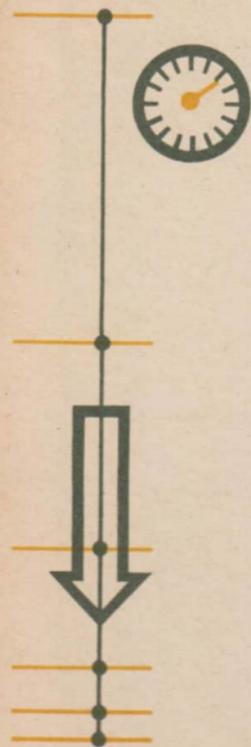


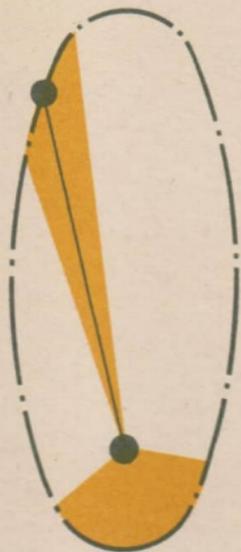
9



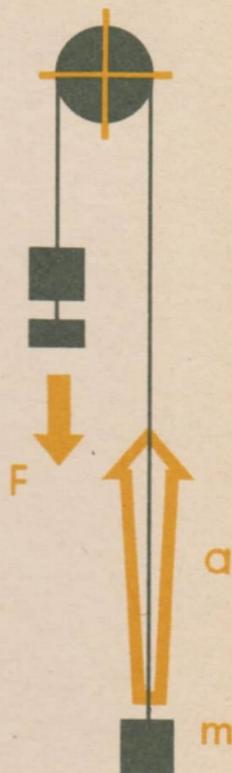
**PHYSIK**



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



$$A_1 = A_2$$



1585

Freier Fall

Galileo Galilei  
1564 bis 1642

1609

Keplersche  
Planetengesetze

Johann Kepler  
1571 bis 1630

1685

Grundgesetze der  
Mechanik

Isaac Newton  
1642 bis 1727



## Schaltzeichen:

Von links oben nach rechts  
unten

Kondensator, stetig verstellbar

Galvanische Spannungsquelle

Leitungsabzweigung

Galvanometer

Galvanische Spannungsquelle  
mit 20 V

Schalter

Glimmlampe

Batterie mit n Elementen

Gleichstromgenerator

Schmelzsicherung

Wechselstrom

Gleichstrommotor

Elektrometer

Gleichstrom

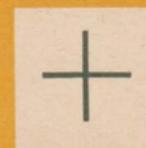
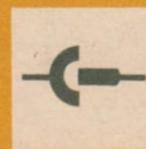
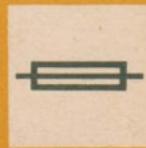
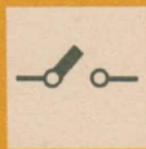
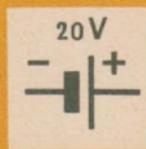
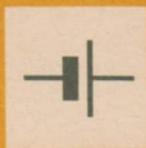
Buchse und Stecker

Spannungsmesser

Leitungskreuzung

Steckdose

Stromstärkemesser



# Physik

Lehrbuch für die Oberschule · Klasse 9



VOLK UND WISSEN

VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1969

Verfaßt von  
Wolfgang Brunstein (Elektrizitätslehre Seite 5 bis 72),  
Dr. Wolfgang Manthei (Elektrizitätslehre Seite 73 bis 112),  
Dr. Wolfgang Rzymiski (Mechanik)

Das Physikalische Praktikum wurde zusammengestellt von  
Erich Busch, Willy Heller, Horst Lehmann und Heinrich Paucker

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik  
als Schulbuch bestätigt

Ausgabe 1965

Sechste, durchgesehene Auflage

Redaktion: Werner Golm, Willi Wörstenfeld

Umschlag: Axel Dehlsen

Vorsatz: Edgar Schellenberg nach einem Entwurf von Ing. Günter Meyer

Typografische Gestaltung: Atelier Volk und Wissen Berlin

ES 11 H · Bestell-Nr. 020902-6 · Preis: 2,30 · Lizenz-Nr. 203 · 1000/68 (DN)

Vervielfältigungsgenehmigung: 1/48/68

Satz: VEB Druckhaus „Maxim Gorki“ Altenburg (D IV/1/8)

Druck: Karl-Marx-Werk PöBneck (V/15/30)

<b>Elektrizitätslehre</b>	<b>5</b>
Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten	6
Die chemischen Spannungsquellen	11
Grundlagen der Elektrostatik	22
Die elektromagnetische Induktion	36
Der Wechselstrom	52
Dreiphasenwechselstrom	73
Gleichstrommaschinen	87
Transformator	95
Energieversorgung	104
<b>Mechanik</b>	<b>113</b>
Die Kraft	115
Das Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften	120
Das Gleichgewicht der festen Körper	130
Die gleichförmige Bewegung	140
Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung	145
Die zusammengesetzte Bewegung	156
Die Newtonschen Grundgesetze der Mechanik	164
Die Kreisbewegung	177
Die Gravitation	185
Die mechanische Energie	194
<b>Anhang</b>	<b>204</b>
1. Physikalisches Praktikum	204
2. Lösungen	215
Namen- und Sachwortverzeichnis	217

## Verwendete Symbole

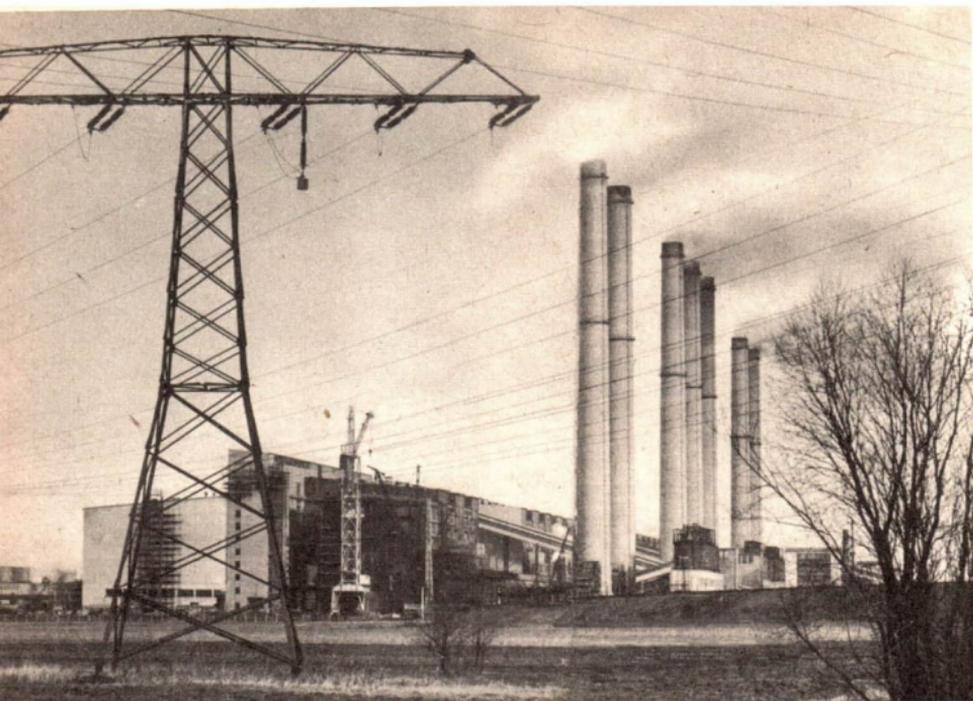
● Fragen und Aufgaben

**V** Versuche

■ Beispiele

**!** Achtung! Vorsicht!

Fragen, Aufgaben und Versuche,  
die im Anhang die Lösung enthalten,  
sind durch eine farbige Zahl,  
Aufgaben mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad  
durch einen Stern gekennzeichnet



## Elektrizitätslehre

Bisher haben wir im Physikunterricht einige bedeutsame Grundgesetze der Elektrizitätslehre kennengelernt. Dabei haben wir uns fast ausschließlich mit dem Gleichstromkreis beschäftigt. Wir wissen aber aus unseren Erfahrungen im Haushalt und in der Produktion, daß in unserem Energieversorgungsnetz überwiegend mit Wechselstrom gearbeitet wird. Wir müssen uns in der 9. Klasse zunächst noch mit einigen weiteren Gesetzmäßigkeiten der Elektrizitätslehre vertraut machen, bevor wir uns dem Wechselstromkreis zuwenden. Erst in der 10. Klasse werden wir mit der Betrachtung von Funk und Fernsehen die Elektrizitätslehre abschließen.

