.

Für den *senkrechten Wurf nach unten* gelten entsprechende Gleichungen:

$$\boxed{s = -v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2.}, \qquad \boxed{v = -v_0 - g \cdot t.}$$

3. Fragen und Aufgaben:

1. In Abbildung **166**/1 ist ein Laufkran mit Laufkatze in zwei Stellungen schematisch dargestellt. Erklären Sie, wie sich der Weg der an der Laufkatze hängenden Last ergibt!
2. Begründen Sie, warum die Flugdauer beim waagerechten Wurf nicht von der Anfangsgeschwindigkeit abhängt!
3. Berechnen Sie die Steigzeit beim senkrechten Wurf nach oben, indem Sie in der entsprechenden Gleichung für v den Wert 0 setzen! Wie kann man aus der Gesamtheit für Steigen und Fallen die Anfangsgeschwindigkeit berechnen (Beispiel: Steigzeit = 2,5 s)?

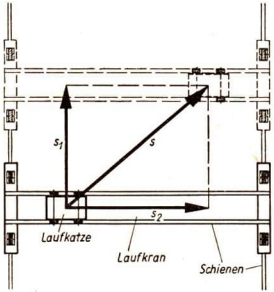


Abb. **166**/1

29. Die Bewegung gegen hemmende Kräfte

1. Der Widerstand des Mittels. Bei allen Bewegungen, beispielsweise beim freien Fall und beim Wurf, treten Kräfte auf, die *der Bewegung entgegen wirken.* Eine dieser Gegenkräfte ist der **Widerstand des Mittels.** Wie die Versuche mit der Fallröhre zeigen, fallen alle Körper gleich schnell, wenn das Mittel, in diesem Falle die Luft, nicht mehr vorhanden ist. Somit ist *der Luftwiderstand eine Gegenkraft zu der die Bewegung verursachenden Kraft.* Seine hemmende Wirkung ist von der *Form,* der *Größe* und dem *Gewicht des Körpers* abhängig. So werden ein Blatt Papier und eine Vogelfeder wesentlich stärker gebremst als ein Stein oder eine

Bleikugel. Der Luftwiderstand ist dann besonders groß, wenn *der Körper im Verhältnis zu seinem Gewicht eine sehr große Oberfläche hat.*

2. Der Fallschirmsprung. Ein *Fallschirmspringer* legt den ersten Teil der Fallstrecke meist im freien Fall zurück, ehe der Fallschirm sich öffnet. Fallschirmspringer, die aus sehr großen Höhen abspringen, lassen sich meist mehrere tausend Meter mit ungeöffnetem Fallschirm fallen und öffnen ihn erst wenige hundert Meter über der Erdoberfläche.

Ein solcher Fallschirmspringer legt in der ersten Sekunde eine Strecke von ungefähr 4,9 m zurück. Die Geschwindigkeit nimmt aber in den nächsten Sekunden nicht so stark zu, wie es nach den Gesetzen des freien Falles zu erwarten wäre, da die Beschleunigung des Fallschirmspringers geringer wird. Auf Grund des Fallgesetzes müßte er in 10 s eine Strecke von 490 m durchfallen. Durch die Einwirkung des Luftwiderstandes sind es aber nur etwa 400 m. Man hat auf Grund von Beobachtungen festgestellt, daß die in der 11., 12. und jeder folgenden Sekunde durchfallenen Strecken nahezu gleich sind. *Die beschleunigte Bewegung ist in eine annähernd konstante Bewegung übergegangen.* Mit zunehmender Geschwindigkeit des Fallschirmspringers wird nämlich der Luftwiderstand immer größer. Der Betrag des Luftwiderstandes wird schließlich gleich dem Betrage der Schwerkraft. Da aber beide Kräfte entgegengesetzt gerichtet sind, wird die resultierende Kraft Null. Somit wird auch die Beschleunigung gleich Null. Der Körper sinkt dann mit einer bestimmten Geschwindigkeit, der *Sinkgeschwindigkeit.* Ein Fallschirmspringer erreicht bei geschlossenem Fallschirm eine maximale Geschwindigkeit von ungefähr 55 $m \cdot s^{-1}$, das sind etwa 198 $km \cdot h^{-1}$.

Wird der Fallschirm geöffnet, so steigt der Luftwiderstand sehr stark an. Die Sinkgeschwindigkeit wird von 55 $m \cdot s^{-1}$ auf etwa 4 $m \cdot s^{-1}$ verzögert (Abbildung **167**/1), das heißt, *beim Öffnen des Fallschirmes tritt eine negative Beschleunigung auf.* Der Luftwiderstand des Fallschirmes und des Menschen ist bei einer Sinkgeschwindigkeit von 55 $m \cdot s^{-1}$ größer als ihr Gewicht. Mit abnehmender Geschwindigkeit verkleinert sich jedoch sehr schnell der

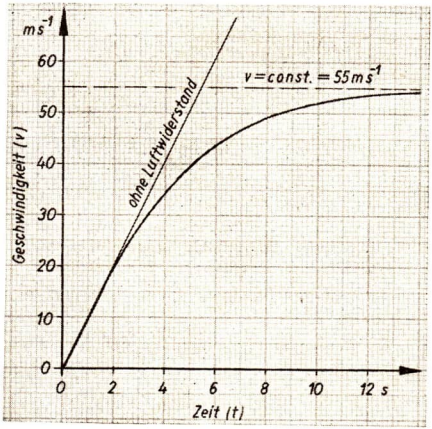


Abb. **167**/1. Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm beim Fallschirmabsprung aus großen Höhen

Luftwiderstand, bis er schließlich ebenso groß wie die Schwerkraft ist. Jetzt bewegt sich der Fallschirmspringer mit konstanter Geschwindigkeit ($v \sim 4\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$).

3. Die Reibung. Fährt ein Auto oder ein anderes Fahrzeug auf ebener Bahn, so tritt eine weitere, die Bewegung hemmende Kraft auf. Die Ursache für diese Kraft ist die **Reibung**. Daher bezeichnet man diese Kräfte als **Reibungskräfte** oder als **Reibungswiderstände**.

Reibung tritt immer auf, wenn sich zwei Körper berühren und gegeneinander bewegen. Je nachdem, ob die Körper aneinander vorbeigleiten oder der eine Körper auf dem anderen abrollt, unterscheidet man die *Gleitreibung* und die *Rollreibung*. Die Reibung ist nicht nur auf die Unebenheiten der Oberflächen zurückzuführen, sondern auch auf die Kraft, mit der die beiden Körper aneinander haften, die *Adhäsionskraft*.

Die Reibungskraft tritt bei der entgegengesetzten Richtung zweier sich berührender Körper auf. Sie hemmt die Bewegung der Körper.

Gibt man einem Körper mit glatter Grundfläche auf einer waagerechten Ebene, etwa einem Schlitten auf einer Schneefläche, einen Stoß, so gleitet er auf dieser Ebene entlang. Er kommt aber bald wieder zur Ruhe, da infolge der Reibung seine Bewegung verzögert wird. Ohne Reibung würde sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit weiter bewegen.

Zur *Bestimmung des Reibungswiderstandes* mißt man die Kraft, durch die die gleichförmige Bewegung eines Körpers aufrecht erhalten wird. Sie hat den gleichen Betrag wie die Reibungskraft, ist ihr aber entgegengesetzt gerichtet (Abb. **168**/1). Mit verschiedenartigen Körpern durchgeführte Versuche zeigen, daß *die Größe der Reibung vom Stoff und von der Beschaffenheit der Oberfläche des Körpers abhängig ist.* Mißt man die Reibungskräfte für die größte, die mittlere und die kleinste Fläche eines Quaders, so erhält man gleiche Werte. *Die Reibung ist unabhängig von der Größe der Fläche.*

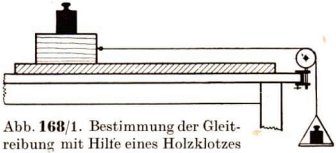


Abb. **168**/1. Bestimmung der Gleitreibung mit Hilfe eines Holzklotzes

Der Reibungswiderstand ist vom Stoff und von der Oberfläche des Körpers abhängig. Bei gleichem Gewicht ist er von der Größe der sich berührenden Flächen unabhängig.

Wird das senkrecht auf die Berührungsfläche wirkende Gewicht des Quaders, die Normalkraft F_N, vervielfacht, so vergrößert sich die Reibungskraft im gleichen Verhältnis.

$$R \sim F_N.$$

Der Reibungswiderstand ist der Normalkraft proportional.

Will man von dieser Proportion zur Gleichung übergehen, so muß man einen Proportionalitätsfaktor einfügen. Er wird mit μ bezeichnet und *Reibungskoeffizient*, auch *Reibungszahl* genannt. Der Reibungskoeffizient ist eine Materialkonstante. Durch ihn werden der Stoff und die Beschaffenheit der Oberfläche erfaßt.

$$\boxed{R = \mu \cdot F_N}\,.$$

Man bezeichnet das durch diese Gleichung wiedergegebene Gesetz als *Reibungsgesetz.*

Wird ein in Ruhe befindlicher Körper in Bewegung gesetzt, so muß zunächst die *Haftreibung* überwunden werden. Sie ist immer größer als die bei der Bewegung auftretende Gleitreibung. Die in Ruhe befindlichen Flächen berühren sich inniger, so daß die Adhäsionskraft größer ist. In der nebenstehenden Tabelle sind einige Haft- und Gleitreibungszahlen zusammengestellt.

Haft- und Gleitreibungszahlen

Werkstoffe	Haftreibungszahl μ_0	Gleitreibungszahl μ
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

Wesentlich geringer als die Gleitreibung ist die *Rollreibung.* Sie ist hauptsächlich auf elastische Verformungen der beiden einander berührenden Flächen zurückzuführen (Abb. **169**/1). Beim Abrollen tritt als Gegenkraft eine Kraft $\mathfrak{F}_v$ auf, die *entgegen der Bewegungsrichtung* wirkt. Dort, wo sich der Körper von der Unterlage abhebt, tritt eine zusätzliche Kraft $\mathfrak{F}_h$ auf, die jedoch *in der Bewegungsrichtung* wirkt. Sie wird hervorgerufen durch die in die ursprüngliche Lage zurückgehenden Teile des Körpers. Diese Kraft müßte eigentlich ebenso groß sein, wie die Kraft $\mathfrak{F}_v$. Da jedoch infolge der inneren Reibung ein Teil der Kraft für die Bewegung verloren geht, ist $\mathfrak{F}_h$ stets kleiner als $\mathfrak{F}_v$. Daraus folgt, daß die hemmende Kraft überwiegt.

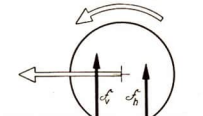


Abb. **169**/1. Rollreibung

Die nebenstehende Tabelle gibt einige Rollreibungszahlen wieder.

Rollreibungszahlen für einige Fahrzeugbereifungen

Stoffe	μ
Gummireifen auf Asphalt	0,02
Gummireifen auf Pflaster	0,05
Eisenreifen auf Asphalt	0,01
Eisenreifen auf Pflaster	0,02
Stahlreifen auf Schiene	0,006

Obwohl die Rollreibung von Eisenreifen gegenüber der Rollreibung von Gummireifen kleiner ist, werden in zunehmendem Maße auch die Fahrzeuge für die Landwirtschaft mit Gummireifen ausgestattet. Man erreicht dadurch eine bessere Federung und damit einen ruhigeren Lauf der

Wagen. Durch den immer stärkeren Einsatz von Traktoren müssen die Fahrzeuge auch mit größerer Geschwindigkeit gefahren werden können, was nur mit gummibereiften Fahrzeugen möglich ist.

4. Schädliche und nützliche Wirkungen der Reibung. Die an allen Maschinen auftretende Reibung ist meist unerwünscht. Man versucht sie auf verschiedene Weise herabzusetzen. Eine Möglichkeit ist der *Einbau von Wälzlagern*. Dadurch wird die gleitende Reibung in die wesentlich geringere Rollreibung umgewandelt. Je nach dem zu erreichenden Ziel verwendet man *Kugellager*, *Walzenlager*, *Nadellager* oder *Tonnenlager*.

Außerdem wird die Reibung durch *Schmiermittel*, wie Öl, Fett und Graphit, herabgesetzt. Bei der Verwendung von Öl bildet sich zwischen den Gleitflächen eine dünne, gleichmäßig verteilte Ölschicht, der *Ölfilm*. Infolgedessen berühren sich die Flächen selbst nicht mehr. Somit ist nur noch eine Reibung zwischen den Ölteilchen möglich, so daß sich bei der Bewegung die kleinsten Teilchen des Ölfilms gegeneinander verschieben. *Diese innere Reibung zwischen den Ölteilchen ist erheblich geringer als die äußere Reibung zweier sich berührender fester Flächen.*

Schmiermittel werden aber nicht nur zum Verringern der Gleitreibung verwendet, sondern auch bei Wälzlagern. Durch sie wird die an sich bereits geringe Rollreibung noch weiter herabgesetzt.

Die Gewinnung neuer, hochwertiger Schmiermittel ist besonders im Hinblick auf die Entwicklung des Maschinenbaues eine dringliche Aufgabe. Dabei müssen synthetische Schmiermittel geschaffen werden, die den bisher verwendeten natürlichen in verschiedenen Eigenschaften, beispielsweise Hitzebeständigkeit, überlegen sind.

Es gibt auch eine Fülle nützlicher und notwendiger Auswirkungen der Reibung. So könnte niemand gehen und kein Fahrzeug fahren, wenn die Reibung nicht vorhanden wäre. Ist beispielsweise bei Glatteis die Reibung wesentlich geringer als normal, kommt es zu Schwierigkeiten in der Fortbewegung und zu Gefahren im Straßenverkehr. Die Reibung wird dann künstlich erhöht, indem man Sand streut. Ohne Reibung könnte man auch keinen Gegenstand festhalten; eingeschlagene Nägel würden in der Wand nicht festsitzen. Schließlich wäre auch keine Übertragung von Kräften durch Treibriemen möglich.

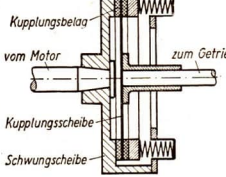


Abb. **170**/1
Einscheibenkupplung

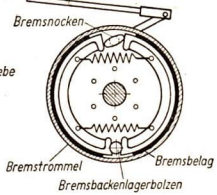


Abb. **170**/2
Innenbackenbremse

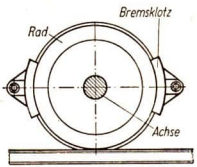


Abb. **170**/3. Klotzbremse
bei Eisenbahnwagen

Auch die *Kupplung* bei Fahrzeugmotoren beruht auf der Wirkung der Reibung. Die Kupplung dient beim Anfahren, beim Halten oder beim Schalten des Getriebes zur Verbindung beziehungsweise Trennung von Motor und Getriebe. Bei Kraftwagen ist allgemein die *trockene Einscheibenkupplung* vorherrschend (Abb. **170**/1). Eine mit der Getriebewelle fest verbundene Kupplungsscheibe steht durch Federkraft mit der Schwungscheibe des Motors infolge Reibung in Verbindung. Durch Treten des Kupplungspedals wird über ein Hebelgestänge die Kupplungsscheibe von der Schwungscheibe getrennt. Durch langsames Loslassen des Kupplungspedals kann man, beispielsweise beim Anfahren, wieder sanft einkuppeln.

Eine weitere wichtige Anwendung der Reibung sind die *Bremsen*, beispielsweise die *Innenbackenbremsen* (Abb. **170**/2). Bei ihr werden die Bremsbeläge entweder mechanisch oder hydraulisch gegen die Bremstrommel gepreßt. Infolge der dadurch entstehenden Reibung werden die Räder gebremst. Für Eisenbahnwagen verwendet man einfache *Klotzbremsen* (Abb. **170**/3). Die Bremsklötze werden pneumatisch betätigt.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Warum kann man Fallzeiten und -geschwindigkeiten eines Fallschirmspringers bei nicht geöffnetem Fallschirm nur bis etwa 400 m mit Hilfe der Fallgesetze annähernd bestimmen? Berechnen Sie die Fallzeit für 2000 m unter der Annahme, daß in 10 s 400 m in gleichförmig beschleunigter Bewegung zurückgelegt werden und daß danach die Geschwindigkeit konstant ist!
2. Wie kommt es, daß Regenwolken in der Luft schweben, obwohl sie aus Wassertröpfchen bestehen?
3. Warum fährt ein Handwagen auf einem wenig geneigten Feldweg nur dann bergab, wenn er gezogen wird? Wann rollt er ohne zusätzliche Antriebskraft?

30. Grundeigenschaften der Körper — Die Masse

1. Das Gewicht — Die gegenseitige Massenanziehung. Auf alle Körper auf der Erdoberfläche wirkt die Schwerkraft. Jeder Körper hat ein bestimmtes Gewicht. Das Gewicht ist eine Kraft und hat als Vektor eine bestimmte Richtung. Es ist zum Erdmittelpunkt gerichtet. Der Betrag des Gewichts ist von der Schwerkraft abhängig. Da sie nicht an allen Stellen der Erdoberfläche gleich groß ist, hat ein Körper auch nicht an allen Orten das gleiche Gewicht. Es ist am Äquator kleiner als am Pol. Das Gewicht nimmt außerdem mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche ab.

Die Schwerkraft und damit das Gewicht beruhen auf der gegenseitigen Anziehung aller Körper. So werden der Mond und auch die künstlichen Erdsatelliten durch die bestehende Anziehungskraft der Erde auf ihrer Bahn gehalten.