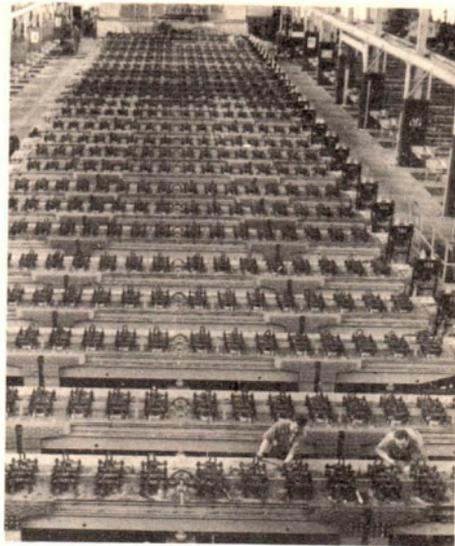
In unserer sozialistischen Gesellschaftsordnung muß sich jeder junge Mensch sehr gründlich mit der Elektrizitätslehre vertraut machen; denn es gibt keinen Beruf, in dem man ohne diese Kenntnisse auskommt. In der Berufsausbildung wird auf den Grundkenntnissen aus der Schule aufgebaut und das notwendige Spezialwissen vermittelt, damit junge Menschen zum Beispiel gute Facharbeiter, Techniker und Ingenieure werden können.

# Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten



Im Chemieunterricht wurden die Grundlagen der Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten behandelt. Es wurde unter anderem erklärt, wie man sie technisch ausnutzen kann, um Grundstoffe wie Aluminium, Natrium, Kalium, Kupfer und Chlor (Bild) zu gewinnen. Elektrochemische Vorgänge werden in vielen Zweigen der Produktion angewendet.

Einige Beispiele sollen im folgenden beschrieben werden; zunächst werden die Grundlagen wiederholt.



## 1. Die Elektrolyse

### 1.1. Die Dissoziation

Stoffe, die in wäßriger Lösung oder als Schmelze den elektrischen Strom leiten, heißen **Elektrolyte**.

**Wäßrige Lösungen von Säuren, Basen und Salzen sowie Salzschnmelzen leiten den elektrischen Strom.**

Die Leitfähigkeit der elektrolytischen Flüssigkeiten beruht auf der **Dissoziation**.

**Einen Vorgang, bei dem durch Auflösen eines Elektrolyten in Wasser frei bewegliche, getrennte Ionen auftreten, bezeichnet man als elektrolytische Dissoziation.**

Salzsäure  $\text{HCl}$  dissoziiert im Wasser in negativ geladene Chlorid-Ionen  $\text{Cl}^-$  und positiv geladene Wasserstoff-Ionen  $\text{H}^+$ . Die elektrische Ladung der Ionen kommt hierbei dadurch zustande, daß der Wasserstoff des Chlorwasserstoffmoleküls ein Elektron an das Chlor abgibt.

Bei Salzen sind die Ionen schon im Kristallgefüge vorhanden.

Die folgende Übersicht (S. 7 oben) zeigt Beispiele für Dissoziationen.

In den wäßrigen Lösungen starker Säuren und Basen und der Salze sind nahezu alle Moleküle dissoziiert; so stehen viele Ladungsträger zur Verfügung. Diese Lösungen

allgemeine Gleichung	Beispiel
Säure $\rightleftharpoons$ Wasserstoff-Ionen und Säurerest-Ionen	$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2 \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
Base $\rightleftharpoons$ Metall-Ionen und Hydroxid-Ionen	$\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^-$
Salz $\rightleftharpoons$ Metall-Ionen und Säurerest-Ionen	$\text{Na}^+\text{Cl}^- \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$

leiten den elektrischen Strom gut; sie erreichen jedoch nicht die Leitfähigkeit der Metalle.

Wassermoleküle dissoziieren in Wasserstoff-Ionen  $\text{H}^+$  und Hydroxid-Ionen  $\text{OH}^-$ . Von etwa einer Milliarde Wassermolekülen ist aber nur eines dissoziiert, so daß die Leitfähigkeit reinen Wassers sehr gering ist.

## 1.2. Der Ionenstrom

Bringt man in eine Elektrolytlösung zwei Elektroden, die an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen sind, so wirken zwischen den Ionen und den Elektroden Kräfte (Bild 7/1).

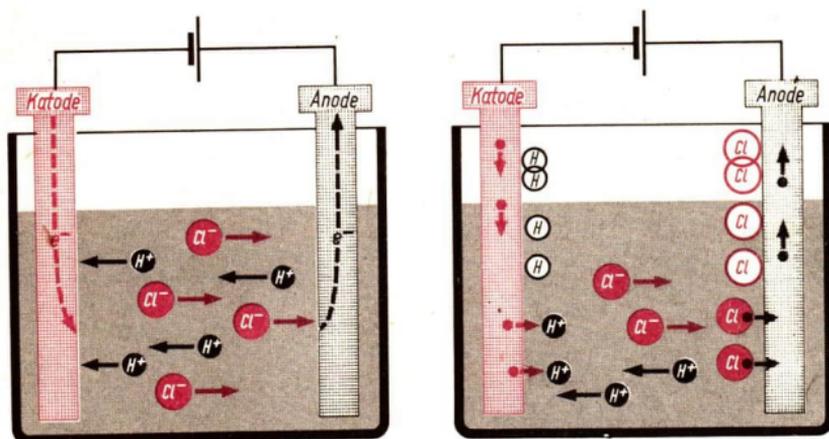
Von der negativen Elektrode (Katode) werden die positiven Ionen angezogen und wandern zu ihr; man nennt sie **Kationen**, von der positiven Elektrode (Anode) werden die negativen Ionen angezogen und wandern zu ihr; man nennt sie **Anionen**.

Kationen können sein: Wasserstoff-Ionen, Metall-Ionen.

Anionen können sein: Säurerest-Ionen, Hydroxid-Ionen.

An der Katode nehmen positive Ionen Elektronen auf; an der Anode geben negative Ionen Elektronen ab.

Bild 7/1 Ionenleitung in Salzsäure



In dem Teil des Stromkreises, der aus metallischen Leitern besteht, bewegen sich Elektronen von der Spannungsquelle zur Katode und von der Anode zur Spannungsquelle.

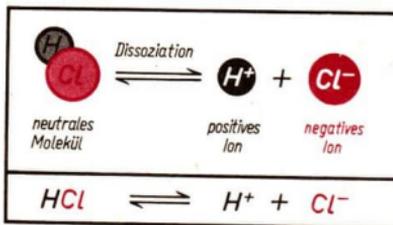
Ionen sind Träger elektrischer Ladungen. Zwischen Elektroden, die unter Spannung stehen, und Ionen wirken Kräfte, so daß die positiven Ionen zur Katode und die negativen Ionen zur Anode wandern.

### 1.3. Die elektrolytische Zersetzung

Auf Grund der beschriebenen Dissoziation und der Eigenschaften der Ionen können die Bestandteile chemischer Verbindungen aus Elektrolytlösungen voneinander getrennt gewonnen werden.

Dissoziation eines Chlorwasserstoffmoleküls in ein Wasserstoff-Ion und ein Chlorid-Ion

Dissoziation	$\text{HCl} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$
Vorgänge an den Elektroden	<b>Katode</b> $2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}$ $2 \text{H} \rightarrow \text{H}_2$
An der Katode wird Wasserstoff, an der Anode wird Chlor abgeschieden.	<b>Anode</b> $2 \text{Cl}^- - 2\text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cl}$ $2 \text{Cl} \rightarrow \text{Cl}_2$



Die chemische Zersetzung eines Elektrolyten durch den elektrischen Strom heißt **Elektrolyse**.

Die Wasserstoff-Ionen aus dem dissoziierten Wasser entladen sich leichter als manche Metallionen (z. B. Natrium- und Kaliumionen). Dadurch wird Wasserstoff abgeschieden, und die Metallionen bleiben in der Lösung. Sie bilden zum Teil mit den Hydroxid-Ionen Hydroxide.



## 2. Technische Anwendungen der Elektrolyse

### Elektrolyse in der chemischen Industrie

Durch Elektrolyse werden viele Stoffe in technischen Großverfahren aus ihren Verbindungen gewonnen, zum Beispiel Aluminium, Zink, Blei, Natrium, Kalium und Chlor. Das Bild zeigt eine Anlage zur elektrolytischen Gewinnung von Zink.

## Galvanostegie

In Behältern aus chemisch beständigem Material befindet sich die Lösung eines Salzes des Metalls, aus dem ein dünner Überzug auf einem Gegenstand aus einem anderen Metall hergestellt werden soll. Als Anoden werden Platten aus dem Metall eingehängt, aus dem der Überzug bestehen soll, zum Beispiel Nickel, Chrom. Als Katode dienen die Gegenstände. Mit dem Einschalten des Stromes beginnt sich ein dünner Überzug auf den Gegenständen abzuschneiden. Dieser kann sehr dünn, aber fest haftend und gleichmäßig aufgetragen werden. Dieses Verfahren heißt *Galvanostegie*.



## Galvanoplastik

*Galvanoplastiken* sind elektrolytisch hergestellte Abbildungen von Gegenständen. In der Druckereitechnik zum Beispiel prägt man von dem Druckstock aus einer Bleilegierung einen Abdruck in eine Plastfolie. Diese wird durch einen Graphitüberzug leitend gemacht und elektrolytisch mit einer genügend dicken Kupferschicht überzogen. Der Kupferüberzug kann von der Plastfolie abgenommen und zur Verfestigung mit einer Bleilegierung hintergossen werden. Die so entstandene Druckplatte nennt man *Galvano*. Galvanos sind fester als die Druckstöcke. Ähnlich werden Prägestempel für Schallplatten hergestellt.



## Aloxydierung

Zur Oberflächenveredlung des Aluminiums ist das Aloxyd-Verfahren entwickelt worden (elektrochemisch oxydiertes Aluminium). Man hängt Gegenstände aus Aluminium als Anode in ein Säurebad. Bei der Elektrolyse bildet sich auf der Oberfläche des Aluminiums eine dünne Oxidschicht, die fest mit dem Metall verbunden ist. Dadurch wird die Oberfläche gegen chemische Einwirkungen sehr beständig. Da Aluminiumoxid ein schlechter elektrischer Leiter ist, können Aluminiumdrähte durch das Verfahren elektrisch isoliert werden. Die Oxidschicht kann auch gefärbt werden. Suchen Sie Gegenstände aus elektrochemisch oxydiertem Aluminium!



## Fragen und Aufgaben

1. Wie dissoziieren folgende Verbindungen:  
 $\text{HCl}$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ;  $\text{NaOH}$ ;  $\text{NH}_4\text{OH}$ ;  $\text{CaSO}_4$ ;  $\text{AgNO}_3$ ?
2. Überlegen Sie, welche Gefahren für den Menschen aus der Leitfähigkeit des Wassers erwachsen können! Welche Schäden können in elektrischen Anlagen durch die Einwirkung des Wassers auftreten?
3. Im elektrischen Versorgungsnetz wird mit Wechselstrom gearbeitet. Warum wird Wechselstrom nicht zur Elektrolyse benutzt?
4. Warum leitet destilliertes Wasser den Strom kaum? Überlegen Sie, wie die Elektrolyse abläuft, wenn man dem Wasser Schwefelsäure  $\text{H}_2\text{SO}_4$  zusetzt!

## Versuche

- V** 1. Vergleichen Sie experimentell die Leitfähigkeit von Metallen mit der Leitfähigkeit von Elektrolytlösungen! Spannen Sie dazu zwischen zwei Holtzsche Fußklemmen einen Kupferdraht, einen Konstantandraht oder einen mit Natriumchloridlösung getränkten Bindfaden mit jeweils gleicher Länge und gleichem Querschnitt! Verwenden Sie eine Gleichspannung von 4 V und zur Stromanzeige eine Glühlampe mit einer Nennspannung von 3,5 V! Was müssen Sie verändern, wenn bei eingespanntem Bindfaden die Glühlampe beim Schließen des Stromkreises nicht leuchtet?
2. Fertigen Sie sich Polreagenzpapier an! Filtrierpapierstreifen werden in einer Lösung von Natriumchlorid oder Kaliumnitrat getränkt, der etwas Phenolphthaleinlösung zugesetzt ist.  
Legen Sie einen feuchten Streifen dieses Papiers auf eine Glasplatte! Schließen Sie zwei Verbindungsleitungen an eine Gleichspannung von etwa 20 V an und drücken Sie die beiden freien Bananenstecker nebeneinander auf das Papier!  
Beobachten Sie die Veränderungen auf dem Papier und erklären Sie diese!

## ZUSAMMENFASSUNG

Bei der elektrolytischen Dissoziation treten durch Auflösen eines Elektrolyten in Wasser frei bewegliche Ionen auf.

Welche Ladungen tragen die verschiedenen Ionen?

Durch die Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen elektrischen Ladungen entsteht beim Anlegen einer Spannung zwischen den Elektroden in einer Elektrolytlösung ein Ionenstrom in beiden Richtungen.

Wie erfolgt der Ladungstransport in einem geschlossenen Stromkreis, in dem sich eine elektrolytische Zelle befindet?

Mit der Entladung der Ionen tritt eine chemische Zersetzung der gelösten Elektrolyte ein.

Welche Stoffe werden bei der Elektrolyse von Chlorwasserstoff an der Kathode und an der Anode abgeschieden?

## Die chemischen Spannungsquellen

Der VEB Berliner Akkumulatoren- und Elementefabrik ist der größte Betrieb unserer Republik für die Herstellung von elektrischen Batterien. Es werden hier Batterien für verschiedene Taschenleuchten, für Koffer-Rundfunkempfänger und andere Zwecke produziert.

Die Gitterplatten als Hauptbestandteil der Akkumulatoren werden in einer Gießmaschine geformt. Daran anschließend werden die Platten mit einer Bleisulfatmasse gefüllt.



### 1. Galvanische Elemente

#### 1.1. Die Entdeckung des galvanischen Elements

Als die Menschen die Naturerscheinungen noch nicht wissenschaftlich erforschten, sahen sie in elektrischen Vorgängen das Wirken geheimnisvoller, übernatürlicher Kräfte. Zwei Forschern, den italienischen Wissenschaftlern **LUIGI GALVANI** (Bild 11/2) und **ALESSANDRO VOLTA** (1745 bis 1827), gelangen bahnbrechende Entdeckungen auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre.

**GALVANI** beobachtete bei wissenschaftlichen Studien, daß die Muskeln von Froschen zuckten, wenn sie ein Eisengitter berührten, an dem er sie mit Kupferdrähten aufgehängt hatte. Er nahm zunächst an, daß den tierischen Körpern eine besondere tierische Elektrizität inne wohne, die durch Metalle abgeleitet würde. **VOLTA** wiederholte diese Versuche und stellte erstmals fest, daß die Elektrizität



Bild 11/2 **LUIGI GALVANI**  
(1737 bis 1798) Professor für Anatomie an der Universität Bologna

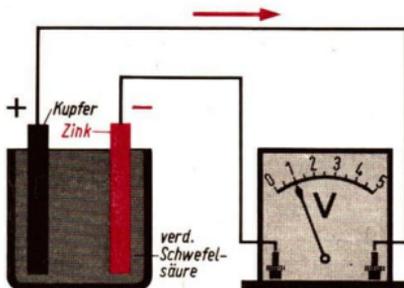
zwischen zwei Metallen entsteht, mit denen man die feuchten Froschschenkel gleichzeitig berührt. (Die feuchten Froschschenkel bilden hierbei die Elektrolytlösung.) VOLTA konstruierte die ersten brauchbaren Spannungsquellen.

**Spannungsquellen, in denen durch chemische Vorgänge eine Spannung entsteht, nennt man galvanische Elemente**

Galvani und Volta schufen trotz vieler Schwierigkeiten die Voraussetzungen für eine wissenschaftliche Erforschung der Elektrizität. Später erkannte man, daß alle elektrischen Vorgänge nach bestimmten, erkennbaren Naturgesetzen ablaufen und stofflicher Natur sind. Übernatürliche, unerklärbare Erscheinungen gibt es auch bei diesen Vorgängen nicht.

## 1.2. Das Zink-Kupfer-Element

1  
**V** Taucht man eine Zink- und eine Kupferplatte in verdünnte Schwefelsäure, so besteht zwischen den beiden Platten eine Spannung von etwa 1 V. Werden die Platten leitend verbunden, so fließt ein Gleichstrom. Die Zinkplatte bildet den Minuspol, die Kupferplatte den Pluspol des Zink-Kupfer-Elements. Nach längerem Betrieb stellt man fest, daß die Zinkplatte sich allmählich auflöst.



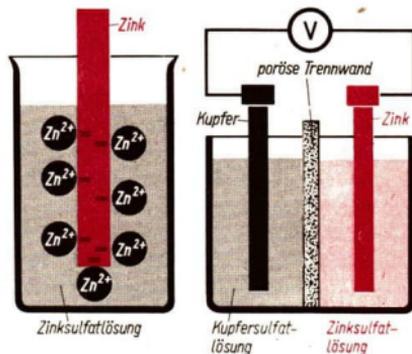
Auch zwischen anderen verschiedenen Metallen oder anderen leitenden Stoffen bestehen in einer Elektrolytlösung elektrische Spannungen.

Der deutsche Physiker WALTER NERNST (1864 bis 1941) hat die Ursache für die Entstehung der Spannung im galvanischen Element genauer untersucht.

Taucht man eine Platte aus chemisch reinem Zink z. B. in Zinksulfatlösung, so gehen

Bild 12/2 (links) Schematische Darstellung der Entstehung einer elektrischen Doppelschicht beim Eintauchen von Zink in Zinksulfatlösung. Es bilden sich positive Zink-Ionen

Bild 12/3 (rechts) Beim Eintauchen von zwei verschiedenen Metallplatten kann zwischen ihnen die Differenz der Spannungen an den Doppelschichten gemessen werden



aus dem Zink positive Zink-Ionen in Lösung (Bild 12/2, links). Die Elektronen dieser Zink-Ionen bleiben auf der Zinkplatte und laden diese negativ. Zwischen der negativen Zinkplatte und den positiven Zink-Ionen bestehen Anziehungskräfte. Diese wirken den Lösungsvorgängen entgegen und führen dazu, daß sich die Ionen nur bis zu einem bestimmten Abstand von der Platte entfernen können. So entsteht zwischen der Zinkplatte und den Zink-Ionen eine elektrische Doppelschicht. Zwischen der Zinkplatte und der Ionenschicht besteht eine bestimmte elektrische Spannung. In entsprechender Weise bilden sich immer Doppelschichten, wenn Metalle in eine Lösung ihrer Salze eintauchen. Die Spannungen der Doppelschichten sind bei den verschiedenen Metallen unterschiedlich. Man kann die Spannung einer Doppelschicht nicht messen; man kann nur die Spannungs-differenz von zwei Doppelschichten experimentell ermitteln. Dazu führt man den Versuch nach Bild 12/3 (rechts) durch.