Alle Körper ziehen sich gegenseitig an.

Die sowjetische kosmische Rakete „*XXI. Parteitag*“ ist der erste, von Menschen konstruierte Körper, der den unmittelbaren Anziehungsbereich der Erde verlassen hat. Aber es besteht noch eine geringe Massenanziehung zwischen der Rakete und der Erde. Die Hauptanziehungskraft auf die Rakete wird jedoch von der Sonne ausgeübt. Daher umkreist sie die Sonne wie die Planeten unseres Sonnensystems.

2. Die Trägheit. Beim plötzlichen Anfahren eines Zuges, einer Straßenbahn oder eines anderen Fahrzeuges spürt jeder Fahrgast eine Kraftwirkung, die der Fahrtrichtung entgegengesetzt ist. Hält man sich nicht fest, so besteht die Gefahr, daß man beim Anfahren umfällt. Etwas ähnliches bemerkt man beim schnellen Halten. In diesem Fall wirkt die Kraft in Fahrtrichtung. Wenn Kurven durchfahren werden, verspürt man auch eine Kraft, die der Richtungsänderung des Fahrzeuges entgegengesetzt ist. Die Ursachen liegen darin, daß jeder Körper den augenblicklichen Bewegungszustand beizubehalten sucht. Das gilt sowohl beim Übergang aus der Ruhe in die Bewegung als auch bei allen anderen Bewegungsänderungen. Man bezeichnet die Eigenschaft der Körper, *ihren Bewegungszustand beizubehalten*, als **Trägheit.**

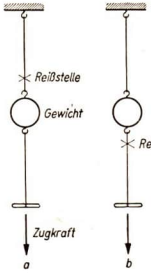


Abb. **172**/1. Nachweis der Trägheit eines Körpers

Mit der in Abbildung **172**/1 wiedergegebenen Versuchsanordnung kann die Trägheit eines Körpers nachgewiesen werden. Greift nach unten eine Kraft an, so wirkt auf den unteren Faden nur die Zugkraft F, während auf den oberen Faden außerdem das Gewicht G des Körpers wirkt. Es ist zu erwarten, daß bei genügend großer Zugkraft der obere Faden reißt. Dies tritt auch ein, wenn man die Zugkraft langsam immer stärker werden läßt. Reißt man jedoch ruckartig, so zerreißt der untere Faden. Die Kugel kann der schnellen Bewegungsänderung, nämlich aus der Ruhe in die Bewegung, nicht folgen und verbleibt in Ruhe. Auch aus diesem Versuch ergibt sich die Schlußfolgerung, daß jeder Körper eine bestimmte Trägheit hat.

Alle Körper sind träge.

Die Trägheit war bereits *Kepler* und *Galilei* bekannt, aber erst *Isaac Newton*, der bedeutendste Physiker seiner Zeit, hat *die Trägheit als eine Eigenschaft aller Körper* erkannt. Er faßte seine Erfahrungen und Erkenntnisse in dem nach ihm benannten **1. Newtonschen Prinzip** zusammen.

Jeder Körper beharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, solange die Resultierende aller einwirkenden Kräfte Null ist.

Dieses Gesetz wird auch **Trägheitssatz** beziehungsweise **Satz vom Beharrungsvermögen** genannt. Der Trägheitssatz kann nicht in der gleichen Weise bewiesen werden wie andere Gesetze. Der Zustand, daß sich ein Körper ohne Krafteinwirkung ständig gleichförmig bewegt, kann genau genommen nicht verwirklicht werden. Die gleichförmige Bewegung ist eine Abstraktion, die nie ganz erreicht wird. *Newton* kam durch die Untersuchung von Bewegungen mit sehr geringer Reibung zum Trägheitssatz. Man bezeichnet solche Sätze, die nicht unmittelbar bewiesen werden können, als **Axiome.**

3. Beispiele für Trägheitswirkungen. Würde man kurz vor dem Anhalten der Straßenbahn aussteigen, so würde man sich infolge der Trägheitskraft in Fahrtrichtung weiterbewegen und dadurch zu Fall kommen, da die Beine stärker gebremst werden als der Oberkörper. Die Nichtbeachtung dieser Wirkung hat schon

zu vielen Unfällen geführt. Daher ist es grundsätzlich verboten, aus der fahrenden Straßenbahn abzuspringen und auf die fahrende Straßenbahn aufzuspringen. Bei rechtsseitigem Aussteigen hält man sich *mit der linken Hand am linken Griff fest.* Es wird auf diese Weise erreicht, daß beim Aussteigen die Bewegungsrichtung des Fahrgastes mit der ursprünglichen Fahrtrichtung übereinstimmt.

Ein anderes Beispiel für das Wirken der Trägheit ist das Zurückschleudern des Quecksilberfadens nach dem Gebrauch des Fieberthermometers.

Wie groß die Trägheitskräfte bei einer großen Bewegungsänderung sein können, zeigt sich beim Einrammen eines Pfahles in die Erde. Die Trägheitskräfte des Fallbären treiben den Pfahl in die Erde.

Werden eine Holzkugel und eine gleich große Bleikugel auf einer ebenen Bahn jeweils mit gleicher Kraft weggestoßen, so rollt die Bleikugel nicht so weit wie die Holzkugel. Die Bleikugel wurde somit weniger beschleunigt als die Holzkugel. Die Ursache ist die unterschiedliche Trägheit beider Körper. *Sie ist durch die unterschiedliche Masse bedingt.* Die Bleikugel hat eine größere Masse als die gleich große Holzkugel und damit eine größere Trägheit. *Als ortsunabhängige Größe muß die Masse eines Körpers von seinem Gewicht unterschieden werden.*

4. Fragen und Aufgaben:

1. Warum muß bei genauen Gewichtsangaben der Ort der Messung angegeben werden, bei Massenangaben aber nicht?
2. Warum ist das Trägheitsgesetz für die Bewegung von kosmischen Raketen im Weltraum von großer Wichtigkeit? Welche Kräfte wirken auf ihre Bewegung ein?
3. Nennen Sie Beispiele dafür, wie man im Straßenverkehr die Trägheitswirkungen berücksichtigen muß, damit Unfälle vermieden werden!

31. Das Grundgesetz der Mechanik

1. Die Beschleunigung eines Körpers. Durch eine Kraft kann der Bewegungszustand eines Körpers verändert werden. Beim Anfahren oder Bremsen eines Handwagens muß man eine größere Kraft aufwenden, als wenn der Wagen auf glatter Straße in gleichförmiger Bewegung gehalten werden soll.

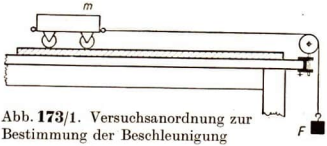


Abb. **173**/1. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Beschleunigung

Ein leicht beweglicher Wagen wird mit Hilfe eines herabsinkenden Wägestückes auf einer horizontalen Bahn in eine beschleunigte Bewegung versetzt (Abb. **173**/1). Die wirkende Kraft ist $\mathfrak{F}$. Die nach gleichen Zeitabständen zurückgelegten Wege werden bei diesem Versuch gemessen und in eine Tabelle eingetragen (vgl. auch Abb. **174**/1).

Beschleunigung eines Körpers durch eine konstante Kraft

Zeit (t) s	Meßstrecke (s) cm	Beschleunigung (a) cm · s^{-2}
1	3,1	6,2
2	12,5	6,3
3	28,0	6,2
4	48,5	6,1

Aus den Meßergebnissen folgt, daß *mit wachsender Zeit die zurückgelegten*

Strecken größer werden. Mit Hilfe des Weg-Zeit-Gesetzes kann die Beschleunigung berechnet werden. Die Ergebnisse sind in der dritten Spalte der Tabelle eingetragen. Sie zeigen, daß *die Beschleunigung, abgesehen von Meßfehlern, konstant ist.* Also handelt es sich um eine *gleichmäßig beschleunigte Bewegung.*

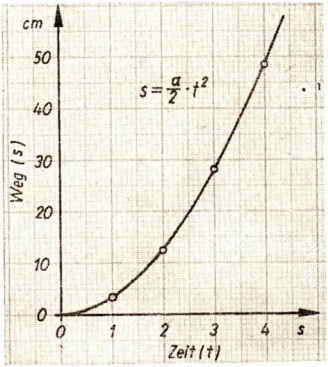


Abb. **174**/1. Weg-Zeit-Diagramm beim Einwirken einer konstanten Kraft

Ein frei beweglicher Körper wird durch eine konstante Kraft gleichmäßig beschleunigt.

2. Die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft. Zur genauen quantitativen Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung kann die in Abbildung **174**/2 wiedergegebene Versuchsanordnung benutzt werden. Da sie nur eine gut gelagerte feste Rolle hat, ist die Reibung sehr gering. Die hemmende Wirkung der Reibung kann außerdem durch eine zusätzlich wirkende Masse weitgehend aufgehoben werden. Diese Zusatzmasse muß experimentell so bestimmt werden, daß sich die Massen m_1 und m_2, wenn sie angestoßen werden, gleichförmig bewegen.

Man läßt nun auf der einen Seite eine konstante Kraft $\mathfrak{F}$ wirken, indem man die Masse m_1 durch eine Zusatzmasse vergrößert. Das Gewicht dieser Zusatzmasse ist die konstante antreibende Kraft. Damit sich während des Versuches die Gesamtmasse nicht verändert, verringert man zum Beispiel die Masse m_2 um 5 g und fügt diese Masse der Masse m_1 zu. Infolgedessen ist die rechte Masse um 10 g größer als die linke. Dadurch wirkt eine beschleunigende Kraft von 10 p. Die Gesamtmasse setzt sich aus den beiden Massen m_1 und m_2 und dem Zusatzmassenstück m_r zur Überwindung der Reibung zusammen.

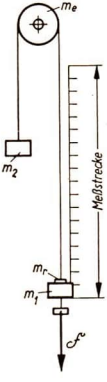


Abb. **174**/2. Versuchsanordnung zur Ableitung des Newtonschen Kraftgesetzes

Da auch die Rolle in eine beschleunigte Drehbewegung versetzt wird, muß ihre Trägheit berücksichtigt werden. Versuche haben ergeben, daß als Ersatzmasse m_e einer massiven Rolle die halbe Masse der Rolle in die Rechnung eingesetzt werden muß. Die sich insgesamt bewegende Masse setzt sich also aus vier Einzelmassen zusammen:

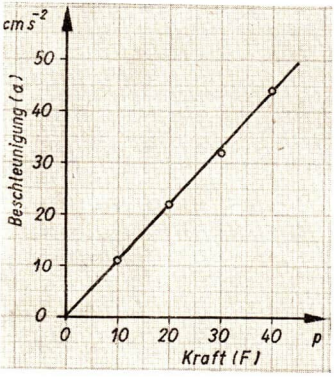
$$m = m_1 + m_2 + m_r + m_e.$$

Untersucht man die Abhängigkeit der Beschleunigung von der angreifenden Kraft bei gleichbleibender Masse, so zeigen die Versuchsergebnisse, daß *die Beschleunigung im gleichen Verhältnis wie die Kraft anwächst* (vgl. die folgende Tabelle und die Abb. **175**/1).

Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft bei konstanter Masse

Kraft (F) p	Masse (m) g	Zeit (t) s	Meßstrecke (s) cm	Beschleunigung (a) cm · c^{-2}	$\frac{a}{F}$
10	800	2	21,5	10,8	1,08
20	800	2	44,0	22,0	1,10
30	800	2	64,0	32,0	1,07
40	800	2	88,5	44,3	1,11
					1,09

Abb. **175**/1. Die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft



Der Quotient aus der Beschleunigung und der Kraft ist angenähert konstant. Daraus folgt:

Die Beschleunigung eines Körpers ist der Kraft proportional.

$$a \sim F.$$

3. Die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse. Die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse bei gleichbleibender Kraft zeigen die folgenden Meßergebnisse (vgl. auch Abb. **176**/1).

Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse bei konstanter Kraft

Kraft (F) p	Masse (m) g	Zeit (t) s	Meßstrecke (s) cm	Beschleunigung (a) cm · s^{-2}	$m \cdot a$
10	500	2	35,0	17,5	8750
10	600	2	29,0	14,5	8700
10	700	2	25,0	12,5	8750
10	800	2	21,5	10,8	8640
					8710

Je größer die mit der gleichen Kraft beschleunigte Masse ist, um so geringer ist die Beschleunigung. Da das Produkt aus Masse und Beschleunigung konstant ist, stehen Beschleunigung und Masse im umgekehrten Verhältnis.

Die Beschleunigung ist der Masse des bewegten Körpers umgekehrt proportional.

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

4. Das Newtonsche Kraftgesetz. Faßt man die bisherigen Ergebnisse

$$a \sim F \quad \text{und} \quad a \sim \frac{1}{m}$$

zusammen, so folgt

$$a \sim \frac{F}{m} \quad \text{oder} \quad F \sim m \cdot a.$$

Die Kraft ist dem Produkt aus Masse und Beschleunigung proportional.

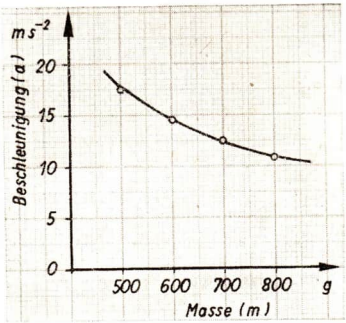


Abb. **176**/1. Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse

Durch Einfügen eines Proportionalitätsfaktors k kann man von der Proportion zur Gleichung übergehen:

$$F = k \cdot m \cdot a.$$

Die Einheiten für die Kraft, die Masse und die Beschleunigung wurde so festgelegt, daß der Proportionalitätsfaktor $k = 1$ ist. Mithin ergibt sich das **Grundgesetz der Mechanik**:

$$\boxed{F = m \cdot a}.$$

Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung.

Dieses Gesetz wird auch als *Newtonsches Kraftgesetz* bezeichnet. Es stimmt inhaltlich mit dem von Newton aufgestellten **2. Newtonschen Axiom** überein.

32. Maßsystem der Mechanik — Die dynamische Kraftmessung

Die meisten physikalischen Größen werden aus anderen, den sogenannten *Grundgrößen*, abgeleitet. So sind die Geschwindigkeit und die Beschleunigung *abgeleitete Größen*. Beide sind aus den Grundgrößen *Länge* und *Zeit* aufgebaut. Jedoch kommt man mit diesen beiden Grundgrößen in der Mechanik nicht aus.

1. Die mechanischen Grundeinheiten des physikalisch-technischen Maßsystems. Soll nur die Bewegung eines Körpers beschrieben werden, so reichen die Länge und die Zeit als Grundgrößen vollkommen aus. Die Geschwindigkeit, die Be-

schleunigung oder auch die Wurfbahn eines Körpers lassen sich aus diesen beiden Grundgrößen ableiten beziehungsweise berechnen. Dies gelingt jedoch nicht, wenn die auf den Körper einwirkende Kraft mit erfaßt werden soll. Dazu muß eine weitere Grundgröße in der Mechanik eingeführt werden. Das kann beispielsweise die **Kraft** selber oder aber auch die **Masse** sein. Dabei genügt es, eine dieser Größen als Grundgröße zu bestimmen; die andere kann dann mit Hilfe des Newtonschen Kraftgesetzes abgeleitet werden. Es zeigt sich, daß bereits aus drei Grundgrößen alle anderen mechanischen Größen abgeleitet werden können.

Durch die Verordnung über die physikalisch-technischen Einheiten vom 14. August 1958 wurden für die Deutsche Demokratische Republik folgende drei Grundgrößen beziehungsweise Grundeinheiten für die Mechanik gesetzlich festgelegt:

Grundgröße	Grundeinheit	Kurzzeichen
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Masse	Kilogramm	kg

Das **Meter** ist der Abstand der Mittelstriche, der auf dem Internationalen Meterprototyp angebrachten Strichgruppen bei einer Temperatur, die 0 °C entspricht.

Das **Kilogramm** ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.

Die **Sekunde** ist der 31 556 925,9747te Teil des tropischen Jahres für 1900.

2. Abgeleitete Einheiten der Mechanik. Die Kraft ist wie die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung eine abgeleitete Größe. Ihre Einheit ergibt sich aus dem Newtonschen Grundgesetz

$$F = m \cdot a$$

durch Einsetzen der Grundeinheiten für die Masse, die Länge und die Zeit.

So ergibt sich als gesetzliche Einheit der Kraft

$$1\ \mathrm{kg} \cdot 1\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} = 1\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}.$$

Diese Krafteinheit wurde zu Ehren Newtons **1 Newton** (N) genannt.

$$\boxed{\mathbf{1\ N = 1\ kg \cdot m \cdot s^{-2}}}\ .$$

Eine Kraft hat den Betrag 1 Newton, wenn sie einem Körper mit der Masse 1 kg eine Beschleunigung von 1 m · s⁻² erteilt.

Auf der Erdoberfläche wird einem Körper durch die Anziehungskraft der Erde nicht die Beschleunigung von $1\ m \cdot s^{-2}$, sondern die etwa 9,81mal größere Erdbeschleunigung erteilt. Daraus ergibt sich die Beziehung zwischen der Krafteinheit 1 Newton und der Krafteinheit 1 Kilopond (kp).

$$1\ kp = 1\ kg \cdot 9{,}81\ m \cdot s^{-2} = 9{,}81\ kg \cdot m \cdot s^{-2} = 9{,}81\ N.$$

1 Kilopond ist die Kraft, die einen Körper mit der Masse 1 kg die Beschleunigung von $9{,}81\ m \cdot s^{-2}$ erteilt.

$$\boxed{1\ kp = 9{,}81\ N}\ .$$

Auch das **Gewicht** eines Körpers ist eine Kraft. Es entspricht der Anziehungskraft zwischen der Erde und dem Körper und wird wie jede andere Kraft in Newton oder in Kilopond gemessen.

Vielfache oder Teile der gesetzlichen Einheiten können durch folgende gesetzlichen Vorzeichen beziehungsweise Kurzzeichen gekennzeichnet werden.

Tabelle der gesetzlichen Vorzeichen und Kurzzeichen

Vorsatz	Kurzzeichen	Bedeutung
Tera	T	$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$ Einheiten
Giga	G	$1\,000\,000\,000 = 10^{9}$,,
Mega	M	$1\,000\,000 = 10^{6}$,,
Kilo	k	$1\,000 = 10^{3}$,,
Hekta	h	$100 = 10^{2}$,,
Deka	da	$10 = 10^{1}$,,
Dezi	d	$0{,}1 = 10^{-1}$,,
Zenti	c	$0{,}01 = 10^{-2}$,,
Milli	m	$0{,}001 = 10^{-3}$,,
Mikro	μ	$0{,}000\,001 = 10^{-6}$,,
Nano	n	$0{,}000\,000\,001 = 10^{-9}$,,
Pico	p	$0{,}000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$,,

Die gesetzlichen Vorzeichen beziehen sich bei dem Kilogramm und bei dem Kilopond auf den 1000. Teil dieser Einheiten, also auf das Gramm beziehungsweise auf das Pond.

Die gesetzlichen Vorzeichen dürfen nicht doppelt verwendet werden. So gibt es zum Beispiel kein Millizentimeter o. ä. Bezeichnungen.

3. Die dynamische Kraftmessung. Bei der *statischen Kraftmessung* wurde die Deformation eines Körpers, zum Beispiel einer Schraubenfeder, ausgenutzt. Auf Grund der Beziehung

$$F = m \cdot a$$

kann man die Kraft auch mit Hilfe einer Geschwindigkeitsänderung bestimmen. Man bezeichnet diese Art der Kraftmessung als **dynamische Kraftmessung**. Hierbei wird bestimmt, welche Beschleunigung die einwirkende Kraft einem Körper erteilt.

Auf der Erde hat ein Körper mit einer Masse von 5 kg unter den Normalbedingungen auch ein Gewicht von 5 kp. Für jeden Körper sind bei diesen Verhältnissen die Angaben in Kilogramm und in Kilopond, die zwei verschiedenen Maßsystemen entstammen, zahlenmäßig gleich. *Das darf aber nicht dazu führen, daß als Maßeinheit von Kräften das Kilogramm verwendet wird.* Eine solche Bezeichnung ist falsch, da das Kilogramm eine Masseneinheit ist.

Da früher das Kilogramm auch als Krafteinheit benutzt wurde, findet man an älteren Meßgeräten und Maschinen Kräfte noch in kg angegeben. Dies entspricht jedoch nicht mehr den Normen, nach denen das Kilogramm nur eine Masseneinheit ist, während Kräfte in Kilopond beziehungsweise Newton anzugeben sind.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Berechnen Sie die Beschleunigung, die Ihr Gewicht Ihrem Körper erteilt, wenn Sie beim Baden ins Wasser springen! Welche Bedeutung hat diese Beschleunigung? Auf dem Mond beträgt das Gewicht nur etwa $\frac{1}{6}$ des Wertes auf der Erde. Welche Beschleunigung ergibt sich auf dem Mond?
2. Stellen Sie für Ihr Körpergewicht die Beziehung auf: Gewicht = Masse · Erdbeschleunigung!
3. Welche Antriebskraft wirkt bei einem Motorrad (Gewicht mit Fahrer 175 kp), das in 4 s eine Geschwindigkeit von 36 km · h^{-1} erreicht? Die Reibung ist zu vernachlässigen.
4. Welches Gewicht hat ein Wagen, der mit einer Kraft von 20 kp gezogen wird und bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung in 5 s eine Geschwindigkeit von 6 km · h^{-1} erreicht?

33. Das Gegenwirkungsprinzip

1. Das 3. Newtonsche Prinzip. Eine Kraft tritt nie für sich allein auf. *Bei jeder Kraftwirkung ist eine Gegenkraft vorhanden.*

In der in Abbildung **179**/1 wiedergegebenen Versuchsanordnung ist zwischen zwei gleichen Wagen eine Druckfeder angebracht, die durch einen Faden gespannt ist. Brennt man den Faden durch, so entspannt sich die Feder und setzt die beiden Wagen in Bewegung. Sie legen in der gleichen Zeit die gleichen Strecken zurück. *Daher sind die auf die beiden Wagen einwirkenden Kräfte entgegengesetzt gerichtet, aber ihrem Betrage nach gleich groß.*

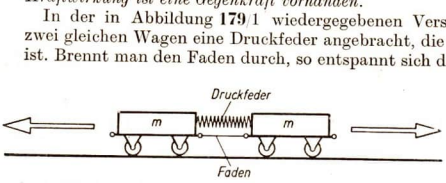


Abb. **179**/1
Versuch zum Nachweis des Gegenwirkungsprinzips

Bereits *Newton* erkannte diese Zusammenhänge und faßte sie in dem als **3. Newtonsches Prinzip** bekannten Satz zusammen.

Wirkt eine Kraft, so tritt stets eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kraft auf. Zu jeder Kraft gehört eine gleich große Gegenkraft.

2. Anwendungen des 3. Newtonschen Prinzips. Eine wichtige Anwendung erfährt das Gegenwirkungsprinzip beim *Raketenantrieb* (Abb. **180**/1). Durch ein Pumpenaggregat gelangt ständig Treibstoff in die Verbrennungskammer und wird dort verbrannt. Die Verbrennungsgase, die ein wesentlich größeres Volumen als der Brennstoff haben, können nur nach rückwärts entweichen. Durch die Kraft $\mathfrak{F}$ der unter hohem Druck stehenden Verbrennungsgase strömen diese mit hoher Geschwindigkeit aus der Düse. Nach dem 3. Newtonschen Prinzip ist dabei eine *Gegenkraft* $\mathfrak{K}$ wirksam, die $\mathfrak{F}$ entgegengesetzt gerichtet, ihrem Betrage nach aber gleich groß ist. Diese Schubkraft kann sehr große Werte annehmen. Mit Hilfe solcher Raketen ist es der Sowjetunion als erstem Land gelungen, künstliche Erdsatelliten in große Höhen auf vorher genau festgelegte Bahnen zu bringen. Der Raketenantrieb wird bei den künftigen Weltraumfahrzeugen eine große Bedeutung haben. Er ist nicht von einem Medium abhängig, sondern wirkt in der gleichen Weise auch im luftleeren Raum.

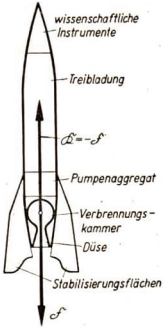


Abb. **180**/1
Aufbau einer Rakete (stark vereinfacht)

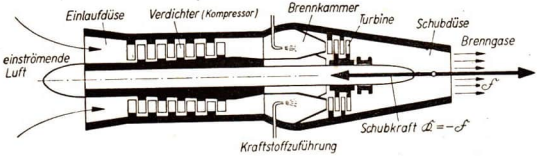


Abb. **180**/2
Schematische Darstellung eines Strahltriebwerkes

Der *Strahlantrieb von Flugzeugen* beruht ebenfalls auf dem Gegenwirkungsprinzip (Abb. **180**/2). Die in den Motor einströmende Luft wird verdichtet. In ringförmig angeordneten Brennkammern wird der Treibstoff verbrannt. Die Verbrennungsgase mischen sich mit stark verdichteter Luft und strömen mit einer Geschwindigkeit von über 100 $m \cdot s^{-1}$ aus der Schubdüse. Die daraus resultierende Gegenkraft ist die *Schubkraft*, auch *Schub* genannt, die das Flugzeug antreibt.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Erklären Sie, warum die Wirkungsweise einer Rakete und eines Strahltriebwerkes Anwendungen des 3. Newtonschen Prinzips sind?
2. Warum müssen bei Geschützen die Rohre nach hinten beweglich sein? Nennen Sie andere Beispiele für Anwendungen des Gegenwirkungsprinzips!

34. Die mechanische Arbeit

1. Der Begriff der Arbeit. Beim Ziehen eines Wagens wird ein Widerstand, die Reibungskraft, überwunden. Da *die Arbeit das Produkt aus Kraft und Weg ist*, wird in diesem Falle *Reibungsarbeit* verrichtet. Wird ein Körper gehoben, so muß die Schwerkraft überwunden werden. Man bezeichnet eine solche Arbeit als *Hubarbeit*. Beim Zusammendrücken oder Dehnen einer Feder oder eines anderen elastischen Körpers wird *Spannarbeit* verrichtet. Diese Arten der Arbeit faßt man unter dem Namen **Verschiebungsarbeit** zusammen, weil bei ihnen der Angriffspunkt der Kraft verschoben wird.

Im Gegensatz zur Verschiebungsarbeit spricht man von **Beschleunigungsarbeit**, wenn die einwirkende Kraft einen Körper beschleunigt.

Haben bei einer Beschleunigungsarbeit *die Kraft und der Weg die gleiche Richtung*, so ist die Arbeit das Produkt aus dem Betrag der Kraft und dem Betrag des zurückgelegten Weges: $A = F \cdot s$.

Dies trifft beispielsweise zu, wenn eine Lokomotive einen Wagen zieht (Abb. **181**/1). Wird jedoch dieser Wagen von einem neben den Schienen fahrenden Traktor gezogen, so ist für *die Fortbewegung nur eine Komponente der Kraft wirksam*. Die Arbeit A ist dann gleich dem Produkt aus dem Betrag der in der Wegrichtung wirkenden Kraftkomponente F, und dem Betrag des Weges (Abb. **181**/2).

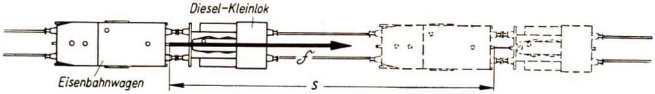


Abb. **181**/1. Kraft und Weg haben gleiche Richtung

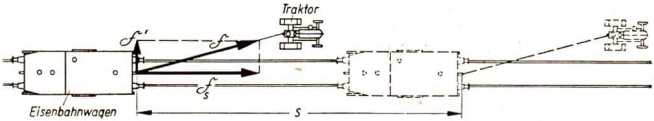


Abb. **181**/2. Arbeit bei der Bewegung auf einer vorgeschriebenen Bahn

$$\boxed{A = F_s \cdot s}\,.$$

Die Arbeit, die durch eine Kraft beim Überwinden eines Widerstandes längs einer Wegstrecke verrichtet wird, ist gleich dem Produkt aus der in Wegrichtung wirkenden Kraft und der Wegstrecke.

2. Die Messung der Arbeit. Aus der Gleichung $A = F \cdot s$ wird die Arbeitseinheit abgeleitet. Da im MKS-System die Kraft in Newton und der Weg in Meter gemessen wird, ergibt sich als *Maßeinheit für die Arbeit* das **Newtonmeter** (Nm), das auch als **Joule** (J) bezeichnet wird. Auch die **Wattsekunde** (Ws) und das **Erg** (erg) sind Maßeinheiten der Arbeit. Weiterhin sind als Einheiten der Arbeit diejenigen zu-

gelassen, die das Produkt einer zulässigen Krafteinheit und einer zulässigen Längeneinheit sind, zum Beispiel das **Kilopondmeter** (kpm).

$$1\ \text{Nm} = 1\ \text{J} = 10^7\ \text{erg} = 1\ \text{Ws} = 0{,}102\ \text{kpm}.$$

3. Fragen und Aufgaben:

1. In einem Bergwerk wird ein Förderkorb ($G = 8200$ kp) 160 m hoch gehoben. Vergleichen Sie diese Hubarbeit mit der, die man beim Aufziehen eines Uhrgewichts verrichtet ($G = 3$ kp, $h = 90$ cm)!
2. Eine Güterzuglokomotive bringt bei gleichmäßig beschleunigter Bewegung einen Zug ($G = 900$ Mp) in 3 min auf eine Geschwindigkeit von 40 km $\cdot$ h^{-1}. Wie groß ist bei Vernachlässigung der Reibung die Kraft am Zughaken der Lok?
3. Bei Erdarbeiten schiebt ein Arbeiter eine mit Erde beladene Kipplore ($G = 980$ kp) 80 m weit. Seine Kraft ($F = 40$ kp) wirkt schräg zur Gleisrichtung ($\alpha = 30°$). Ermitteln Sie durch Zeichnung und Rechnung den Betrag der Arbeit!

35. Die mechanische Energie

1. Der Begriff der Energie. Wurde an einem Körper Arbeit verrichtet, so hat dadurch dieser *Körper die Fähigkeit erlangt, selbst Arbeit zu leisten.* Man bezeichnet diese Fähigkeit als **Energie**.

Die gespannte Schraubenfeder, der gehobene Hammer oder die fahrende Lokomotive haben Energie in Form von gespeicherter Arbeit, die sie jederzeit wieder abgeben können. Die sich entspannende Feder kann zum Beispiel Beschleunigungsarbeit verrichten, indem sie eine Kugel beschleunigt oder ein Uhrwerk in Gang hält. Der gehobene Rammbär verrichtet Arbeit, indem er beim Niederfallen einen Pfahl in die Erde treibt.

Man unterscheidet zwei Arten *mechanischer Energie.* Hat ein Körper auf Grund seiner *Lage* gegenüber anderen Körpern Energie, wie zum Beispiel der hochgehobene Rammbär oder die gespannte Uhrfeder, so spricht man von **Energie der Lage** oder **potentieller Energie** (W_{pot}). Auch das in einer Talsperre gestaute Wasser hat potentielle Energie.

Die Energie, die ein Körper infolge seiner *Bewegung* hat, heißt **Bewegungsenergie** oder **kinetische Energie** (W_{kin}). So besitzt jedes in Bewegung befindliche Fahrzeug kinetische Energie. Auch der fallende Rammbär hat Bewegungsenergie. Ebenso hat das Wasser der Talsperre kinetische Energie, wenn es durch die Rohre in die Turbinen des Kraftwerkes strömt.

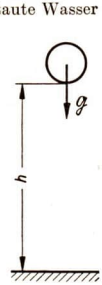


Abb. **182**/1 Potentielle Energie eines Körpers

2. Die potentielle Energie. Um einen Körper auf die Höhe h zu heben, muß entgegen der Schwerkraft die Arbeit $A = G \cdot h$ verrichtet werden. Da für das Gewicht nach dem Kraftwirkungsgesetz die Gleichung $G = m \cdot g$ gilt, so kann man auch schreiben $A = m \cdot g \cdot h$. Unterstützt man den gehobenen Körper in der Höhe h, so hat er durch die in ihm gespeicherte Arbeit selbst Arbeitsfähigkeit (Abbildung **182**/1). Er besitzt die potentielle Energie

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

Auch zum Spannen einer Feder muß Arbeit aufgewendet werden. Die gespannte Feder besitzt dann ebenfalls potentielle Energie, die gleich der aufgewandten Arbeit ist.

3. Die kinetische Energie. Ein gehobener Rammbär hat die potentielle Energie

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

Hat er die Strecke h durchfallen, so hat sich die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Auf Grund des freien Falles hat er die Geschwindigkeit $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. Durch Quadrieren der Gleichung erhält man $v^2 = 2 \cdot g \cdot h$ beziehungsweise $\frac{1}{2} v^2 = g \cdot h$.

Setzt man für $g \cdot h$ den Wert $\frac{1}{2} v^2$ in die Gleichung für die potentielle Energie ein, so erhält man die Gleichung für die kinetische Energie:

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

Die kinetische Energie eines Körpers ist der Masse des Körpers und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit proportional. Sie wird auch als *Wucht* bezeichnet.

4. Der Satz von der Erhaltung der Energie. Bei der Ableitung der Gleichung für die kinetische Energie wurde vorausgesetzt, daß sich *die potentielle Energie vollständig in kinetische Energie umgewandelt hat.* Dies kann durch den folgenden Versuch bestätigt werden (Abb. **183**/1). Der Körper durchfällt die Strecke h und erreicht dabei eine bestimmte kinetische Energie. Infolgedessen kann der Körper Arbeit verrichten. Sie wird unter Verwendung einer Federwaage ermittelt. Durch den fallenden Körper wird auf die Federwaage die Kraft F ausgeübt und die Feder um die Strecke s verlängert. Diese Strecke kann an einem Korkzeiger abgelesen werden. In der folgenden Tabelle sind die Meßergebnisse eines Versuches und ihre Auswertung zusammengestellt.