### 1.3. Die galvanische Spannungsreihe

Die Stoffe, aus denen man galvanische Elemente aufbauen kann, lassen sich in einer Reihe anordnen, die man als *galvanische oder elektrochemische Spannungsreihe* bezeichnet.



Bringt man zwei Stoffe aus dieser Reihe in eine Elektrolytlösung, so entsteht zwischen ihnen eine Spannung. Der in der Reihe links stehende Stoff bildet den Minuspol und der rechts stehende den Pluspol des galvanischen Elements.

Aus dem im Bild 13/1 dargestellten Beispiel erkennt man, daß die Polarität desselben Stoffes, im Beispiel des Bleis, verschieden sein kann. Das zeigt, daß die Eigenschaften der Stoffe nicht allein von ihnen selbst abhängen, sondern auch von dem Zusammenhang, in dem sie stehen.

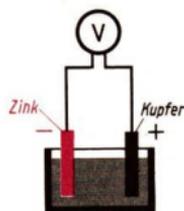
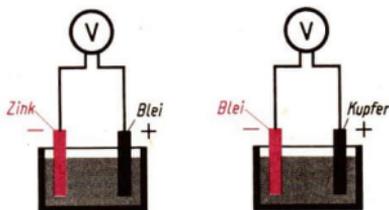


Bild 13/1 Vergleich galvanischer Elemente. Im Kupfer-Blei-Element ist Blei der Minuspol, und im Blei-Zink-Element bildet Blei den Pluspol. Die Summe der Spannungen des Kupfer-Blei-Elements und des Blei-Zink-Elements ergibt die Spannung eines Kupfer-Zink-Elements



## Versuchsauftrag

### Aufgabe:

Überprüfen Sie die Einordnung von Eisen, Kupfer, Blei und Zink in die Spannungsreihe!

### Geräte und Material:

2 Holzsche Fußklemmen  
2 Halter für Elektroden  
verschiedene Elektroden

Glastrog  
Spannungsmesser (5 V)  
Verbindungsleitungen

### Versuchsablauf:

1. Stellen Sie in verdünnter Schwefelsäure Elemente aus Kupfer und den verschiedenen anderen Metallen zusammen und messen Sie die Spannungen!
2. Berechnen Sie die Spannungsdifferenzen zwischen den anderen Metallen und überprüfen Sie diese experimentell, indem Sie Elemente aus ihnen zusammenstellen!

## 1.4. Das Zink-Braunstein-Element

Unter den vielen möglichen galvanischen Elementen wird in der Praxis am häufigsten das Zink-Braunstein-Element verwendet. Die Spannung beträgt etwa 1,5 V. Da die elektrolytische Lösung eingedickt ist, spricht man von Trockenelementen. Als Elektroden dienen ein Zinkbecher und ein Beutel mit einer Braunsteinfüllung ( $\text{MnO}_2$ ). Zur Stromleitung zu dem Braunstein ist ein Kohlestab eingesetzt. Während des Stromflusses geht der Zinkbecher allmählich in Lösung, bis er porös ist, und das Element wird unbrauchbar.

Eine Zusammenschaltung von mehreren Elementen nennt man eine *Batterie*. In der Flachbatterie (Bild 14/1) sind drei Elemente nebeneinander, in der Stabbatterie zwei Elemente übereinander angeordnet. Die Elemente sind in Reihe geschaltet. Ein einzelnes Element heißt auch *Monozelle*.

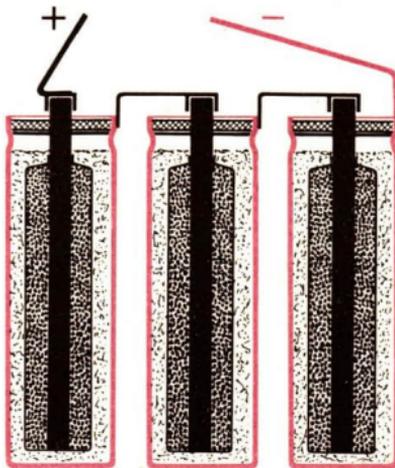


Bild 14/1 Schematische Darstellung der Flachbatterie

## Versuchsauftrag

### Aufgabe:

Führen Sie Reihenschaltungen und Parallelschaltungen von Elementen durch!

### Geräte und Material:

3 Elemente (Monozellen)	6 Blechstreifen	Strommesser
3 Plaststreifen	2 Krokodilklemmen	Glühlampe (3,5 V)
6 Telefonbuchsen	Spannungsmesser	Verbindungsleitungen

### Versuchsablauf:

1. Fertigen Sie nach Bild 15/2 drei Halterungen für Monozellen! (Die Teile sind nach dem Muster im Bild 15/1 zu biegen und mit Telefonbuchsen zu verbinden. Die Telefonbuchsen werden verschraubt.)
2. Vergleichen Sie die Spannung eines Elements mit der Spannung von zwei und auch von drei in Reihe geschalteten Elementen (Bild 15/3)!
3. Schalten Sie zwei Elemente parallel, indem Sie die Kohlestäbe- sowie die Zinkmännel untereinander verbinden!
4. Vergleichen Sie die Stromstärken  $I_1$  und  $I_2$  in den beiden Elementen mit der Gesamtstromstärke  $I_g$  in der Glühlampe (Bild 15/4)!

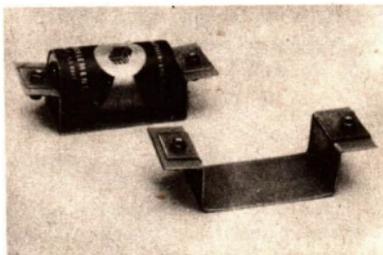


Bild 15/1



Teil 1 aus Plast 1 mm dick, 3 mal  
Teil 2 aus dünnem Blech, 6 mal

Bild 15/2

### Ergebnis (für zwei Elemente):

1. In der Reihenschaltung addieren sich die Spannungen der einzelnen Elemente zu der Gesamtspannung der Batterie. Alle Elemente werden von der gleichen Stromstärke durchflossen.

$$U_g = U_1 + U_2; \quad I_1 = I_2.$$

2. In der Parallelschaltung teilt sich die Gesamtstromstärke auf die Stromkreiszweige auf, so daß gilt:

$$I_g = I_1 + I_2; \quad U_1 = U_2.$$

Die Spannung ist so groß wie am einzelnen Element.

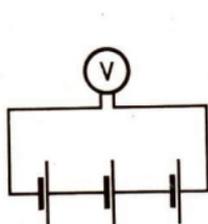


Bild 15/3

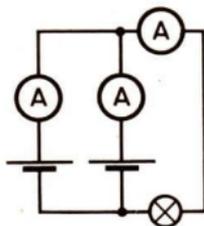
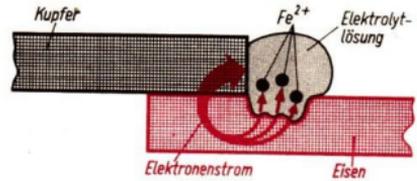


Bild 15/4

Bild 16/1 Korrosion zwischen Kupfer und Eisen



### 1.5. Die elektrolytische Korrosion

In der Technik kann es an vielen Stellen zu einer unerwünschten Bildung von galvanischen Elementen kommen. Die dabei auftretende Materialzerstörung bezeichnet man als elektrolytische Korrosion.

Diese tritt immer ein, wenn Bauteile aus verschiedenen Metallen miteinander verbunden werden und dem Einfluß einer Elektrolytlösung ausgesetzt sind (Bild 16/1).

#### Beispiel

- Wenn in ein stählernes Wasserleitungsrohr ein Messinghahn eingesetzt wird, entsteht ein galvanisches Element. Durch die Berührung der Metalle sind diese Elemente kurzgeschlossen. Das Material des Minuspols löst sich daher allmählich auf. Das ist nach der galvanischen Spannungsreihe der Stahl der Wasserleitung. Besonders auf Schiffen, wo das salzhaltige Seewasser zu Kühlzwecken benutzt wird, können schon nach kurzer Zeit erhebliche Schäden eintreten.

Überlegen Sie, wie es sich auswirken würde, wenn man eine Aluminiumkonstruktion durch Stahlriete verbände!

Was geschieht, wenn der Nickelbelag auf einem Stahlteil schadhafte wird?

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

#### Beispiel

- Man setzt an den gefährdeten Stellen Zinkschutzstücke ein (Bild 16/2). Dann bilden sich galvanische Elemente zwischen dem Zink und den anderen Metallen. Dabei wird zuerst das Zink aufgelöst. Die Zinkstücke müssen häufig ersetzt werden.