Vergleich von potentieller und kinetischer Energie

Gewicht (G) Fallhöhe (h)	= 0,5 kp = 0,5 m	7,5 kp 0,032 m	= mittlere Spannkraft (F) = Verlängerung (s)
potentielle Energie (W_{pot})	= 0,25 kpm	0,24 kpm	= Spannarbeit (A)

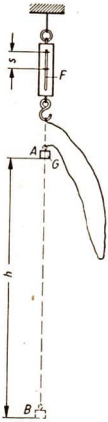


Abb. **183**/1. Bestimmen der kinetischen Energie eines Körpers

Die auf Grund der kinetischen Energie verrichtete Spannarbeit ist bis auf geringe Abweichungen gleich der potentiellen Energie. Durch viele ähnliche Versuche ist dieses Ergebnis bestätigt worden. Damit

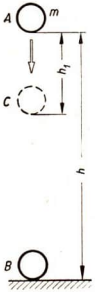


Abb. **184**/1. Bestimmung der Summe der mechanischen Energie $W_{pot} + W_{kin}$

ist nachgewiesen, daß auch *die kinetische Energie eines Körpers gleich seiner ursprünglichen potentiellen Energie ist.*

Eine Stahlkugel mit der Masse m fällt aus der Höhe h auf eine dicke Glasplatte (Abb. **184**/1). Die kinetische Energie der Kugel wird dabei zum Verrichten einer Arbeit benutzt. Die Stahlkugel und die Glasplatte werden im Moment des Auftreffens der Kugel auf die Platte verformt. Infolge der Elastizität nehmen die Kugel und die Platte nach dem Auftreffen wieder ihre alte Form an. Durch die dabei auftretenden Kräfte wird die Kugel annähernd auf die ursprüngliche Höhe gehoben. Damit hat die Kugel ihre ehemalige potentielle Energie erlangt. Bei diesem Versuch wird ständig potentielle Energie in kinetische umgewandelt und umgekehrt. Für die Anfangslage A, die unterste Lage B und eine beliebige Zwischenlage C gelten für die potentielle und die kinetische Energie die in der Tabelle wiedergegebenen Werte.

Auswertung des Fallversuches mit der Stahlkugel

Lage	Potentielle Energie ($W_{pot} = m \cdot g \cdot h$)	Geschwindigkeit (v)	Kinetische Energie $\left(W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2\right)$	Summe der mechanischen Energie ($W_{pot} + W_{kin}$)
A	$m \cdot g \cdot h$	0	0	$m \cdot g \cdot h$
C	$m \cdot g\,(h - h_1)$	$\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1}$	$m \cdot g \cdot h_1$	$m \cdot g \cdot h$
B	0	$\sqrt{2 \cdot g \cdot h}$	$m \cdot g \cdot h$	$m \cdot g \cdot h$

Bildet man die Summe von potentieller und kinetischer Energie, so erhält man stets den gleichen Wert. Dies gilt nicht nur für das Fallen der Kugel, sondern auch für das Steigen. Die potentielle Energie und die kinetische Energie ändern zwar ständig ihren Betrag, ihre Summe jedoch bleibt unverändert. Auch bei anderen mechanischen Vorgängen zeigt sich, daß die Summe aus der potentiellen und der kinetischen Energie konstant ist. Dieser Tatbestand ist im **Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie** festgelegt:

Die Summe der mechanischen Energien bleibt bei allen mechanischen Vorgängen unverändert.

$$\boxed{W_{pot} + W_{kin} = \text{konstant}}\,.$$

Bei allen diesen Untersuchungen muß man beachten, daß *meist ein Teil der mechanischen Energie in eine andere Energieart,* zum Beispiel in Wärmeenergie,

umgewandelt wird. Da sich aber Wärme nicht ohne weiteres wieder in mechanische Energie zurückverwandeln läßt, tritt ein Verlust an mechanischer Energie auf. Aber insgesamt bleibt auch hier die Summe der Gesamtenergie konstant.

Das Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie ist nur ein Sonderfall des allgemeinen Gesetzes von der Erhaltung der Energie.

36. Die Drehbewegung

1. Die krummlinige Bewegung. Beim freien Fall sind die Bewegungsrichtung und die Richtung der einwirkenden Kraft konstant. Die Bewegungsrichtung ändert sich infolgedessen nicht. Die Bahn ist geradlinig. Die Geschwindigkeit des fallenden Körpers ändert somit zwar ihren Betrag, aber nicht ihre Richtung. *Der freie Fall ist eine geradlinig beschleunigte Bewegung.*

Durchfährt jedoch ein Fahrzeug eine Kurve, so stimmt die augenblickliche Bewegungsrichtung dieses Fahrzeuges mit der Richtung der einwirkenden Kraft nicht überein. Die Geschwindigkeit ändert dadurch ihre Richtung. In aufeinanderfolgenden Zeitpunkten haben die Geschwindigkeitsvektoren unterschiedliche Richtungen. Oft ändert sich außerdem der Betrag der Geschwindigkeit.

Abb. **185**/1
Geschwindigkeitsvektoren eines Fahrzeuges zur Zeit t_1 und t_2

In der Abbildung **185**/1 sind die Geschwindigkeitsvektoren eines Fahrzeuges zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 aufgezeichnet. Während der Zeit $\Delta t = t_2 - t_1$ ändert sich die Geschwindigkeit sowohl ihrem Betrage als auch ihrer Richtung nach. Somit muß ein Geschwindigkeitsvektor Δv auftreten, der sich dem ursprünglichen Geschwindigkeitsvektor v_1 so überlagert, daß sich der neue Geschwindigkeitsvektor v_2 ergibt. *Die Geschwindigkeit v_2 ist somit die resultierende Geschwindigkeit aus der Geschwindigkeit v_1 und aus der Geschwindigkeitsänderung Δv.*

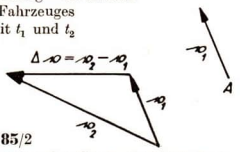


Abb. **185**/2
Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung Δv nach dem Vektorendreieck

$$v_2 = v_1 + \Delta v\,.$$

Auf Grund dieser Überlegung kann die Geschwindigkeitsänderung Δv mit Hilfe des Parallelogramms der Geschwindigkeiten bestimmt werden (Abb. **185**/2). Die Bahn des Fahrzeuges verläuft zu den Zeiten t_1 und t_2 so, daß die Geschwindigkeitsvektoren v_1 und v_2 jeweils in tangentialer Richtung wirken. Die Abbildung **185**/3 zeigt die Bahn des eine Kurve durchfahrenden Kraftwagens. *Die Bewegung ist krummlinig.*

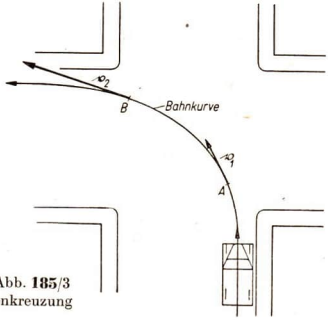


Abb. **185**/3
Bahnkurve eines Kraftwagens in einer Straßenkreuzung

Bei *ungleichförmig bewegten Körpern* ist häufig die **Durchschnittsbeschleunigung** $\bar{a}$ von Interesse, die der Körper während der Zeit $\Delta t = t_2 - t_1$ hatte. Sie kann in ähnlicher Weise wie die Durchschnittsgeschwindigkeit bestimmt werden:

$$\boxed{\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}}\,.$$

Die Richtung der Beschleunigung stimmt mit der Richtung der Geschwindigkeitsänderung Δv überein.

Bei jeder beschleunigten Bewegung eines Körpers ist als Ursache der Beschleunigung a eine Kraft $\mathfrak{F}$ vorhanden. Die Richtung der Kraft stimmt immer mit der Richtung der jeweiligen Beschleunigung überein. Weiterhin sind nach dem Grundgesetz der Mechanik die Beschleunigungen den Kräften proportional. Diese Aussage gilt ohne Einschränkung auch bei krummlinigen Bewegungen. Unter Berücksichtigung des Vektorcharakters von Kraft und Beschleunigung schreibt man das Grundgesetz der Mechanik

$$\boxed{\mathfrak{F} = m \cdot a}\,.$$

Bei einer beschleunigten Bewegung stimmen die Richtung der Kraft und die Richtung der Beschleunigung überein.

Untersucht man bei einer Kreisbewegung die Richtung der jeweils wirkenden Beschleunigung und damit die Richtung der wirkenden Kraft, so stellt man fest, daß *die Kraft in jedem Zeitpunkt auf den Mittelpunkt der Kreisbahn gerichtet ist* (Abb. **186**/1). Man bezeichnet eine solche Bewegung als **Zentralbewegung**. Hierbei wird vorausgesetzt, daß sich der Körper auf einer ebenen Bahn bewegt. Der Punkt, auf den jeweils die Kraft gerichtet ist, wird als *Bewegungszentrum* Z bezeichnet. Die nach dem Bewegungszentrum gerichtete Kraft nennt man **Zentralkraft** (F_Z). Die Verbindungsgerade eines Bahnpunktes mit dem Bewegungszentrum heißt *Leitstrahl*.

Auch die Bewegung auf einer elliptischen Bahn ist eine Zentralbewegung. Die Kreisbewegung ist nur ein Sonderfall. Zentralbewegungen führen die Planeten und Monde unseres Sonnensystems aus, aber auch die künstlichen Erdsatelliten und der künstliche Planet „*XXI. Parteitag*".

Daß es den Menschen gelungen ist, in den Weltraum vorzustoßen und künstliche Monde um die Erde kreisen zu lassen, ist dem unermüdlichen Fleiß und Streben vieler Forscher aus verschiedenen Nationen zu verdanken. Im Mittelalter waren es besonders *Tycho Brahe, Kepler* und *Newton*, die die Bewegungen der Himmelskörper sorgfältig und genauestens beobachteten. Bereits *Kepler* erkannte, daß *die Bewegungen der Himmelskörper Zentralbewegungen sind.* Immer neue Beobachtungen wurden mit Hilfe von ständig verbesserten Beobachtungsgeräten gemacht und zusammengetragen. Viele Einzelerkenntnisse konnten zu allgemeingültigen Gesetzen zusammengefaßt werden.

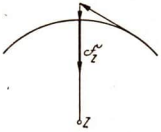


Abb. **186**/1. An jedem Punkt der Bahn einer Zentralbewegung ist die einwirkende Kraft F_Z auf das Bewegungszentrum Z gerichtet.

2. Die gleichmäßige Kreisbewegung. Ist bei einer Zentralbewegung der Leitstrahl immer gleich groß, so ist die Bahn des Körpers ein Kreis (Abb. **187**/1). Die Bahngeschwindigkeit muß ihrem Betrage nach konstant sein. Die gleichförmige Zentralbewegung wird auch als *gleichmäßige Kreisbewegung* bezeichnet.

Die Kreisbewegung ist dann eine Zentralbewegung, wenn sich die Bahngeschwindigkeit ihrem Betrage nach nicht ändert.

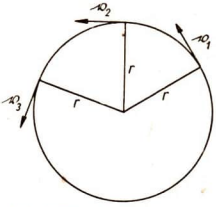


Abb. **187**/1. Der Leitstrahl ist bei der gleichmäßigen Kreisbewegung gleich dem Radius der Kreisbahn.

Da die Beträge der Beschleunigungen an jedem Punkt der Kreisbahn gleich groß sind, bleibt auch die Zentralkraft als Ursache der Beschleunigung ihrem Betrage nach immer gleich groß. Weiterhin folgt aus dem 3. Newtonschen Prinzip, daß zu der Zentralkraft eine gleich große Gegenkraft vorhanden sein muß, die vom Kreismittelpunkt als Bewegungszentrum weg gerichtet ist.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Warum sind die Bewegungen der künstlichen Erdsatelliten Zentralbewegungen? Wo liegt das Bewegungszentrum?
2. Nennen Sie Beispiele für gleichmäßige Kreisbewegungen! Prüfen Sie, ob die Bedingungen für eine gleichförmige Zentralbewegung jeweils erfüllt sind!

37. Kräfte bei der kreisförmigen Zentralbewegung

1. Bahngeschwindigkeit und Drehzahl bei der gleichmäßigen Kreisbewegung. Bei einer Kreisbewegung kann die Größe der Bahngeschwindigkeit ebenso wie bei einer gleichförmigen Bewegung als Quotient aus dem Weg und der Zeit gemessen werden. Bewegt sich der Körper in der Zeit t auf einer Kreisbahn von A nach B, so ist seine Geschwindigkeit

$$v = \frac{\widehat{AB}}{t} \quad \text{(Abb. 187/2).}$$

Einfacher ergibt sich die Bahngeschwindigkeit aus einem vollen Umlauf des Körpers. Die dafür benötigte Zeit heißt **Umlaufzeit** (T). Der vom Körper zurückgelegte Weg ist dann gleich dem Umfang der Kreisbahn:

$$s = 2\pi \cdot r = \pi \cdot d.$$

Somit ist die Geschwindigkeit $v = \dfrac{\pi \cdot d}{T}$.

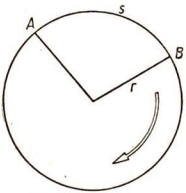


Abb. **187**/2. Bahngeschwindigkeit einer gleichmäßigen Kreisbewegung

In der Technik wird sehr häufig der reziproke Wert der Umlaufszeit, nämlich die **Umlaufszahl** oder die **Drehzahl** (n), benutzt. Die Drehzahl gibt die Anzahl der Umläufe in der Zeiteinheit an.

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

Die Drehzahl ist der reziproke Wert der Umlaufszeit.

Die *Einheit der Umlaufszeit* ist die **Sekunde** (s); daher ist die *Einheit der Drehzahl* $\frac{1}{\textbf{Sekunde}} = \mathrm{s}^{-1}$. Ist beispielsweise die Drehzahl zu $n = 20\ \mathrm{s}^{-1}$ gegeben, so kann daraus die Umlaufszeit ermittelt werden. Sie beträgt

$$T = \frac{1}{n} = \frac{1}{20\ \mathrm{s}^{-1}} = \frac{1}{20}\ \mathrm{s}.$$

Häufig wird in der Technik die Minute als Zeiteinheit gewählt. $20\ \mathrm{U} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ entsprechen $1200\ \mathrm{U} \cdot \mathrm{min}^{-1}$.

Setzt man die Drehzahl in die Gleichung für die Bahngeschwindigkeit ein, so erhält man

$$\boxed{v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}\ .$$

2. Die Zentralkraft. Beim *Hammerwerfen* wird eine an einem Draht befestigte Kugel im Kreise geschleudert. Der Hammerwerfer spürt deutlich, daß eine Kraft aufgewendet werden muß, um den Hammer auf seiner Kreisbahn zu halten. Diese Kraft ist die *Zentralkraft*, auch *Radialkraft* genannt, da sie in Richtung des Radius wirkt. Wird der Draht losgelassen, so fliegt der Hammer infolge seiner Trägheit tangential zur Kreisbahn fort, da die Zentralkraft nicht mehr wirkt. Auch bei der Beobachtung eines sprühenden Schleifsteins ist diese tangentiale Bewegung deutlich zu sehen.

Hört bei einem auf einer Kreisbahn bewegten Körper im Punkt A die Zentralkraft auf zu wirken, so fliegt der Körper in tangentialer Richtung gleichförmig weiter (Abb. **188**/1). In der Zeit Δt legt er die Strecke s_1 zurück. Würde auf ihn nur die Zentralkraft wirken, so würde sich der Körper in der gleichen Zeit vom Punkt A gleichmäßig beschleunigt um die Strecke s_2 in Richtung der Kraft F_Z bewegen. Der Körper führt jedoch beide Bewegungen gleichzeitig aus, so daß sie sich überlagern. Der Körper fliegt von A nach B. Durch die ständige Einwirkung der Zentralkraft, die ihrer Größe nach gleich bleibt und auch ständig auf den gleichen Punkt gerichtet ist, wird der Körper auf der Kreisbahn gehalten.

Mit dem in Abbildung **188**/2 wiedergegebenen Versuch kann man die Zentralkraft messen. Mit Hilfe einer Federwaage wird die Größe der Zentralkraft bestimmt. Bei dieser Versuchsanordnung kann auch der Radius der Kreisbahn verändert werden.

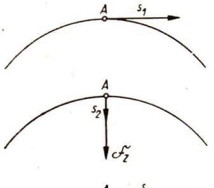


Abb. **188**/1
Durch Einwirkung der Zentralkraft $\mathfrak{F}_z$ bleibt der Körper auf der Kreisbahn.

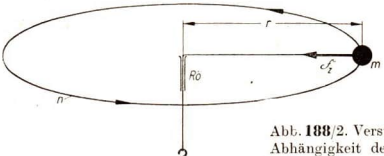


Abb. **188**/2. Versuch zur Abhängigkeit der Zentralkraft $\mathfrak{F}_Z$ vom Radius der Kreisbahn r, der Masse m und der Drehzahl n des Körpers, *Rö* Röhrchen

3. Die Größe der Zentralkraft. In drei Versuchsreihen untersucht man die *Abhängigkeit der Zentralkraft* F_Z

1. *von der Masse* m, dabei werden die Drehzahl n und der Radius r konstant gehalten,
2. *von der Drehzahl* n, dabei läßt man die Masse m und den Radius r unverändert,
3. *vom Radius* r, dabei bleiben die Masse m und die Drehzahl n gleich.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Abhängigkeit der Zentralkraft von der Masse, von der Drehzahl und vom Radius

Größe / Versuch	m	n	r
1	$F_Z \sim m$	konstant	konstant
2	konstant	$F_Z \sim n^2$	konstant
3	konstant	konstant	$F_Z \sim r$

Faßt man diese Teilergebnisse zusammen, so erhält man

$$F_Z \sim m \cdot n^2 \cdot r \quad \text{oder} \quad F_Z \sim m \cdot \frac{n^2 \cdot r^2}{r}.$$

Aus der Gleichung für die Bahngeschwindigkeit, $v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$, folgt

$$r \cdot n = \frac{v}{2 \cdot \pi}.$$

Somit gilt:

$$(r \cdot n)^2 = \left(\frac{v}{2 \cdot \pi}\right)^2 \quad \text{oder}$$

$$r^2 \cdot n^2 = \frac{v^2}{4 \cdot \pi^2}.$$

Setzt man diesen Wert in die obige Proportion ein, so nimmt sie die Form

$$F_Z \sim m \cdot \frac{v^2}{r}$$

an. Der Quotient $\frac{1}{4 \cdot \pi^2}$ braucht in der Proportion nicht berücksichtigt zu werden, da er ein konstanter Faktor ist und somit keinen Einfluß auf die Proportionalität hat.

Da nach dem Newtonschen Grundgesetz die Kraft dem Produkt aus Masse und Beschleunigung proportional ist,

$$F \sim m \cdot a,$$

kann man aus der Proportion

$$F \sim m \cdot \frac{v^2}{r}$$

vermuten, daß *der Quotient* $\frac{v^2}{r}$ *die zur Zentralkraft* F_Z *gehörige Zentralbeschleunigung* a_Z *ist.*

Vergleicht man zunächst die Maßeinheiten, so hat der Quotient $\frac{v^2}{r}$ die Maßeinheit $m \cdot s^{-2}$, somit auch die Einheit einer Beschleunigung. Daß es sich bei diesem Quotienten tatsächlich um die Zentralbeschleunigung handelt, läßt sich folgendermaßen beweisen (Abb. **190**/1). Der Körper durchläuft in der Zeit Δt bei konstanter Bahngeschwindigkeit v die Strecke $\widehat{AB} = v \cdot \Delta t$. Da Δt sehr klein ist, kann man den Kreisbogen $\widehat{AB}$ durch die Sehne $\overline{AB}$ ersetzen. Die Strecke $\overline{AB}$ zerlegt man in die Tangentialkomponente $\overline{AB_1}$ und die Komponente $\overline{AB'}$. Da auf dieser Strecke die Beschleunigung a wirkt, so gilt

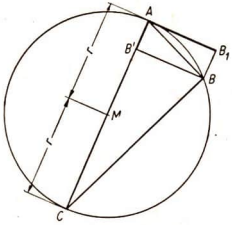


Abb. **190**/1. Beschleunigung der Zentralbewegung

$$\overline{AB'} = \frac{1}{2} a_Z \cdot (\Delta t)^2 .$$

Im rechtwinkligen Dreieck ABC ist dann nach dem Höhensatz

$$\overline{AB}^2 = AB' \cdot AC .$$

Aus $\overline{AB} = v \cdot \Delta t$, $\overline{AB'} = \frac{1}{2} a_Z \cdot (\Delta t)^2$ und $AC = 2r$

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

Daraus ergibt sich: $v^2 = a_Z \cdot r$ beziehungsweise $a_Z = \frac{v^2}{r}$.

Somit ist der Quotient $\frac{v^2}{r}$ *tatsächlich die Zentralbeschleunigung* a_Z. Für die Zentralkraft erhält man dann die Gleichungen

$$\boxed{F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r}} , \qquad \boxed{F_Z = 4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot r \cdot n^2} .$$

4. Die Fliehkraft. Nach dem 2. Newtonschen Prinzip setzt ein Körper einer beschleunigenden Kraft einen *Trägheitswiderstand* entgegen. Somit tritt auch bei der Zentralbeschleunigung ein Trägheitswiderstand auf. Dieser ist der Zentralkraft entgegengesetzt gerichtet und dem Betrage nach gleich, er hält also der Zentralkraft das Gleichgewicht. Bei der Kreisbewegung wird durch diese Gegenkraft bewirkt, daß sich der Körper nicht in Richtung der Zentralkraft bewegt, sondern ständig den gleichen Abstand vom Mittelpunkt behält. Daher ist bei einem am Faden herumgeschleuderten Stein der Faden immer gespannt. Bewegt man sich auf einem Karussell, so empfindet der mitbewegte Beobachter eine Kraft, die den Körper vom Mittelpunkt fortzieht. Sie ist also radial nach außen gerichtet. Man bezeichnet diese Kraft als **Fliehkraft** oder **Zentrifugalkraft** (F_F).

Die Fliehkraft ist nichts anderes als der Trägheitswiderstand. Sie ist somit keine Kraft, die eine Bewegung erzeugt, wie etwa die Zentralkraft. Sie tritt als Trägheits-

kraft immer nur in Verbindung mit der Zentralkraft auf. Hört die Zentralkraft während der Bewegung eines Körpers plötzlich auf zu wirken, wenn zum Beispiel der Faden eines herumgeschleuderten Steines reißt, so ist im gleichen Moment auch keine Fliehkraft mehr vorhanden. Der Stein fliegt nämlich dann nicht radial, sondern auf Grund der Trägheit tangential fort.

Die Fliehkraft entspricht dem Trägheitswiderstand, der von der Zentralkraft überwunden werden muß. Die Beträge der Zentralkraft und der Fliehkraft sind gleich, ihre Richtungen sind entgegengesetzt.

$$\boxed{F_F = m \cdot \frac{v^2}{r}}, \qquad \boxed{F_F = 4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot r \cdot n^2}.$$

5. Die Ausnutzung der Fliehkraft. Die Bewegung des Mondes um die Erde ist annähernd eine gleichmäßige Kreisbewegung. Die von der Erde am Mond hervorgerufene Zentralbeschleunigung kann daher nach der Gleichung

$$a_Z = 4\,\pi^2 \cdot r \cdot n^2 = \frac{4\,\pi^2 \cdot r}{T^2}$$

berechnet werden. Durch astronomische Messungen wurde die mittlere Entfernung des Mondmittelpunktes vom Erdmittelpunkt zu $r = 384 \cdot 10^6$ m und die Umlaufszeit des Mondes zu $T \approx 27{,}3\,d \approx 2{,}36 \cdot 10^6$ s ermittelt. Setzt man diese Werte in die Gleichung für a_Z ein, so erhält man als *Zentralbeschleunigung des Mondes* $a_M \approx 0{,}0027\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

Bei den vorbereitenden wissenschaftlichen Untersuchungen für den Start künstlicher Erdsatelliten war auch die Frage zu beantworten: *Welche Geschwindigkeit muß ein Satellit haben, damit er in einer bestimmten Entfernung um die Erde kreisen kann, ohne wieder auf die Erdoberfläche zu stürzen.* In diesem Falle muß die bei der Kreisbewegung auftretende Fliehkraft F_F dem Betrage nach gleich dem Gewicht G, das heißt gleich der Erdanziehungskraft, sein: $G = F_F$.

Aus $$G = m \cdot g \text{ und } F_F = m \cdot \frac{v^2}{R} \ (R = \text{Erdradius})$$

folgt $$m \cdot g = m \cdot \frac{v^2}{R}.$$

Daraus kann man die Geschwindigkeit v berechnen:

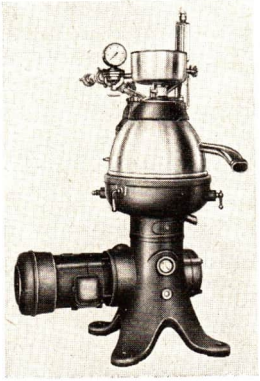
$$v^2 = R \cdot g, \quad \text{somit} \quad v = \sqrt{R \cdot g}.$$

Setzt man in diese Gleichung die Werte für $R = 6{,}37 \cdot 10^6$ m und $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ ein, so erhält man als Geschwindigkeit $v = 7{,}9\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Sie wird als **1. kosmische Geschwindigkeit** bezeichnet. Erreicht ein Körper diese Bahngeschwindigkeit, so kann er als künstlicher Mond die Erde umfliegen. Die 1. kosmische Geschwindigkeit ist etwa 9mal so groß wie die Anfangsgeschwindigkeit einer Gewehrkugel und rund 33mal so groß wie die Geschwindigkeit einer TU 104. Die Gleichung

$v = \sqrt{R \cdot g}$ enthält nicht mehr die Masse. Die 1. kosmische Geschwindigkeit ist von der Masse unabhängig. Daraus folgt für alle Körper, die die Erde in der gleichen Entfernung umkreisen sollen, daß sie die *gleiche Bahngeschwindigkeit* haben, unabhängig davon, ob sie eine große oder kleine Masse haben.

Als erstem Land der Welt ist es der Sowjetunion am 4. Oktober 1957 gelungen, mittels Raketenantriebs einen Körper auf die Bahngeschwindigkeit von rund 7,9 km · s^{-1} zu bringen. „*Sputnik I*" kreiste als erster Satellit, der von Menschenhand geschaffen wurde, in einer mittleren Entfernung von 500 km um die Erde. Nach rund 1400 Umläufen geriet der Satellit in dichtere Luftschichten, durch deren Luftwiderstand er schließlich so stark erwärmt wurde, daß er verbrannte. Inzwischen wurden weitere, wesentlich größere Sputniks gestartet.

In *Zentrifugen* werden unter Ausnutzung der Fliehkraft Flüssigkeiten verschiedener Dichte voneinander getrennt. Wird Vollmilch in einer Zentrifuge in schnelle Drehung versetzt, so wird die Magermilch nach außen getrieben, während sich der Rahm an der Innenseite ansammelt (Abb. **192**/1). Da die Fliehkraft der Masse proportional ist, wird die Magermilch wegen ihrer größeren Dichte weiter nach außen getrieben als der weniger dichte Rahm.



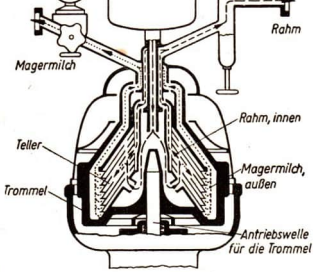


Abb. **192**/1 Milchzentrifuge, hergestellt vom VEB Kyffhäuserhütte Artern

Das gleiche Prinzip wird auch bei der *medizinischen Zentrifuge* (Abb. **192**/2), der *Honigschleuder* und der *Fliehkrafttrockenschleuder* angewendet. Eine *Ultrazentrifuge*, mit der eine Drehzahl von 60000 U/min erreicht

Abb. **192**/2. Medizinische Zentrifuge

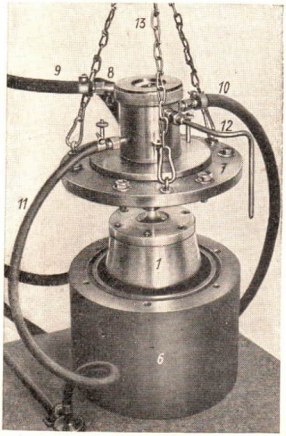


Abb. **193/1**
Ultrazentrifuge
a) Ansicht

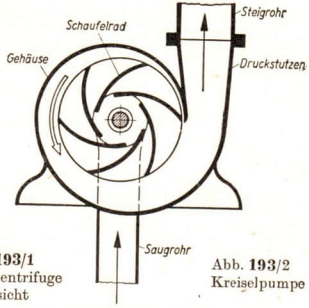
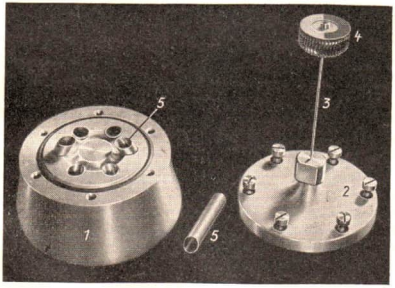


Abb. **193/2**
Kreiselpumpe

1 Rotor, *2* Rotordeckel, *3* Achse (∅ 3 mm), *4* Antriebsturbine: oberer Schaufelkranz für Bremsung, unterer Schaufelkranz für Antrieb, *5* Zentrifugenbecher, *6* Gehäuse, *7* Gehäusedeckel, *8* Zuleitung für Treibluft (teilweise verdeckt) *9* Zuleitung für Bremsluft, *10* Zuleitung für Hubluft, *11* Ölzufluß, *12* Ölabfluß, *13* Ketten zum Anheben des Deckels

Der Antrieb der Zentrifuge erfolgt durch Preßluft. Diese trifft auf das untere Schaufelrad der Antriebsturbine. An dieser ist die Achse, ein 3 mm starker Stahldraht, befestigt, die den Rotor trägt. In dem Rotor befinden sich 6 Bohrungen zur Aufnahme der Zentrifugenbecher. Zur Verringerung der Reibung läuft der Rotor in einem Vakuum von wenigen Torr. Die Antriebsturbine rotiert auf einem Luftpolster, das mit Hilfe der Hubluft erzeugt wird. Dadurch erreicht die Zentrifuge eine Umdrehungszahl von 60000 U/min. Die Umdrehungszahl wird stroboskopisch gemessen. Zu diesem Zweck ist die Oberseite der Antriebsturbine in ein schwarzes und ein weißes Feld geteilt. Der Rotor hat einen mittleren Radius von 65 mm. Die Fliehkraft beträgt bei dieser Zentrifuge je Gramm etwa 265 kp. Infolgedessen sind für derartige Zentrifugen besondere Schutzmaßnahmen notwendig, wie beispielsweise die Unterbringung der Zentrifuge in einem besonders starkwandigen Gehäuse. Die Bremsung des Rotors erfolgt ebenso wie der Antrieb durch Preßluft.



b) Rotor geöffnet

werden kann, zeigt Abb. **193**/1. Mit Ultrazentrifugen werden Fliehkräfte erreicht, die millionenmal so groß sind wie die Schwerkraft. Diese Kräfte reichen aus, um bei hochmolekularen Stoffen, beispielsweise Eiweiß, die Molekularkräfte zu überwinden und Moleküle zur Abscheidung zu bringen.

Eine andere Anwendung findet die Fliehkraft bei der *Kreiselpumpe* (Abb. **193**/2). In einem zylindrischen Gehäuse dreht sich ein Schaufelrad und setzt dadurch eine Flüssigkeit, zum Beispiel Wasser, in Umdrehung. Infolge der Fliehkraft wird das Wasser nach außen getrieben und tritt durch ein tangential angesetztes Steigrohr aus. In der Mitte des Gehäuses entsteht daher ein Unterdruck, so daß durch den

Luftdruck neues Wasser in das Saugrohr gedrückt wird. Da die Kreiselpumpe keine Ventile besitzt, kann man mit ihr auch schlammiges Wasser ansaugen. Darin liegt ein besonderer Vorteil dieser Pumpen.

Fährt ein Radfahrer mit seinem Rad in eine Kurve, so greift im gemeinsamen Schwerpunkt neben der Schwerkraft $\mathfrak{G}$ die Fliehkraft $\mathfrak{F}$ an (Abb. **194**/1). Damit der Fahrer nicht aus der Kurve getragen wird, legt er sich so in die Kurve, daß die Wirkungslinie der resultierenden Kraft $\mathfrak{R}$ auf die Spur des Fahrrades gerichtet ist. Werden Fahrbahnen in Kurven überhöht, beispielsweise bei Rennstrecken, so können dadurch Kurven auch mit größerer Geschwindigkeit sicher durchfahren werden.

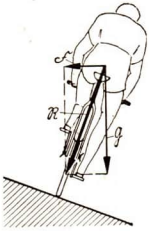


Abb. **194**/1. Radfahrer in einer Kurve

6. Fragen und Aufgaben:

1. Ein Werkstück mit einem Durchmesser von 80 mm wurde bisher auf der Drehbank bei einer Umlaufzahl von 160 U/min bearbeitet. Durch Anwenden des Schnelldrehens erhöht sich die Umlaufzahl auf 300 U/min. Um welchen Betrag ändert sich die Zentralbeschleunigung eines Punktes der Oberfläche?
2. Nennen Sie Beispiele dafür, wie man in der Technik die Fliehkraft ausnutzt!
3. Berechnen Sie für Sputnik I die Zentralkraft unter der Annahme einer Kreisbewegung ($m = 86$ kg, mittlere Entfernung von der Erde 500 km, $T = 96{,}2$ min)!

38. Die Keplerschen Gesetze — Das Gravitationsgesetz von Newton

1. Neue naturwissenschaftliche Erkenntnisse im 16. und 17. Jahrhundert. Bis zum Ende des 15. Jahrhunderts standen die Naturwissenschaften noch auf einer sehr niedrigen Entwicklungsstufe. Die Menschen waren mit starkem Aberglauben und großen Vorurteilen behaftet. Die Arbeit derjenigen Menschen, die wissenschaftlich tätig sein konnten, beschränkte sich meist darauf, die von der Kirche aufgestellten Lehren zu unterstützen. Wer von diesen Anschauungen, auch wenn sie noch so töricht waren, abwich, wurde hart bestraft. Die Wissenschaft der damaligen Zeit war die Magd der Kirche.

Doch die Anforderungen und Bedürfnisse der Menschen wuchsen auch damals unaufhörlich. Mit der Entwicklung neuer Produktionsverhältnisse kam es zu mannigfaltigen Erfindungen und Entdeckungen auch auf technischem Gebiet. Bei der Gewinnung und der Bearbeitung der Metalle waren große Fortschritte zu verzeichnen. Einfache mechanische Maschinen wurden besonders durch die Entwicklung der Bergbautechnik vervollkommnet. Die Entdeckung neuer Länder und Inseln führte zu neuen Handelswegen. Man begann größere und schnellere Schiffe zu bauen. Die Welt war für die Menschen größer geworden. Die Vorstellungen über die Kugelgestalt der Erde waren durch die Reisen von Magalhães eindeutig bewiesen worden.