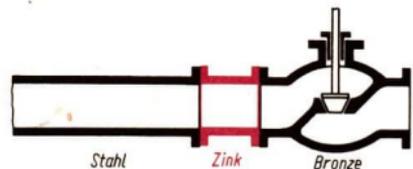


Bild 16/2 Zinkschutzstück in einer Seewasserleitung

## 2. Der Akkumulator

### 2.1. Elektrochemische Energieumwandlung

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

Eine Energieumwandlung findet auch im galvanischen Element statt.

**In galvanischen Elementen wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt.**

Das Metall der negativen Elektrode geht in Lösung und bildet mit dem Elektrolyten eine chemische Verbindung. Im Zink-Braunstein-Element bildet sich zum Beispiel Zinkchlorid. Durch diese Vorgänge wird elektrische Energie frei.

Bei der Elektrolyse werden chemische Verbindungen zersetzt. Dabei wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt.

**Bei der Elektrolyse wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt.**

Ein Versuch zeigt die Umwandlung von elektrischer und chemischer Energie:

2

**V** In verdünnter Schwefelsäure mit zwei Bleiplatten als Elektroden erfolgt eine Elektrolyse. Die Anode überzieht sich mit einer braunen Schicht von Bleioxid. Die Katode verändert sich nicht, an ihr entsteht Wasserstoff. Für diese chemischen Vorgänge wird elektrische Energie aufgewendet.

Die Spannungsquelle wird nach einiger Zeit abgeklemmt. Es besteht jetzt ein galvanisches Element, in dem eine Bleiplatte und eine Blei(IV)-oxidplatte in Schwefelsäure hängen. Die Blei(IV)-oxidplatte bildet den Pluspol, die Bleiplatte den Minuspol des Elements. Schließt man den Stromkreis zum Beispiel über ein Strommeßgerät und eine Glühlampe, so fließt ein Strom. Die chemische Energie wird in elektrische Energie umgewandelt. An beiden Elektroden bildet sich Blei(II)-sulfat.

Diese Vorgänge bilden die Grundlage für die Arbeitsweise der Bleiakkumulatoren.

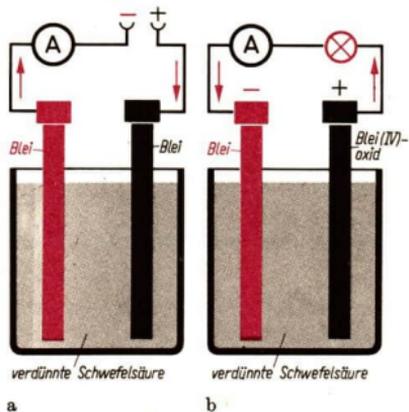


Bild 17/1 a) Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie bei der Elektrolyse von Schwefelsäure

b) Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie in dem galvanischen Element aus Blei und Bleioxid

## 2.2. Der Bleiakкумулятор

In der Technik haben sich Akkumulatoren besonders bewährt, in denen die elektrochemischen Vorgänge zwischen Blei, Bleiverbindungen und Schwefelsäure ablaufen. Bleiakkumulatoren bestehen aus einem säurefesten Glas- oder Plastikgefäß, in dem sich verdünnte Schwefelsäure befindet. In die Säure sind zwei Plattengruppen als Elektroden eingetaucht. Die Platten bestehen aus Gittern, die im entladenen Zustand Blei(II)-sulfat enthalten. Dieser Stoff ist sehr porös, dadurch ist die wirksame Oberfläche der Elektroden sehr groß (Bild 19/1).

Zum Laden wird der Akkumulator an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Beim Entladen hält die Zelle längere Zeit eine Spannung von etwa 2 V. Dann beginnt die Spannung merklich abzufallen. Ist sie auf 1,8 V gesunken, so muß der Akkumulator neu geladen werden (Bilder 18/1 und 2).

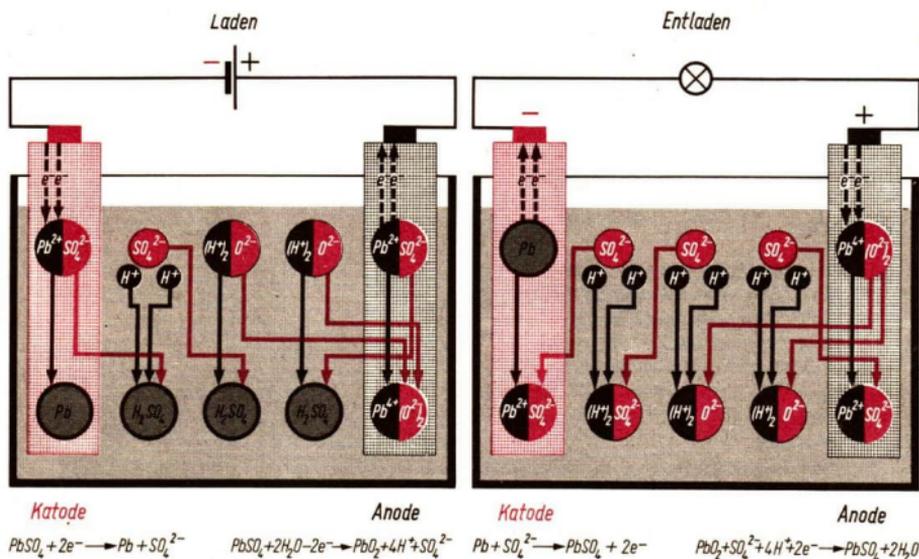


Bild 18/1 Vorgänge im Bleiakкумулятор beim Laden

An der Katode wird aus Bleisulfat Blei. An der Anode bildet sich aus Blei(II)-sulfat Blei(IV)-oxid. Der Säurerest des Blei(II)-sulfats verbindet sich mit Wasserstoff aus dem Wasser zu Schwefelsäure. Beim Laden steigt die Dichte der Säure auf etwa  $1,25 \frac{g}{cm^3}$

Bild 18/2 Vorgänge im Bleiakкумулятор beim Entladen

Das Blei der Katode und das Blei(IV)-oxid der Anode verbinden sich mit dem Säurerest der Schwefelsäure zu Blei(II)-sulfat. Dabei verbinden sich Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser. Die Dichte der Säure verringert sich beim Entladen auf etwa  $1,18 \frac{g}{cm^3}$

Bild 19/1 Bleiakкумуляtor

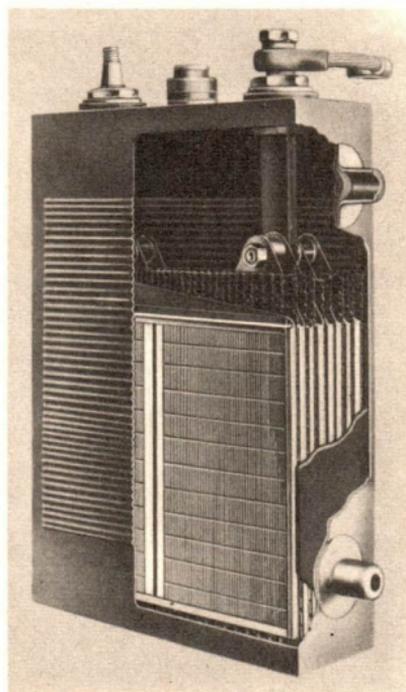
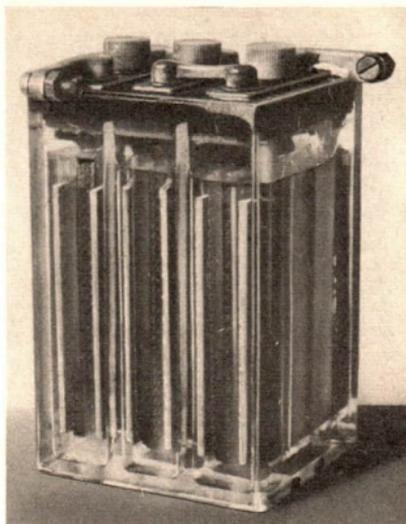
Das Produkt aus durchschnittlicher Ladestromstärke und Ladezeit ergibt die aufgenommene Elektrizitätsmenge (vgl. S. 24). Man mißt diese Elektrizitätsmenge in Amperestunden (Ah) und bezeichnet sie als die Kapazität des Akkumulators. Die abgegebene Elektrizitätsmenge ist immer kleiner als die aufgenommene Elektrizitätsmenge, da ein Teil der chemischen Zersetzungsprodukte, Wasserstoff und Sauerstoff, bei der Ladung aus dem Akkumulator entweicht. Das Verhältnis von abgegebener Elektrizitätsmenge zu aufgenommener Elektrizitätsmenge ist der Wirkungsgrad des Akkumulators.

- Erklären Sie nach dem Archimedisches Gesetz, warum ein Aräometer in Säure mit größerer Dichte weniger tief eintaucht!

Von großer Bedeutung sind beim Akkumulator seine Wartung und seine Pflege. Näheres dazu am Unterrichtstag in der sozialistischen Produktion.

### 2.3. Stahlakkumulatoren

Neben den Bleiakumulatoren gibt es eine zweite Gruppe von Akkumulatoren. Bei ihnen läuft die chemische Umsetzung zwischen Nickel- und Kadmiumverbindungen oder zwischen Nickel- und Eisenverbindungen ab. Das Gehäuse beider Akkumulatoren besteht aus Stahlblech. Als elektrolytische Lösung dient Kalilauge. Stahlakkumulatoren sind gegenüber mechanischen und elektrischen Beanspruchungen unempfindlicher als Bleiakumulatoren. Die Höchstspannung einer Zelle liegt jedoch nur bei 1,25 V (Bild 19/2).





## 2.4. Technische Anwendungen von Akkumulatorenbatterien

### Batterie in einem PKW

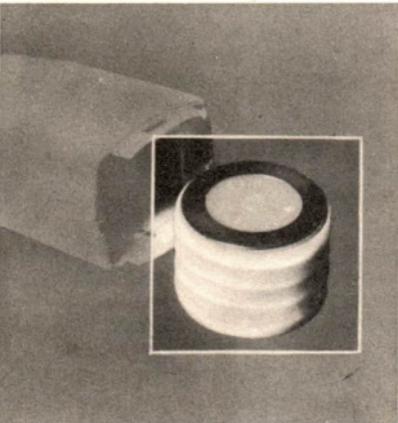
In allen Kraftwagen werden die elektrischen Anlagen bei Stillstand des Motors von einer Akkumulatorenbatterie versorgt. Zum Anlassen des Motors werden der Anlasser, ein Elektromotor, und die Zündung von der Batterie betrieben. Bei laufendem Motor liefert die Lichtmaschine den Strom, durch den auch der Akkumulator aufgeladen werden kann. Welche Spannung hat die im Bild gezeigte Batterie? Wie sind die Akkumulatorenzellen geschaltet?



### Fahrzeuggestromversorgung

Soll eine Akkumulatorenbatterie zum Antrieb eines Fahrzeugs (Paketwagen, Gepäckkarren, kleine Baukräne und Grubenlokomotiven) große Stromstärken liefern, so muß man durch eine Parallelschaltung von Akkumulatorenzellen für eine Stromverzweigung sorgen. Damit eine höhere Spannung als in der Einzelzelle zur Verfügung steht, werden in der *Gruppenschaltung* (s. Schema) in jeden Stromkreisweig mehrere Zellen in Reihe geschaltet.

Geben Sie für die im Schema (Bildecke) angegebene Batterie die Spannung und die zulässige Stromstärke an, wenn die Spannung einer Zelle 2 V und die zulässige Stromstärke einer Zelle 10 A beträgt!



### Kleinakkumulator

In den letzten Jahren sind in der Elektroindustrie kleine Stahlakkumulatoren entwickelt worden. Mit diesen können zum Beispiel Taschenleuchten, Rasierapparate (Bild), Schwerhörigergeräte gespeist werden. Dazu sind kleine Ladegeräte konstruiert worden, die vielfach in das Gerät eingebaut sind, so daß man den Akkumulator z. B. nachts an einer Steckdose aufladen kann.

## Fragen und Aufgaben

- 1. Erklären Sie, wie sich die Konzentration der Säure im Bleiakкумуляtor beim Laden und Entladen ändert!
- 2. Warum sind in einer Akku-Ladestation der Umgang mit offenem Feuer und das Rauchen verboten?
- 3. Welche Schäden und Unfälle können durch das Ablegen von metallischen Werkzeugen auf Akkumulatorenbatterien entstehen?
- 4. Wieviele Zink-Braunstein-Elemente müssen in Reihe geschaltet werden, um eine Batterie mit einer Spannung von 27 V aufzubauen?
- 5. Eine Akkumulatorenzelle liefert eine Spannung von 2 V und hat eine zulässige Stromstärke von 10 A. Entwerfen Sie das Schaltbild einer Batterie aus solchen Zellen, die eine Spannung von 12 V hat und eine Stromstärke von 20 A zulässt!
- 6. Wie müssen Sie Flachbatterien zusammenschalten, wenn Sie eine Spannung von 9 V und eine Stromstärke von 1 A entnehmen wollen? Jede Batterie soll dabei von einer Stromstärke von 0,5 A durchflossen werden.
- 7. Stellen Sie fest, zu welchen Zwecken Akkumulatoren benutzt werden! Lassen Sie sich gegebenenfalls entsprechende Anlagen eines Betriebes erläutern!

## Versuche

- V!** 1. Schrauben Sie auf zwei Stahlschrauben je eine Messingmutter! Legen Sie diese in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure und legen Sie unter den Kopf der einen Schraube ein kleines Stück Zinkblech! Beobachten Sie die Vorgänge über einige Tage!
- 2. Zerlegen Sie eine gebrauchte 9 V-Batterie für den Transistorempfänger „Sternchen“! Skizzieren Sie ihren Aufbau und erklären Sie ihre Wirkungsweise!
- 3. Hängen Sie in ein Becherglas zwei Kohlestäbe aus alten Flachbatterien und füllen Sie das Glas mit Kupfersulfatlösung! Schließen Sie an die Kohlestäbe eine Gleichspannung von etwa 4 V an! Beobachten Sie die Vorgänge und Veränderungen! Nach etwa 5 Minuten klemmen Sie die Spannungsquelle ab und schließen Sie an die Kohlestäbe eine Kleinspannungsglühlampe an! Erklären Sie die Vorgänge!

## ZUSAMMENFASSUNG

### Galvanische Elemente sind elektrochemische Spannungsquellen.

Aus welchen Teilen ist jedes galvanische Element zusammengesetzt?

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

Erläutern Sie den Aufbau dieser Reihe!

In Akkumulatoren kann elektrische Energie in Form chemischer Energie gespeichert werden.

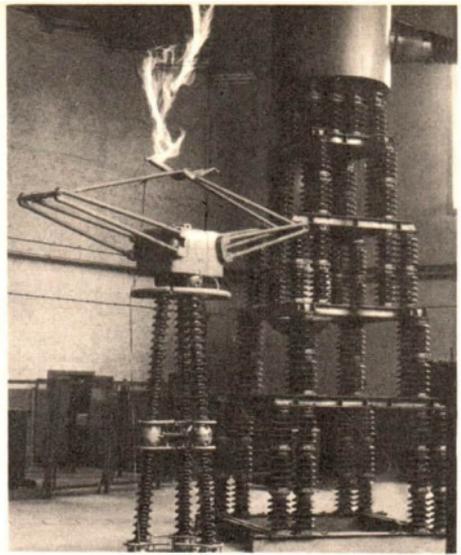
Beschreiben Sie einen Versuch, der das Prinzip des Akkumulators zeigt! Erläutern Sie die Energieumwandlungen! Welche Maßnahmen ergreift man in der Technik, um die Kapazität der Akkumulatoren möglichst groß zu machen?

# Grundlagen der Elektrostatik



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

Solche Hochspannungsanlagen werden in den Forschungsinstituten zum Untersuchen elektrostatischer Erscheinungen benutzt.



## 1. Die elektrische Ladung

### 1.1. Nachweis von Ladungen

Wir haben uns bisher in der Elektrizitätslehre fast ausschließlich mit den Gesetzen des elektrischen Stromkreises beschäftigt. Während ein elektrischer Strom fließt, bewegen sich dauernd Elektronen durch den Stromkreis. Es gibt aber auch elektrische Vorgänge, bei denen der Elektronenstrom nicht dauernd besteht.

Alle Stoffe enthalten in ihren Atomen so viel Elektronen, daß die positiven Ladungen der Atomkerne nach außen neutralisiert werden. Die Atome von Stoffen können zusätzlich Elektronen aufnehmen; sie sind dann negativ geladen. Die Atome können aber auch Elektronen abgeben; sie sind dann positiv geladen. Auf diese Weise können auf Körpern ruhende elektrische Ladungen bestehen.

**Das Gebiet der Elektrizitätslehre, in dem ruhende Ladungen untersucht werden, bezeichnet man als Elektrostatik.**

### Beispiele

- Wir können beobachten, daß ein Kamm trockenes Haar beim Kämmen anzieht und knackende Funkenüberschläge auftreten. Ähnliches zeigt sich an Kleidung aus Dederon oder anderen synthetischen Fasern.

Bei der Herstellung von Geweben, Papier und Plastfolien entstehen durch die Berührung des schnellbewegten Materials mit den Maschinenteilen leicht hohe Aufladungen, die zu Störungen

der Produktion führen können. In einer Webmaschine treten Webfehler auf, wenn sich die Fäden durch elektrische Aufladung abstoßen. An solchen Maschinen müssen besondere Vorkehrungen zum Ableiten der Elektronen getroffen werden.

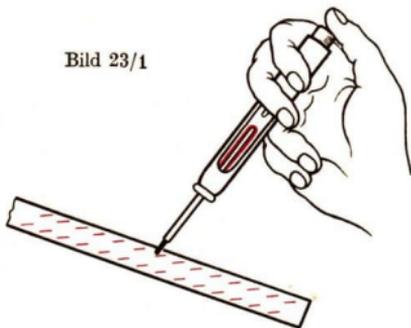
Aus dem Physikunterricht der Klasse 8 wissen wir, daß zwischen geladenen Körpern Kräfte auftreten.

● *In welcher Weise wirken diese Kräfte?*

Sobald eine leitende Verbindung zwischen einem geladenen Körper und einem entgegengesetzt geladenen Körper hergestellt wird, führen die Kräfte zwischen den Ladungen zu einem Elektronenfluß, der die Ladungen ausgleicht. Die Elektronen können auch auf einen ungeladenen Körper oder zur Erde abfließen.