Alle diese Erfindungen und Entdeckungen waren auch mit einer Entwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse verbunden. Die von der Kirche auferlegten Fesseln wurden in einem erbitterten Kampf gesprengt. Gelehrte, die neue und entscheidende wissenschaftliche Erkenntnisse veröffentlichten, wurden verfolgt.

Doch auch die Folterkammern der Inquisition oder sogar der Scheiterhaufen vermochten nicht, diese stürmische Entwicklung aufzuhalten.

Die Erforschung der Gesetze der Mechanik war nicht nur für die Physik, sondern auch für die anderen Naturwissenschaften von umwälzender Bedeutung. Es zeigte sich, daß auch die Lage und die Bewegungen der Himmelskörper mit Hilfe der Mechanik erklärt werden konnten.

2. Das Ptolemäische Weltsystem. Schon im Altertum hatten sich die Menschen mit der Bewegung der Gestirne beschäftigt. Sie erkannten bereits, daß sich die *Bewegungen der Sonne und der Planeten von den Fixsternbewegungen unterschieden.* Bei den Planetenbahnen wurden Schleifen und rückläufige Bewegungen beobachtet (Abb. **195**/1).

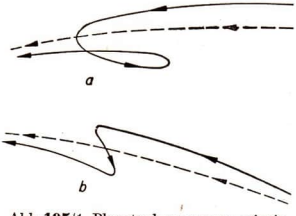


Abb. **195**/1. Planetenbewegungen, wie sie der irdische Beobachter sieht: a) Schleifenbildung, b) rückläufige Bewegung

Der griechische Naturphilosoph *Ptolemäus* faßte das gesamte astronomische Wissen seiner Zeit systematisch zusammen. Er stellte das nach ihm benannte *Ptolemäische Weltsystem* auf. Durch den Eindruck der Gestirnbewegungen auf den irdischen Beobachter kam er zu der Annahme, daß die Erde der ruhende Mittelpunkt der Welt sei. Man bezeichnet dieses Weltsystem daher auch als *geozentrisches Weltsystem.* Die mittelalterlichen Kirchengelehrten eigneten sich den Standpunkt von *Ptolemäus* an, da er leicht mit der Bibel in Einklang zu bringen war.

3. Das Kopernikanische Weltsystem. Das geozentrische Weltsystem blieb für 1400 Jahre maßgebend. Obwohl einige Gelehrte zu neuen Erkenntnissen kamen, wurde unter dem Einfluß der Kirche und der gesellschaftlichen Verhältnisse starr an diesem System festgehalten.

Erst *Nikolaus Kopernikus* schuf eine grundsätzliche Wandlung in der Auffassung des Weltgeschehens durch das nach ihm benannte *Kopernikanische Weltsystem.* Danach steht die Erde nicht mehr unbeweglich im Mittelpunkt der Welt, sondern die Erde und die übrigen Planeten bewegen sich auf kreisförmigen Bahnen um die Sonne. Die Erde selbst dreht sich täglich einmal um ihre Achse und braucht für einen Umlauf um die Sonne etwa $365\frac{1}{4}$ Tage.

Dieses neue *heliozentrische System* zeigte, daß die Erde nicht mehr als ein anderer Himmelskörper ist. Es stellt somit einen vollkommenen Bruch mit den damaligen Auffassungen dar. Deshalb stieß die Kopernikanische Lehre auf großen Widerstand. *Kopernikus* wagte viele Jahre nicht, offen gegen die damals herrschenden Ansichten aufzutreten. Erst nach 36jährigem Zögern veröffentlichte er in seinem Todesjahr sein Buch „*Über die Bewegungen der Himmelskörper*".

Gelehrte, die sich mutig zu dem heliozentrischen Weltsystem bekannten, wurden verfolgt. Der italienische Denker *Giordano Bruno* (1548 bis 1600) behauptete, daß auch die Sonne nicht der Mittelpunkt der Welt, sondern nur einer der endlos vielen Sterne ist. Er wurde deshalb eingekerkert. Keine Qualen und Foltern brachten ihn jedoch zum Widerruf seiner Erkenntnisse. Am 17. Februar 1600 wurde *Giordano Bruno* in Rom zum Tode verurteilt und verbrannt.

Auch *Galileo Galilei*, dessen Veröffentlichungen die Lehre des *Kopernikus* unterstützten, stand im Kampfe mit der Inquisition. Er wurde festgenommen. Unter Androhung härtester Strafen wurde der 70jährige große Gelehrte gezwungen, sich von seinen „Verirrungen" loszusagen. Alle diese Maßnahmen konnten jedoch die Entwicklung der Naturwissenschaften nur hemmen, aber nicht aufhalten.

4. Die Keplerschen Gesetze. Wie stark die Menschen infolge des Einflusses der Kirche noch am Ptolemäischen System festhielten, zeigt das Verhalten *Tycho Brahes*. Dieser berühmte dänische Astronom konnte sich trotz seiner Beobachtungsergebnisse nicht entschließen, das heliozentrische System anzuerkennen und versuchte sogar, es zu widerlegen.

Auf Grund zahlreicher, peinlich genau durchgeführter Messungen verfolgte er Jahre hindurch den Stand der Planeten am Sternenhimmel. Dieses wertvolle Beobachtungsmaterial stand dem deutschen Astronomen *Johannes Kepler* zur Verfügung. Er konnte dadurch nicht nur weitere Beweise für das Kopernikanische Weltsystem finden, sondern zusätzlich neue, weitergehende Gesetzmäßigkeiten erkennen. In jahrelanger mühevoller Arbeit, wobei er das Beobachtungsmaterial von *Brahe* auswertete, kam *Kepler* zu dem Schluß, daß *die Planetenbahnen nur annähernd Kreise darstellen*. Nach sechsjähriger Rechenarbeit fand er schließlich im Jahre 1609 die Gesetze, die den zahlreichen Beobachtungen entsprachen.

1. Keplersches Gesetz

Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht (Abb. 196/1).

2. Keplersches Gesetz

Der Leitstrahl von der Sonne zu einem Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Abb. 196/2).

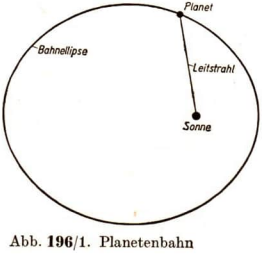


Abb. **196**/1. Planetenbahn

Nach weiteren 10 Jahren konnte *Kepler* auch das dritte Gesetz formulieren:

3. Keplersches Gesetz

Die Quadrate der Umlaufszeiten (T) zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen (s) ihrer Bahnen.

$$\boxed{\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{s_1^3}{s_2^3}}\text{, somit gilt: }\boxed{\frac{s_1^3}{T_1^2} = \textbf{konstant}}\,.$$

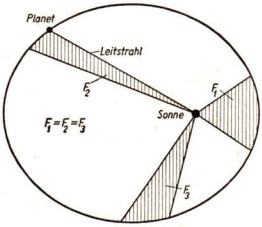


Abb. **196**/2
Die vom Leitstrahl überstrichenen Flächen sind gleich groß

Keplers Leistungen sind deshalb so hoch einzuschätzen, weil die meisten Planetenbahnen von der Kreisbahn nur sehr wenig abweichen. Wird zum Beispiel die elliptische Erdbahn so verkleinert, daß ihre große Achse 720 mm beträgt, so ist die kleine Achse nur 0,1 mm kleiner!

5. Das Gravitationsgesetz. In England setzte in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts im Zusammenhang mit den Versuchen, die Arbeitsfähigkeit des Wasserdampfes auszunutzen, eine starke Entwicklung der Produktivkräfte ein. Damit stieg auch das Interesse an naturwissenschaftlichen Erkenntnissen. England war zu dieser Zeit das Land, das in politischer und wirtschaftlicher Hinsicht am weitesten fortgeschritten war. Der englische Naturforscher *Newton* begnügte sich nicht mit rein geometrischen Beschreibungen der Planetenbahnen. Er versuchte die Ursachen festzustellen, die die Bewegungen der Himmelskörper hervorrufen. *Newton hatte erkannt, daß sich alle Körper gegenseitig anziehen.* Diese Eigenschaft haben alle Körper im gesamten Weltenraum auf Grund ihrer Masse. Die Schwerkraft, durch die ein Stein beim Fallen von der Erde angezogen wird, ist nur ein Sonderfall der allgemeinen gegenseitigen *Massenanziehung* oder *Gravitation*. Aber auch der Stein zieht die Erde an. Mittels einer sehr empfindlichen *Drehwaage* läßt sich die Gravitation nachweisen (Abb. **197**/1).

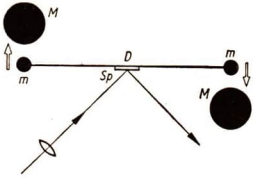


Abb. **197**/1. Ein von dem Spiegel *Sp* reflektierter Lichtstrahl macht die Drehung der beiden Massen *m* sichtbar, wenn sie durch die großen Bleikugeln *M* angezogen werden.

Newtons Forschungsarbeit beschränkte sich nicht nur auf die allgemeine Gravitation und auf die Aufstellung der drei Bewegungsgesetze, er untersuchte beispielsweise auch die *Zerlegung des weißen Lichts in die Spektralfarben* und deren Zusammensetzung zu weißem Licht.

Aus dem 1. Keplerschen Gesetz folgerte *Newton*, daß auf jeden Planeten eine nach der Innenseite der elliptischen Bahn gerichtete Kraft wirkt, denn ohne Krafteinwirkung müßte sich der Planet nach dem Trägheitsgesetz gleichförmig bewegen. Nach dem 2. Keplerschen Gesetz muß die Planetenbewegung eine Zentralbewegung sein, da die Zentralkraft beständig zur Sonne als dem Bewegungszentrum gerichtet ist. *Newton* konnte beweisen, daß seine Schlußfolgerungen aus dem 1. und dem 2. Keplerschen Gesetz mit den Planetenbewegungen übereinstimmten. Die Zentralkraft, die die Bewegungen der Himmelskörper verursacht, ist die **Gravitationskraft**. Die Untersuchung der Planetenbahnen führte so schließlich zu einem der wichtigsten Grundgesetze der Physik, dem **Gravitationsgesetz**.

Die Bahnen der meisten Planeten sind mit großer Annäherung Kreisbahnen. Die nach dem Bewegungszentrum gerichtete Zentralkraft ist nach dem Grundgesetz der Mechanik

$$F_Z = m \cdot a_Z,$$

wobei in diesem Falle m die Masse des umlaufenden Körpers und a_Z seine Zentralbeschleunigung ist. Setzt man für die Zentralbeschleunigung a_Z den Wert

$$a_Z = \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2} \text{ ein, so erhält man } \quad F_Z = m \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}.$$

Aus dieser Gleichung folgt, daß die nach dem Zentralkörper gerichtete Kraft F_Z der Masse m des Planeten und dem Quotienten $\frac{r}{T^2}$ proportional ist.

$$F_Z \sim m \cdot \frac{r}{T^2}.$$

Nach dem 3. Keplerschen Gesetz sind die Quadrate der Umlaufszeiten den dritten Potenzen der großen Halbachsen (s) proportional:

$$T^2 \sim s^3.$$

Da bei den vorliegenden Betrachtungen die Bahnen als annähernd kreisförmig angesehen werden, so kann die große Halbachse s durch die mittlere Entfernung r von der Sonne ersetzt werden.

$$T^2 \sim r^3.$$

Setzt man in der Proportion

$$F_Z \sim m \cdot \frac{r}{T^2}$$

für T^2 den Wert r^3 ein, so ergibt sich

$$F_Z \sim m \cdot \frac{r}{r^3}, \qquad F_Z \sim \frac{m}{r^2}.$$

Dieser Ausdruck besagt, daß zum Beispiel die von der Sonne auf einen Planeten ausgeübte Kraft seiner Masse direkt und dem Quadrat seiner Entfernung von der Sonne umgekehrt proportional ist.

Nach dem 3. Newtonschen Prinzip muß die zwischen dem Planeten und dem Zentralkörper wirkende Kraft eine gleichgroße Gegenkraft haben. Danach wird die Sonne auch von dem Planeten angezogen. Der Betrag der Gravitationskraft ist somit auch der Masse M des Zentralkörpers proportional:

$$F_Z \sim M.$$

Faßt man die Beziehungen $F_Z \sim \frac{m}{r^2}$ und $F_Z \sim M$ zusammen, so erhält man

$$F_Z \sim \frac{m \cdot M}{r^2}.$$

Diese Beziehung nennt man das *Newtonsche Gravitationsgesetz*:

> **Zwei Körper ziehen sich gegenseitig mit einer Kraft an, die dem Produkt ihrer Massen direkt und dem Quadrat ihrer Entfernungen voneinander umgekehrt proportional ist.**

Durch Einfügen eines Proportionalitätsfaktors erhält man die Gleichung:

$$\boxed{F_Z = k \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}}.$$

Der Proportionalitätsfaktor k wird **Gravitationskonstante** genannt. Mittels einer Drehwaage konnte diese bestimmt werden. Die Maßeinheit dieser Konstanten ergibt sich durch Auflösen der Gleichung nach k und Einsetzen der entsprechenden Grundeinheiten.

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

6. Anwendungen des Gravitationsgesetzes. Mit Hilfe des Gravitationsgesetzes kann beispielsweise die *Masse der Erde* berechnet werden. Ein Körper mit der Masse m an der Oberfläche der Erde wird von der Erdmasse M mit der Kraft G, die dem Gewicht des Körpers entspricht, angezogen. Nach dem Gravitationsgesetz ist

$$G = m \cdot g = k \cdot \frac{m \cdot M}{R^2},$$

wobei R der Radius der Erde ist. Aus der Gleichung folgt

$$g = k \cdot \frac{M}{R^2}, \quad \text{somit} \quad M = \frac{g \cdot R^2}{k}.$$

Setzt man in diese Gleichung die entsprechenden Werte ein:

$$g = 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, \qquad R = 6{,}37 \cdot 10^6 \text{ m}, \qquad k = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2,$$

so erhält man:

$$M = \frac{9{,}81 \cdot 6{,}37^2 \cdot 10^{12}}{6{,}67 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}.$$

In ähnlicher Art können die Massen anderer Himmelskörper bestimmt werden.

Masse, mittlere Sonnenentfernung und Umlaufszeit einiger Himmelskörper

Himmelskörper	Masse kg	Mittlere Entfernung von der Sonne km	Umlaufszeit Tage
Sonne	$1{,}98 \cdot 10^{30}$	—	—
Merkur	$3{,}4 \cdot 10^{23}$	$57{,}9 \cdot 10^6$	87,97
Venus	$4{,}9 \cdot 10^{24}$	$108{,}1 \cdot 10^6$	224,70
Erde	$6{,}0 \cdot 10^{24}$	$149{,}5 \cdot 10^6$	365,25
Mond	$7{,}4 \cdot 10^{22}$	$384{,}4 \cdot 10^3$ *	27,32166
Mars	$6{,}5 \cdot 10^{23}$	$227{,}8 \cdot 10^6$	688
Jupiter	$1{,}9 \cdot 10^{27}$	$777{,}8 \cdot 10^6$	4330
„XXI. Parteitag“	$1{,}472 \cdot 10^3$	$172 \cdot 10^6$	450

* Abstand von der Erde

6. Fragen und Aufgaben:

1. Berechnen Sie die Masse der Sonne! Bestimmen Sie hierzu den Ausdruck für die Zentralbeschleunigung der Erde relativ zur Sonne aus dem Gravitationsgesetz, und setzen Sie diesen Ausdruck gleich dem auf S. 189 angegebenen!
2. Machen Sie Angaben über die Bewegung des künstlichen Planeten „XXI. Parteitag“ auf Grund der Keplerschen Gesetze! Prüfen Sie mit Hilfe der Tabellenwerte für den künstlichen Planeten und die Erde das 3. Keplersche Gesetz nach!
3. Berechnen Sie die Zentralbeschleunigung für Sputnik III unter der Annahme einer Kreisbewegung nach dem Gravitationsgesetz (mittlerer Abstand von der Erdoberfläche 1050 km)! Vergleichen Sie diesen Wert mit der Fallbeschleunigung auf der Erde!

39. Grundfragen der Kosmonautik

1. Die Eroberung des Weltalls durch den Menschen. Mit dem Aufstieg des ersten Sputniks am 4. Oktober 1957 ist die Menschheitsgeschichte in eine neue Ära eingetreten. Der Mensch beginnt, das Weltall zu erobern. Damit geht ein jahrtausendealter Traum der Menschheit der Verwirklichung entgegen.

Der sowjetische Raketenforscher *K. E. Ziolkowski* wußte noch nicht, daß seinem Volke so schnell der erste Schritt ins Weltall gelingen sollte. Sowjetischen Menschen war es vorbehalten, der Welt zu zeigen, was Physiker, Astronomen, Chemiker, Raketenforscher und Elektronikspezialisten durch kollektive Zusammenarbeit in einem sozialistischen Lande leisten können. Bereits am 2. Januar 1959 konnte der zweite, größere Schritt ins Weltall getan werden. Die interplanetare Rakete „*XXI. Parteitag*" verließ die Erde und zieht als *künstlicher Planet des Sonnensystems* ihre Bahn im Weltraum.