Wie kann man nun feststellen, ob ein Körper positiv oder negativ geladen ist? Wir wissen, daß an einem Polprüfer immer an der Elektrode ein Glimmlicht entsteht, die am Minuspol liegt. So versuchen wir die Elektronen über einen Polprüfer zur Erde abzuleiten.

Bild 23/1



3

**V** Reibt man einen PVC-Stab mit einem Wollappen und berührt ihn dann mit dem Polprüfer, so erscheint an der berührenden Elektrode kurz ein Glimmlicht. Der PVC-Stab war negativ aufgeladen.

Untersuchungen haben ergeben, daß die Ladungstrennung nicht auf das Reiben zurückzuführen ist, sondern allein auf die Berührung zweier verschiedener Stoffe. Durch das Reiben wird lediglich eine bessere Berührung hergestellt.

Diese Vorgänge sind besonders gut an Isolierstoffen zu beobachten. Bei Metallen sind die Aufladungserscheinungen geringer und gleichen sich infolge der besseren Bewegungsmöglichkeit der Elektronen leicht wieder aus.

**Durch das gegenseitige Berühren verschiedener Stoffe tritt eine Ladungstrennung ein.**

**Negative Ladung: Elektronenüberschuß.**

**Positive Ladung: Elektronenmangel.**

## 1.2. Die Elektrizitätsmenge

Eine Spannung von mehreren Millionen Volt ist für unsere Vorstellungen sehr hoch. Man darf aber nicht vergessen, daß diese Spannung allein noch nicht dafür entscheidend ist, welche Wirksamkeit ein Strom haben kann. Außer der Spannung ist auch

die Menge der Ladungsträger von Bedeutung, die beim Ladungsausgleich als Elektronenstrom in Bewegung gesetzt wird. Die Zahl der Elektronen, durch die ein Körper geladen wird, ist aber verhältnismäßig gering, wenn man sie mit der Zahl der Elektronen vergleicht, die sich in einem Stromkreis bewegen. Beim Funkenüberschlag am Kamm oder an Dederonkleidung fließen so geringe Ströme, daß trotz der hohen Spannung die Gefahr einer Verletzung nicht besteht.

Die Gesamtzahl der Elektronen, die ein Körper aufgenommen oder abgegeben hat, entspricht der Ladung. Will man die Ladung  $Q$  bestimmen, so muß man die Stromstärke  $I$ , die bei der Auf- oder Entladung auftritt und die Zeit  $t$ , während der der Strom fließt, messen und aus der Stromstärke und der Zeit das Produkt bilden.

Für kleine Zeitdifferenzen verwendet man das Formelzeichen  $\Delta t$ . Der große griechische Buchstabe  $\Delta$  (Delta) ist das Zeichen für eine Differenz. Hier handelt es sich um die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn und dem Ende eines Ladungsvorganges.

<b>Die Elektrizitätsmenge (elektrische Ladung) ist das Produkt aus Stromstärke und Zeitdauer des Stromflusses.</b>	$Q = I \cdot \Delta t$
--	------------------------

Als Einheit für die Ladung oder Elektrizitätsmenge ergibt sich die Ampere-sekunde. Zu Ehren des französischen Physikers CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB (1736 bis 1806) bezeichnet man eine Ampere-sekunde als ein Coulomb (Kurzzeichen C):

$$1 \text{ As} = 1 \text{ C.}$$

Es ist möglich, gut isolierte Metallkörper von einer Gleichspannungsquelle oder einem geladenen Körper heraufzuladen. Das Entladen wird durch Ableiten der Elektronen zur Erde erreicht, wobei während einer sehr kurzen Zeit ein Strom fließt, dessen Stromstärke jedoch nicht konstant ist. Man nennt einen solchen Vorgang einen Stromstoß.

In einem geladenen Körper wird durch die Ladungstrennung Energie gespeichert. Diese Energie geht durch den Entladungsstromstoß in Wärmeenergie über.

### 1.3. Influenz

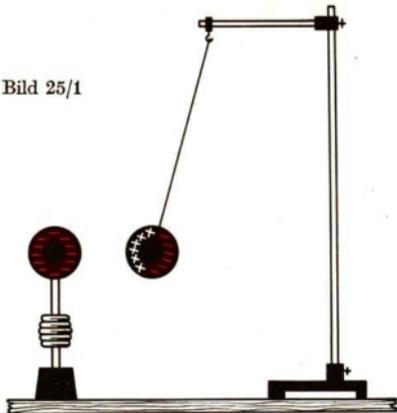
Schon im Altertum war in Griechenland bekannt, daß geriebene Bernsteinstücke leichte Körper anziehen können. Aus dem griechischen Wort für Bernstein ( $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ ) sind die Wörter Elektrizität, elektrisch und Elektron entstanden. Aber erst, als im 18. und 19. Jahrhundert die Physik zu einer systematischen Wissenschaft entwickelt wurde, untersuchten die Naturforscher diese Vorgänge genauer und fanden eine Erklärung für sie.

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

V<sup>4</sup>

Nähert man einer ungeladenen, außenverspiegelten Glaskugel nach Bild 25/1 einen negativ geladenen Konduktor<sup>1</sup>, dann wird sie zu ihm hingezogen. Die leicht beweglichen freien Elektronen werden auf die dem Konduktor abgewandte Seite der Kugel gedrückt. So liegt dem Konduktor gegenüber eine positive Ladung. Berührt man die dem Konduktor abgewandte Seite der Kugel mit einer Erdleitung oder auch nur mit der Hand, so werden Elektronen abgeleitet, und auf der Kugel bleibt eine positive Ladung zurück.

Bild 25/1



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

Auch nichtleitende ungeladene Körper unterliegen der Einwirkung von elektrischen Ladungen. In den Molekülen nichtleitender Körper kann eine unsymmetrische Ladungsverteilung auftreten. Die Moleküle sind polarisiert.

Es gibt Stoffe, bei denen die Moleküle von vornherein polarisiert sind. Sie haben eine *Orientierungspolarisation* (Bild 25/2). In allen Atomen kann eine *Verschiebungspolarisation* eintreten (Bild 25/3).

<sup>1</sup> Konduktor: Ein Metallkörper an einem Isoliergriff zum Übertragen von Elektronen

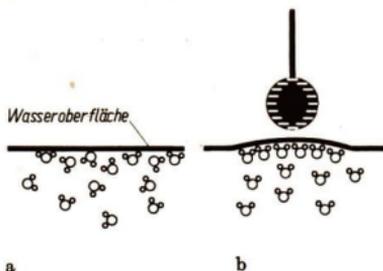


Bild 25/2 Modell der Orientierungspolarisation der Wassermoleküle

- die Moleküle liegen ungeordnet
- durch den Einfluß eines Konduktors richten sich die Moleküle aus, so daß es zu einer Anziehung kommt

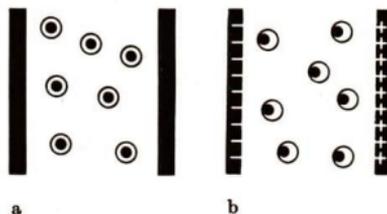


Bild 25/3 Modell der Verschiebungspolarisation

- die Atomkerne liegen im Mittelpunkt der Elektronenhülle
- durch den Einfluß eines elektrischen Feldes liegen die Atomkerne außerhalb des Mittelpunktes der Elektronenhülle

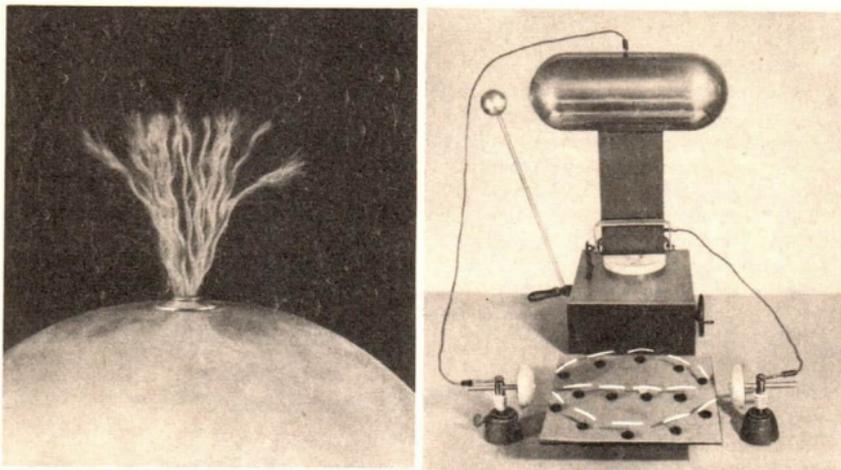


Bild 26/1 Durch den Einfluß eines elektrischen Feldes spreizt sich ein Faserbündel strahlenförmig (links). Nachweis des elektrischen Feldes in einer Ebene mit Papierfähnchen (rechts)

## 2. Das elektrische Feld

### 2.1. Die Feldlinien des elektrischen Feldes

Wir haben gesehen, daß elektrisch geladene Körper auf andere Körper ohne gegenseitige Berührung Kräfte ausüben (Bild 26/1). Man bezeichnet den Zustand eines Raumes, in dem sich elektrisch geladene Körper befinden und in dessen Bereich für jeden Ort Kraftwirkungen auftreten, als *elektrisches Feld*. Das elektrische Feld erfüllt den Raum um eine Ladung allseitig. Bei der Zeichnung elektrischer Felder beschränkt man sich aber häufig darauf, das Feld nur in einer Schnittebene darzustellen (Bilder 27/1 bis 27/4). Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, elektrische Felder nachzuweisen. Gipskristalle, Bärlappsporen oder Haarhäcksel auf einer Glasplatte oder Grießkörner in Öl ordnen sich unter Einfluß eines elektrischen Feldes in bestimmten Linien an. Derartige Feldlinienbilder wurden von dem englischen Physiker MICHAEL FARADAY beobachtet. Er schuf daraufhin eine Modellvorstellung vom elektrischen Feld.