2. Die drei kosmischen Geschwindigkeitsstufen. a) Die 1. kosmische Geschwindigkeit. Bereits auf Seite 191 wurde gezeigt, welche Geschwindigkeit ein Körper auf einer Kreisbahn haben muß, damit er infolge seiner Trägheit um die Erde kreist. Die Fliehkraft und die Gravitationskraft sind bei dieser 1. kosmischen Geschwindigkeit v_1 entgegengesetzt gleich groß.

$$v_1 = \sqrt{g \cdot R}\,.$$

Diese Gleichung gilt nur für eine Umkreisung in unmittelbarer Erdnähe. Für $R = 6{,}37 \cdot 10^6$ m und $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ erhält man als Wert der 1. kosmischen Geschwindigkeit

$$v_1 = 7905\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}.$$

Da

$$v_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T}$$

ist, ergibt sich die Umlaufszeit auf dieser Kreisbahn aus

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v_1}.$$

Sie beträgt 5060 Sekunden oder 84 Minuten und 20 Sekunden.

Die erste Geschwindigkeitsstufe v_1 ist nicht etwa die Mindestgeschwindigkeit, die einem Körper mitgeteilt werden muß, damit er die Erde umkreisen kann. Die Kreisbahngeschwindigkeit hängt von dem Abstand des Satelliten vom Erdmittelpunkt ab. Sie wird mit zunehmender Entfernung geringer. Wie die Abbildung **201**/1 veranschaulicht, benötigt ein Satellit, der in einem Abstand von 42000 km vom Erdmittelpunkt die Erde umkreist, nur eine Bahngeschwindigkeit von

$$v = 3000\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}.$$

Die Kreisbahngeschwindigkeit eines Satelliten für eine beliebige Erdentfernung r wird auf folgende Weise berechnet. Ist m die Masse des künstlichen Mondes und M die Erdmasse, so ist die Gravitationskraft zwischen diesen beiden Massen

$$F_Z = k \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}.$$

Sie muß bei der Umkreisung der Zentrifugalkraft

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

das Gleichgewicht halten. Somit gilt die Gleichung:

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

Daraus ergibt sich die Geschwindigkeit

$$v^2 = \frac{k \cdot M}{r},$$

$$v = \sqrt{\frac{k \cdot M}{r}}.$$

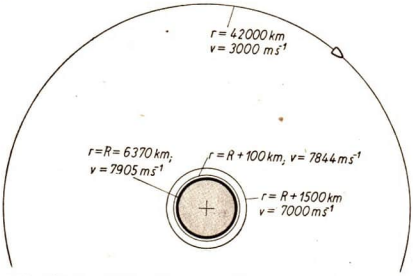


Abb. **201**/1. Abhängigkeit der Kreisbahngeschwindigkeit künstlicher Satelliten von der Entfernung r vom Erdmittelpunkt

Unmittelbar an der Erdoberfläche ist $r = R$ und die Gravitationskraft gleich dem Gewicht:

$$m \cdot g = k \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}.$$

Daraus erhält man

$$k \cdot M = g \cdot R^2.$$

Setzt man diesen Wert in die Gleichung für die Kreisbahngeschwindigkeit ein, so kann man sie mit Hilfe der Gleichung für die Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{k \cdot M}{r}} = \sqrt{\frac{g \cdot R^2}{r}}$$

berechnen. In dieser Gleichung ist die Berechnung der 1. kosmischen Geschwindigkeit als Spezialfall enthalten. Für $r = R$ erhält man

$$v_1 = \sqrt{\frac{g \cdot R^2}{R}} = \sqrt{g \cdot R} \quad \text{(vgl. S. 191).}$$

b) Die 2. kosmische Geschwindigkeit. Unter der *2. kosmischen Geschwindigkeitsstufe* versteht man in der Astronautik die Geschwindigkeit, die man einem Körper an der Erdoberfläche geben muß, damit er ohne weitere Krafteinwirkung *den unmittelbaren Wirkungsbereich der Erde verlassen kann.* Er umkreist dann nicht die Erde, sondern wird selbst zum Planeten. Durch ähnliche Berechnungen, wie sie auch für die 1. kosmische Geschwindigkeit angestellt wurden, erhält man

$$v_2 = 11\,180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Diese Geschwindigkeit wird auch als *Fluchtgeschwindigkeit* bezeichnet.

Ein Körper beliebiger Masse kann also die Erde verlassen, wenn er zum Beispiel durch Abschuß mit einer Rakete diese Fluchtgeschwindigkeit erreicht. Auch die

Fluchtgeschwindigkeit von anderen Gestirnen kann berechnet werden (vgl. die nebenstehende Tabelle).

Einige Fluchtgeschwindigkeiten

Ort	Fluchtgeschwindigkeit $m \cdot s^{-1}$
Erde	11180
Mond	2375
Venus	10320
Mars	5100
Jupiter	59500
Erdbahn im Sonnenschwerefeld	42000

c) Die 3. kosmische Geschwindigkeit. Soll ein Körper nicht nur die Erde, sondern auch *das Sonnensystem verlassen*, so benötigt er eine noch höhere Geschwindigkeit. Sie setzt sich aus der Fluchtgeschwindigkeit von der Erde und der Fluchtgeschwindigkeit aus dem Sonnensystem von der Erdbahn aus zusammen. Wird hierbei die Kreisbahngeschwindigkeit der Erde mit etwa $30000\ m \cdot s^{-1}$ ausgenutzt, indem man den Körper in Richtung der Bahnbewegung der Erde beschleunigt, so benötigt man eine zusätzliche Geschwindigkeit

$$v_3 = 16400\ m \cdot s^{-1}.$$

Man bezeichnet diese Geschwindigkeit als *3. kosmische Geschwindigkeit*. Ein Körper, der nicht nur die Erde verlassen soll, sondern unser Sonnensystem, muß mit einer Mindestgeschwindigkeit von $16{,}4\ km \cdot s^{-1}$ von der Erdoberfläche in Richtung der Erdbewegung in den Weltraum geschossen werden.

3. Das Antriebsprinzip kosmischer Fahrzeuge. Damit ein Körper mit der Masse m von der Erdoberfläche gegen das Schwerefeld der Erde bis auf eine bestimmte Entfernung vom Erdmittelpunkt gehoben wird, ist eine Arbeit erforderlich, die berechnet werden kann. Hierzu muß dem Körper eine kinetische Energie zugeführt werden, die der Größe der zu verrichtenden Arbeit entspricht. Wird beispielsweise ein Körper auf eine Geschwindigkeit von $11{,}2\ km \cdot s^{-1}$ beschleunigt, so ist seine kinetische Energie $\frac{1}{2} m \cdot v^2$ gleich der Arbeit zur Überwindung des Schwerefeldes der Erde.

Eines der Probleme des Vorstoßes in den Weltraum liegt in der Frage: *Auf welche Weise kann man einem Körper, dem Weltraumschiff, die notwendige Energie mitgeben?* Die einfachste Lösung wäre, den Körper mittels einer riesigen Kanone abzuschießen, so daß er zum Beispiel mit einer Geschwindigkeit von $12\ km \cdot s^{-1}$ das Geschützrohr verläßt. Das läßt sich jedoch technisch nicht verwirklichen. Würde das Geschütz beispielsweise 72 m lang sein, so müßte der Körper bei einem Start ins Weltall im Geschützrohr von der Geschwindigkeit Null auf eine Geschwindigkeit von $12\ km \cdot s^{-1}$ beschleunigt werden. Erfolgt diese Beschleunigung gleichmäßig, so kann sie aus den Gleichungen

$$v = a \cdot t \quad \text{und} \quad s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

berechnet werden. Aus $v = 12\ km \cdot s^{-1}$ und $s = 72\ m$ folgt

$$a = 10^6\ m \cdot s^{-2}.$$

Diese Beschleunigung ist 100000mal so groß wie die Erdbeschleunigung, das heißt, auf jeden Teil des Weltraumschiffes mit der Masse 1 kg wirkt eine Kraft von 100000 kp. Infolgedessen treten Drücke von mehreren Tausenden Atmosphären auf. Wäre der Geschoßkörper als Hohlkugel ausgebildet, so würde ein in ihr befindlicher Mensch platt gedrückt. Auch wenn man das Kanonenrohr auf 720 m verlängert, so verringern sich zwar alle anderen Werte auf ein Zehntel, sind aber trotzdem immer noch viel zu groß. Weiterhin wird die technische Ausführung dadurch unmöglich, daß die Luft im Geschützrohr bei sehr großer Geschwindigkeit vor dem Geschoß nicht so schnell ausweichen kann. Auch wenn man auf irgendeine Weise die vorgeschriebene Geschwindigkeit erreichen könnte, würde durch den Luftwiderstand eine so große Reibungswärme entstehen, daß der Körper gleich einem Meteor verbrennen würde.

Ein *Antrieb mit Luftschrauben*, wie bei Flugzeugen, scheidet aus, da dazu Luft vorhanden sein muß. Gerade der Bereich der Erdatmosphäre soll aber verlassen werden.

Alle diese Schwierigkeiten treten nicht auf, wenn man das **Raketenprinzip** zum Antrieb des Weltraumschiffes ausnutzt. Der Strahlmotor einer Rakete schleudert entgegengesetzt zur Fahrtrichtung Teilchen mit großer Geschwindigkeit aus. Nach dem Gegenwirkungsprinzip erhält die Rakete beim Ausströmen der Verbrennungsgase eine Antriebskraft in Fahrtrichtung. Diese Antriebskraft ist um so größer, je größer die Geschwindigkeit und die Masse der ausgestoßenen Teilchen sind.

Um eine möglichst große Raketengeschwindigkeit zu erreichen, *muß man die Masse der Rakete möglichst klein halten und die Geschwindigkeit der ausgestoßenen Teilchen vergrößern.* Die Masse der ausgestoßenen Teilchen zu vergrößern ist zwecklos, da sie, bevor sie ausgestoßen werden, von der Rakete als Ballast mitgenommen werden müssen, also die Raketenmasse vergrößern. Aus diesem Grunde wählt man Stoffe zum Betrieb des Raketenmotors, die mit möglichst großer Geschwindigkeit ausgestoßen werden (vgl. die Tabelle auf S. 204). Zur Zeit verwendet man Brennstoffe, die zumeist in flüssigem, seltener in festem Zustand in den Treibstoffkammern der Rakete mitgeführt werden. Auch der zur Verbrennung erforderliche Sauerstoff muß mitgenommen werden (Abb. **203**/1).

Da bei der Verbrennung neuartiger Treibstoffe keine wesentliche Vergrößerung der Ausströmungsgeschwindigkeiten zu erwarten ist, sucht man nach anderen Wegen, Teilchen eine hohe Ausströmungsgeschwindigkeit zu verleihen.

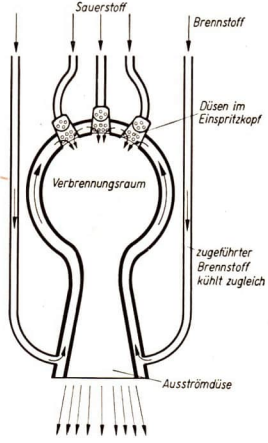


Abb. **203**/1. Raketenmotor im Schnitt. Der Sauerstoff wird in flüssiger Form in Stahlflaschen gelagert. Erst im Verbrennungsraum des Raketenmotors werden Sauerstoff und Treibstoff zusammengeführt.

Die *Ausnützung der Atomenergie* kann eine Lösung dieser schwierigen Probleme bedeuten. In einem Atomreaktor werden mit Hilfe von Uran oder Plutonium so große Energien erzeugt, daß die Teilchen im Innern des Reaktors sehr schnell bewegt werden. Diese schnellen Teilchen bewegen sich jedoch in allen Richtungen nach außen, wobei ihre Geschwindigkeit im Mittel etwa $2 \cdot 10^7$ m · s^{-1} beträgt. Sobald man den Atomreaktor so bauen kann, daß alle Teilchen nur in einer Richtung wie aus einem Kanal austreten, wäre damit ein wesentlicher Fortschritt erzielt worden. Wenn auch die Raketenmasse durch die sehr große Masse des Reaktors vergrößert wird, so steht diesem Nachteil doch ein sehr großer Vorteil gegenüber. Statt zum Beispiel 1000 kg Treibstoff mit der Ausströmungsgeschwindigkeit $4 \cdot 10^3$ m · s^{-1} brauchen bei einer „Atomrakete" nur 0,2 kg Teilchen mit einer Geschwindigkeit von $2 \cdot 10^7$ m · s^{-1} auszuströmen, um der Rakete den gleichen Antrieb zu geben.

Ausströmungsgeschwindigkeiten einiger Brennstoffe

Brennstoff	Ausströmungsgeschwindigkeit m · s^{-1}
Wasserstoff	5170
Benzin	4270
Spiritus	4180
Kohle (rein)	4320
Schwarzpulver	2420

Nach anderen Plänen soll die Atomenergie eines Reaktors oder die Sonnenenergie in elektrische Energie umgewandelt werden. Diese Energie soll dann dazu benutzt werden, elektrisch geladene Teilchen, sogenannte Ionen, etwa bis zur Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Ein Nachteil ist die bisher noch sehr große Eigenmasse der dazu notwendigen Anlagen.

4. Die Mehrstufenrakete. Durch die *Verwendung mehrerer Stufen* kann man wesentlich leistungsfähigere Raketen bauen. Die Einstufenrakete verliert zwar ständig an Masse, da Treibstoff verbraucht wird, jedoch stellen die nicht mehr benutzten Treibstofftanks nur einen unnützen Ballast dar. Deshalb wird bei einer *Mehrstufenrakete* die ausgebrannte Raketenstufe abgeworfen. Da die Masse dadurch wesentlich verringert wird, benötigt man für den restlichen Treibstoff nur ein kleineres Triebwerk, um die gleiche Beschleunigung der Rakete beizubehalten. Man kann also neben den Treibstofftanks auch das größere Triebwerk mit seinen Brennstoffpumpen usw. abwerfen. Meist wird eine Mehrstufenrakete so gebaut, daß sie sich aus mehreren übereinandergestellten, immer kleiner werdenden Raketen mit vollständigen Triebwerken zusammensetzt (Abb. **204**/1).

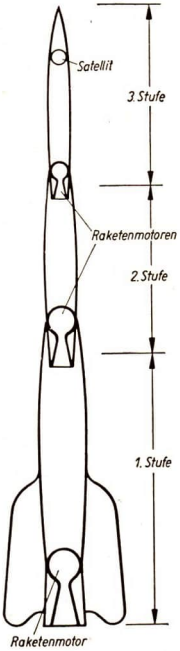


Abb. **204**/1. Prinzipieller Aufbau einer Dreistufenrakete

Sobald die Treibstofftanks der ersten Stufe leer sind, werden sie mit dem Triebwerk und den nur in der dichteren Atmosphäre benötigten Stabilisierungsflächen abgeworfen. Gleichzeitig wird die zweite Stufe gezündet. Sobald deren Tanks leer sind, wird auch diese Stufe abgeworfen und die dritte Raketenstufe gezündet. Wie *Sputnik II* gegenüber *Sputnik I* bewiesen hat, bietet das Abwerfen der letzten Stufe, der Trägerrakete, von der eigentlichen Nutzlast keine wesentlichen Vorteile mehr. Die Trägerrakete von *Sputnik II* flog eine verhältnismäßig lange Zeit auf der gleichen Bahn wie der Satellit selbst.

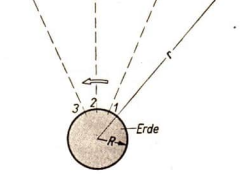
5. Der interplanetare Raum. Aus den Signalen der Sputniks konnte festgestellt werden, daß bereits in Höhen von 500···900 km nur noch verhältnismäßig wenig Gasmoleküle im Raum vorhanden sind. Es ist damit zu rechnen, daß in Höhen ab 2000 km praktisch keine Atmosphäre mehr vorhanden ist.

Man bezeichnet den Teil des Weltraums, der durch das Sonnensystem mit seinen Planeten erfüllt ist, als den *interplanetaren Raum.* Die Anzahl kosmischer Körper, wie Meteore und Sternschnuppen, im interplanetaren Raum ist kleiner, als man bisher annahm. Damit sind die Gefahren für ein Weltraumschiff nicht groß. Ein Zusammenstoß mit einem kosmischen Körper von nur wenigen Gramm Masse müßte unweigerlich zu einer Katastrophe führen, da die Durchschnittsgeschwindigkeit dieser Körper von etwa $4 \cdot 10^4$ m $\cdot$ s^{-1} ungefähr 40mal so groß wie die Anfangsgeschwindigkeit einer Gewehrkugel ist.

Die Behauptung, daß der interplanetare Raum eine Temperatur habe, die nahe dem absoluten Nullpunkt bei $-273°$C liegt, ist nicht richtig. *Ein Raum ohne Stoff kann keine Temperatur haben.* Ein Körper im Weltraum kann zum Beispiel, wenn auf ihn keine Wärmestrahlung der Sonne auftrifft, da er sich im Schatten des Mondes befindet, durch Wärmestrahlung seine Wärme abgeben und eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt annehmen. In der Wärmestrahlung der Sonne aber kann derselbe Körper, je nach der Beschaffenheit seiner Oberfläche, eine Temperatur von 100°C oder mehr haben.

Wenn Menschen zum erstenmal in den interplanetaren Raum vordringen, werden sie überrascht das Licht der Gestirne erblicken, das nicht von der Atmosphäre getrübt ist. Da die Lichtstrahlen durch kein Medium zerstreut werden können, heben sich die Sterne und die Planeten mit großer Leuchtkraft von einem tiefschwarzen „Himmel" ab. Selbst das grelle Licht der Sonne kann nicht einmal in ihrer unmittelbaren Nähe das tiefe Schwarz des interplanetaren Raumes aufhellen.

Abb. **205**/1



6. Fragen und Aufgaben:

1. In welcher Entfernung müßte ein künstlicher Erdsatellit kreisen, wenn er in 24 h die Erde umkreisen soll (Abb. **201**/1)? Setzen Sie hierzu den Ausdruck $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ gleich dem auf S. 201 abgeleiteten Ausdruck $v = \sqrt{\frac{g \cdot R^2}{r}}$! Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit? Welche Vorteile würde dieser Satellit bieten?
2. Warum mußten die beiden sowjetischen kosmischen Raketen mit einer Geschwindigkeit von $v = 11{,}2$ km s^{-1} die Erde verlassen?
3. Warum baut man Mehrstufenraketen?

Anhang

Zusammenstellung der wichtigsten Gleichungen der Mechanik

		Seite
Gleichförmige Bewegung		
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz	$v = \frac{s}{t}$	149
Weg-Zeit-Gesetz	$s = v \cdot t$	149
Gleichmäßig beschleunigte Bewegung		
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz	$v = a \cdot t$	155
Weg-Zeit-Gesetz	$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$	156
Freier Fall		
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz	$v = g \cdot t$	159
Weg-Zeit-Gesetz	$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$	159
Geschwindigkeit-Weg-Gesetz	$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}$	159
Wurf		
Wurfweite beim waagerechten Wurf	$s_w = v_0 \cdot t_h$	163
Steigzeit beim senkrechten Wurf	$t_h = \frac{v_0}{g}$	165
Steighöhe beim senkrechten Wurf	$s_h = \frac{v_0^2}{2g}$	165
Reibung		
Reibungsgesetz	$R = \mu \cdot F_N$	169
Newtonsche Gesetze		
Grundgesetz der Mechanik	$F = m \cdot a$	176
Arbeit		
Mechanische Arbeit	$A = F_s \cdot s$	181

Energie

		Seite
Potentielle Energie	$W_{pot} = m \cdot g \cdot h$	182
Kinetische Energie	$W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$	183
Energiesatz der Mechanik	$W_{pot} + W_{kin} = \text{konstant}$	184

Gleichmäßige Kreisbewegung

Geschwindigkeit	$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$	188
Drehzahl	$n = \frac{1}{T}$	187
Zentralbeschleunigung	$a = \frac{v^2}{r}$	190
Fliehkraft	$F_F = m \cdot \frac{v^2}{r} = 4\pi^2 \cdot m \cdot r \cdot n^2$	191
1. Kosmische Geschwindigkeit	$v_1 = \sqrt{g \cdot R}$	191

Keplersche Gesetze — Newtons Gravitationsgesetz

3. Keplersches Gesetz	$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{s_1^3}{s_2^3}$	196
Gravitationsgesetz	$F = k \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$	198

Kosmonautik

Kreisbahngeschwindigkeit eines Satelliten	$v = \sqrt{\frac{k \cdot M}{r}}$	201

NAMEN- UND SACHVERZEICHNIS

Akkumulator 17 u. ff.
Akkumulatorenbatterie 23 u. f.
Allstrommotor 100
Ampere 8
Amperestunde (Ah) 20
Anker 65
Anlaßschleifringläufer 91
Anlaßwiderstand 99
Anode 5 u. ff.
Aräometer 19
Arbeit 181 u. ff.
Arbeit im Wechselstromkreis 78 u. ff.
Augenblicksgeschwindigkeit 150
Außenpolmaschine 66 u. f.

Ballistische Kurve 165
Beschleunigung 152
Beschleunigungsarbeit 181
Bewegung, gleichförmige 147 u. ff.
—, gleichmäßig beschleunigte 152 u. ff.
—, krummlinige 185
—, relative 125
—, ungleichförmige 147 u. f.
Bewegungsenergie 182
Bezugssystem 125
Bleiakkumulator 18 u. f.
Blitz 34 u. f.
Blitzschutzeinrichtung 36 u. f.
Blockkondensator 44
Bruno, Giordano 195

Coulomb 27

Dielektrikum 41 u. ff.
Dielektrizitätskonstante im Vakuum 42 u. f.
—, relative 42 u. f.
Dissoziation 6 u. ff.
Doppelpendel, elektrisches 32
Doppel-T-Anker 65 u. f.
Drehbewegung 147
Dreheiseninstrument 65
Drehfeld 88 u. f.
Drehkondensator 45
Drehmoment 139 u. f.
Drehstrom 82, 88 u. ff.
Drehstrommotor 88 u. ff.
Drehzahl 99, 187
Dreieckschaltung 89 u. f.
Dreieckspannung 85
Dreiphasenstrom 82 u. ff.
Dreiphasenstromgenerator 83, 87
Dreiphasenwechselstrom 82
Durchschnittsbeschleunigung 186
Durchschnittsgeschwindigkeit 150 u. f.
Dyn 177
dynamoelektrisches Prinzip 93
Dynamomaschine 93
Dynzentimeter 181

Effektivwerte 69
Eigenfrequenz 62
Einphasenwechselstrom 84
Elektroden 5 u. ff.
Elektro-Filterschlot 34
Elektrolyse 6 u. ff.
Elektrolyt 6 u. ff.
Elektrolytkondensator 45
Elektrolytofen 10
Elektrometer 33
—, Braunsches 33
Elektroskop 32 u. f.
Element, galvanisches 13 u. ff.
—, Kupfer-Zink 13 u. f.
—, Kohle-Zink 15, 21 u. f.
Elmsfeuer 37
Eloxal-Verfahren 12, 16
Energie, Satz von der Erhaltung der 17, 21, 53
Energie der Lage 182
—, kinetische 182 u. ff.
—, potentielle 182 u. ff.
Entstörungskondensator 43
Erg 181
Erregermaschine 67

Fallbeschleunigung 158, 160
Fall, freier 157 u. ff.
Farad 40
Faraday, Michael 40, 48
Feld, elektrisches 28 u. ff., 37
—, homogenes 29
—, inhomogenes 30
—, radiales 31
Feldlinie 28 u. ff.
Filterkammer 33
Fliehkraft 190 u. ff.
Fremdzündung 110 u. ff.
Frequenz 62

Galilei, Galileo 159, 197
Galvani, Luigi 13
Galvanisieren 11
Galvano 12
Galvanostegie 11
Galvanoplastik 12
Generatoren 59 u. ff.
Geschwindigkeit, kosmische 191, 201 u. ff.
Geschwindigkeit-Weg-Gesetz 159
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz 149, 155, 159
Gewitter 34 u. ff.
Glättungskondensator 43
Gleichgewicht, indifferentes 143 u. f.
—, labiles 143
—, stabiles 142
Gleichgewichtslage 142 u. f.
Gleichstromgenerator 91 u. ff.
Gleichstrommotor 96 u. ff.

Gleitreibung 168 u. ff.
Glimmlichtoszillograph 63
Gravitationsgesetz 197 u. ff.
Gravitationskonstante 198
Gravitationskraft 197
Großtransformator 106
Gruppenschaltung 23
Gruppenumspannwerk 114

Haftreibung 168
Hauptleiter 82
Hauptschlußgenerator 94
Hauptschlußmotor 98
Hauptumspannwerk 114 u. f.
Heavisideschichten 37
Henry 56
Hertz, Heinrich 62
Hertz (Hz) 62
Hintereinanderschaltung von Elementen 22 u. f.
— von Kondensatoren 46 u. f.
Hofmannscher Wasserzersetzungsapparat 6

Induktion, elektromagnetische 47 u. ff.
Induktionsgesetz 53 u. f.
Induktionsschmelzofen 110
Induktionsspannung 48 u. ff.
Induktionsstrom 48 u. ff.
Induktivität 56
Induktor 67
Innenpolmaschine 67
Ionenleitung 9

Joule 181

Kapazität eines Akkumulators 20
— eines Kondensator 39 u. ff., 46 u. f.
Katode 5 u. ff.
Katodenstrahloszillograph 64
Keplersche Gesetze 196
Keramikkondensator 44
Kerntransformator 105
Kilopond 127
Kilopondmeter 181
Kilovoltamperestunde 80
Kilowattstunde 80
Kippmoment 145
Klingeltransformator 106
Kollektor 93
Kollektormotor 98 u. ff.
Kommutator 92
Komponente 134
Kondensator 38 u. ff.
Kondensatoren, technische 43 u. ff.
Kopernikus, Nikolaus 195
Korrosion, elektrolytische 16
Kraft 125 u. ff.
—, elektrostatische 28 u. f.
Kräftedreieck 133
Kräftepolygon 133
Kraftmesser 127
Kraftmessung, dynamische 179
Kraftwerke 112 u. ff.
Kraftwirkung, dynamische 126
—, statische 126
Kreisbewegung, gleichmäßige 187
Kurbelinduktor 65 u. f.
Kurzschlußläufer 88 u. f.
Kurzschlußläufermotor 88 u. f.

Ladung, elektrische 27, 39 u. f.
Läufer 67
Leistung, effektive 69
— im Wechselstromkreis 78 u. ff.
Leistungsfaktor 79 u. f.
Leiterspannung 85
Leiterstrom 82
Leitstrahl 186
Lenin, Wladimir Iljitsch 119
Lenz, Heinrich Friedrich Emil 52
Lenzsche Regel 52
Lichtmaschine 25 u. ff.
Lokalelemente 16

Magnetzündanlage 111
Manteltransformator 105
Masseneinheit 177
Maßsystem 176
Matrize 12
Megapond 127
Mikrofarad 40
Millipond 127
Momentensatz 140
Motor-Generator-Umformer 95 u. f.

Nanofarad 40
Nebenschlußgenerator 94 u. f.
Nebenschlußmotor 98 u. f.
Netztransformator 106
Newton, Isaac 172, 180, 197
Newton 177
Newtonmeter 181

Oberflächenveredlung 11

Parallelogramm der Beschleunigungen 144
— der Geschwindigkeiten 148
— der Kräfte 131
Parallelschaltung von Elementen 23
— von Kondensatoren 46
Periode 62
Phasenschieberanlage 80 u. f.
Phasenverschiebung 74 u. ff.
Picofarad 40
Plattenkondensator 38
Polrad 67
Polsucher 62 u. f.
Pond 127
Primärspule 101 u. f.
Pumpspeicherwerk 118
Punktschweißmaschine 109

Radialkraft 188
Raketenprinzip 203
Reaktorkraftwerk 112 u. f., 120 u. f.
Rechte-Faust-Regel 51
Reglerschalter 25 u. f.
Reibung 168 u. ff.
Reibungskoeffizient 168
Reibungskraft 168
Reibungswiderstand 168
Reibungszahl 168
Reihenschaltung von Elementen 22 u. f.
— von Kondensatoren 46 u. f.
Reihenschlußgenerator 94
Resultierende 131
Rollenschweißmaschine 109
Rollreibung 168 u. ff.
Rotation 142, 146 u. f.
Rotationsschalter 111
Rotor 67

Sammler 17 u. ff.
Säureprüfer 19
Scheinleistung 79 u. f.
Schleifenoszillograph 63 u. f.
Schleifring 90 u. f.

Schlupf 89
Schmelzflußelektrolyse 10
Schweißtransformator 108 u. f.
Schweißumformer 96
Schweißzange 109
Schwerkraft 171
Schwerpunkt 141 u. f.
Schwingung 62
Sekundärspule 101 u. f.
Selbsterregung 93
Selbstinduktion 55
Siemens, Werner von 93 u. f.
Skalar 127
Spannung, effektive 69
Spannungsreihe, elektrochemische 14
—, galvanische 14
Spannungsstoß 56 u. f.
Spitzenbelastungszeiten 118
Sprühelektroden 33 u. f.
Stahlakkumulator 20
Ständer 67
Standfestigkeit 144 u. f.
Standmoment 145
Stator 67
Stern-Dreieck-Schalter 90
Sternpunkt 83
Sternpunktleiter 82
Sternschaltung 89 u. f.
Sternspannung 84 u. f.
Stoßausschlag 39
Stromstärke, effektive 69
Stumpfschweißmaschine 109 u. f.

Taschenlampenbatterie 21 u. f.
Trägheit 172
Trägheitswiderstand 190
Transformator 101 u. ff.
Transformatoren, technische 104 u. ff.
Transformatorenhäuschen 114 u. f.
Transformatorenstation 114
Translation 141 u. f., 146 u. f.
Trimmer 45
Trommelanker 93

Umlaufzahl 187
Umspanner 101 u. ff.

Vektor 127
Vektorparallelogramm 131
Verbundgenerator 94 u. f.
Verbundmotor 98 u. f.
Verschiebungsarbeit 181
Verzögerung 152
Vierleitersystem 83 u. ff.
Volta, Alessandro 13
Voltampere 79
Voltamperesekunde 80

Waltenhofensches Pendel 57 u. f.
Wälzlager 170
Watt 78 u. f.
Wattsekunde 80
Wechselspannung 60 u. ff.
Wechselstrom 61 u. ff.
Wechselstromgeneratoren 65 u. ff.
Wechselstromwiderstand 70 u. f.
Weg-Zeit-Gesetz 149, 155, 159
Wickelkondensator 44
Widerstand des Mittels 166 u. ff.
Widerstand, induktiver 70 u. ff., 75 u. f.
—, kapazitiver 73 u. f., 76 u. f.
—, Ohmscher 70 u. f., 74 u. f.
Widerstandsschweißen, elektrisches 110
Wirbelstrom 57 u. f.
Wirkleistung 79 u. f.
Wirkungsgrad, Ah- 20
—, kWh- 21
— eines Transformators 103 u. f.
Wirkungslinie 127
Wucht 183
Wurf, waagerechter 161
—, schiefer 164 u. f.
—, senkrechter 165 u. f.

Zentralbewegung 186 u. ff.
Zentralkraft 186 u. ff.
Zentrifugalkraft 190
Zungenfrequenzmesser 62

Quellenverzeichnis der Abbildungen

VEB Agfa, Berlin: Abbildung 96/1, 106/2, 110/2 · Bemme, Berlin-Buch: Abbildungen 192/2, 193/1 · Werkfoto VEB Berliner Akkumulatoren- und Elemente-Fabrik, Berlin-Oberschöneweide: Abbildungen 18/1, 24/1 · Werkfoto VEB Buchungsmaschinenwerk Karl-Marx-Stadt, Betriebsabteilung Labor-Prüfgerätebau: Abbildung 64/1 · Wolfgang Brunstein, Güstrow: Abbildungen 75/3, 76/3, 77/3, 82/2 · Werner Bunschuh, Berlin: Abbildungen 22/4, 24/2, 24/3, 45/2, 107/1, 107/2, 107/3 · Dewag-Werbung, Berlin: Abbildung 45/1 · Werkfoto VEB Dieselmotorenwerk Rostock: Abbildung 95/3 · Werkfoto VEB Elektro-Apparate-Werke J. W. Stalin, Berlin: Abbildung 62/1 · Werkfoto: VEB Elektrochemisches Kombinat Bitterfeld: Abbildung 10/1 · Werkfoto VEB Elektroschaltgeräte Dresden: Abbildung 99/1 · H. Fiebig, Berlin: Abbildung 135/2 · Werkfoto Finsterwalder Maschinen GmbH in Verwaltung: Abbildung 93/1 · Flügge, Berlin: Abbildung 115/2 · Werkfoto VEB Funkwerk Erfurt: Abbildung 64/3 · Werkfoto VEB Funkwerk Zittau: Abbildung 108/2 · Presse-Bild L. Gielow, Berlin-Oberschöneweide: Abbildung 11/1 · Kurt Glaß, Brocken: Abbildung 35/1 · Irma Grohnert, Berlin-Oberschöneweide: Abbildung 25/2 · Werkfoto VEB Hochspannungs-Armaturenwerk Radebeul: Abbildung 81/1 · Werkfoto VEB Keramische Werke, Hermsdorf (Thür.): Abbildung 66/2 · Werkfoto VEB Keramisches Werk Hescho-Kahla: Abbildung 44/2 · Photokino Krütgen, Halle: Abbildungen 6/1, 22/1, 38/2, 44/1, 57/2, 63/1, 65/2, 65/3, 95/1, 102/2, 116/1, 116/2, 134/2 · Werkfoto VEB Kyffhäuserhütte, Artern: Abbildung 192/1 · Werkfoto Lokomotivbau – Elektrotechnische Werke „Hans Beimler", Hennigsdorf: Abbildung 23/3 · Archiv PKM, Leipzig: Abbildungen 33/2, 34/1 · Reichsbahndirektion Halle, Bildstelle: Abbildung 136/1 · Werkfoto VEB Sachsenwerk, Dresden-Niedersedlitz: Abbildungen 58/2, 67/1, 67/2, 89/1, 98/1, 106/1 · Staatliche Fotothek Dresden: Abbildung 113/2 · Werner Steinrück, Pforta: Abbildungen 29/1, 30/1a, 30/2a, 31/1a, 32/2, 33/1 · Werkfoto VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht", Berlin-Oberschöneweide: Abbildung 105/2 · Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin, Archiv: Abbildung 12/1 · Zentralbild Berlin: Abbildungen 20/1, 109/2, 110/1, 114/1, 115/1, 117/2, 120/1, 120/2, 121/1, 121/2, 123/1, 124/1.