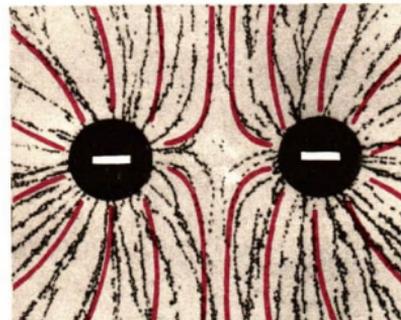
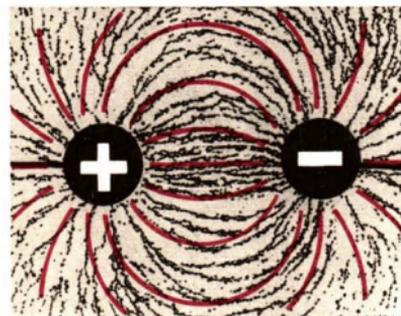
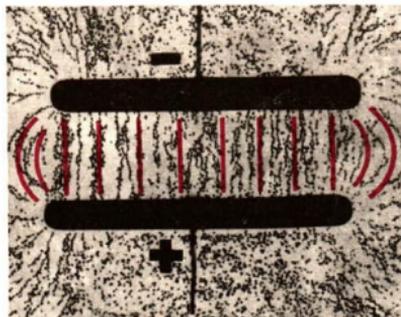
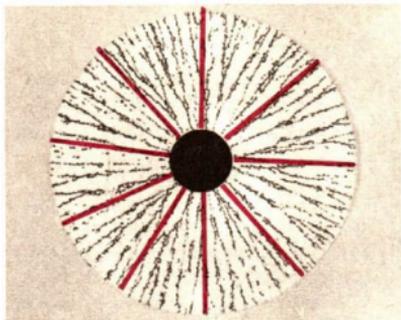
Die Feldlinienbilder entstehen durch das Aneinanderreihen von kleinen Körpern infolge der Kraftwirkungen im elektrischen Feld. Sie geben an, in welcher Richtung die Kräfte im Feld in jedem Punkt wirksam sind. Das Feld ist aber nicht nur entlang der Linien wirksam, sondern es erfüllt den ganzen Raum. Auf welchen Linien sich die Teilchen anordnen, hängt von der zufälligen Lage der Teilchen im Raum ab.

Bild 27/1 Radiales Feld eines elektrisch geladenen Körpers (Grieß in Öl)

Bild 27/2 Zwischen zwei Platten besteht ein *homogenes*<sup>1</sup> Feld. In ihm laufen die Feldlinien geradlinig parallel und haben überall die gleiche Dichte

Bild 27/3 Feldlinienverlauf zwischen ungleichartig geladenen Körpern. Zugkräfte in Richtung der Feldlinien führen zu einer Anziehung

Bild 27/4 Feldlinienverlauf zwischen gleichartig geladenen Körpern. Druckkräfte senkrecht zu den Feldlinien führen zur Abstoßung



Man muß also sagen, daß eine endliche Zahl von Feldlinien nicht ausreicht, um das gesamte Feld zu erfassen. Es ist aber zweckmäßig, mit dem Feldlinienbild zu arbeiten, indem man nur einige Feldlinien zeichnet. Dabei ist zu beachten:

**Durch jeden Punkt läuft eine Feldlinie.**

**Feldlinien können einander nicht schneiden.**

**Die Feldlinien liegen in der Zeichnung dort dichter, wo das Feld stärker ist.**

**Die Richtung der Feldlinien wurde von der positiven zur negativen Ladung festgelegt.**

## 2.2. Der materielle Charakter des elektrischen Feldes

Die elektrischen Felder üben Kraftwirkungen auf Körper aus. Sie haben Energie und können einander gegenseitig durchdringen. Durch eingehende Untersuchungen konnte

<sup>1</sup> homogen: In jedem Punkt gleichartig

nachgewiesen werden, daß sie auch eine (allerdings sehr kleine) Masse besitzen, d. h. daß sie träge sind. Alle diese Eigenschaften existieren ständig.

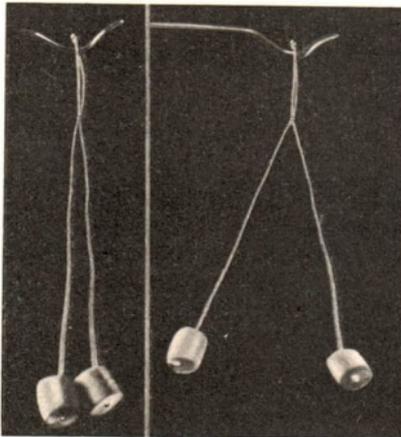
Damit sind auch die elektrischen Felder eine Form der Materie; denn sie bestehen unabhängig von unserem Bewußtsein, sie sind physikalisch durch ihre Wirkungen nachweisbar und meßbar.

Diese Form der Materie unterscheidet sich allerdings erheblich von der uns bisher bekannten Form der stofflichen Materie. Als charakteristische Besonderheiten der stofflichen Materie haben wir unter anderem die Teilbarkeit des Ganzen in seine Teile und die Beständigkeit begrenzter Teilchen kennengelernt.

Die Materie tritt in Form von Stoffen und in Form von Feldern auf.

Wenn wir uns die Naturgesetze nutzbar machen wollen, gilt es zu untersuchen, welche gemeinsamen und für die Technik und Wissenschaft wichtigen Eigenschaften die Formen der Materie, in unserem speziellen Falle das elektrische Feld, besitzen.

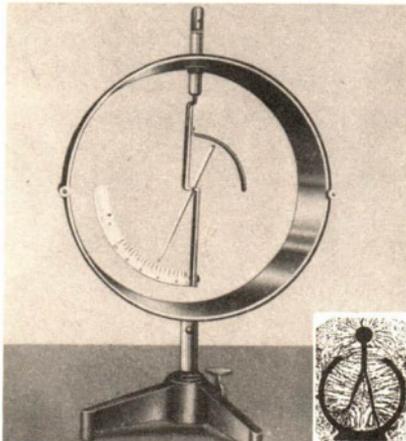
### 2.3. Technische Bedeutung des elektrischen Feldes



#### Elektrisches Doppelpendel aus Holundermarkstückchen

links: ungeladen    rechts: geladen

Zwei Holundermarkstückchen hängen an Seidenfäden. Berührt man sie mit einem geladenen Körper, so werden sie gleichartig aufgeladen und stoßen einander ab. Je größer die Ladungen sind, um so weiter entfernen sich die Stückchen voneinander.

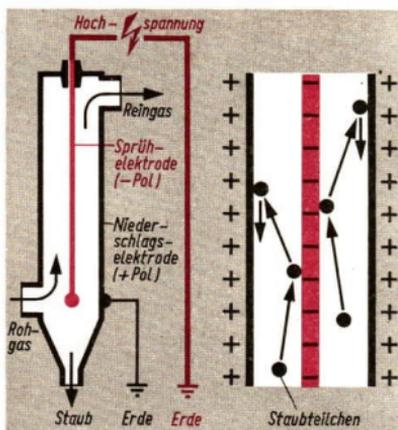


#### Braun'sches Elektrometer

In diesem Elektrometer werden ein Zeiger und ein feststehendes Metallteil durch das Berühren der Konduktorkugel mit einem geladenen Körper gleichartig aufgeladen. Dadurch wird der Zeiger abgestoßen. Die Größe des Ausschlags ist auf einer Skale ablesbar. Sie kann nach kV eingeteilt werden.

## Elektrostatische Gasreinigung

In Schornsteinen und Staubabsauganlagen von Industriebetrieben müssen Ruß- und Staubteilchen möglichst vollständig niedergeschlagen werden, damit schädliche Auswirkungen vermieden werden. Im Staub können auch noch wertvolle Rohstoffe enthalten sein. Die Staubteilchen werden von einer Sprühelektrode unter hoher Spannung aufgeladen und setzen sich an den Wänden der Filterkammern ab. Hier werden sie mechanisch entfernt und in Sammelbehälter gebracht. In Erzröstanlagen können so 98% des Erzstaubes zurückgewonnen werden.



## Ladungsverteilung in Gewitterwolken

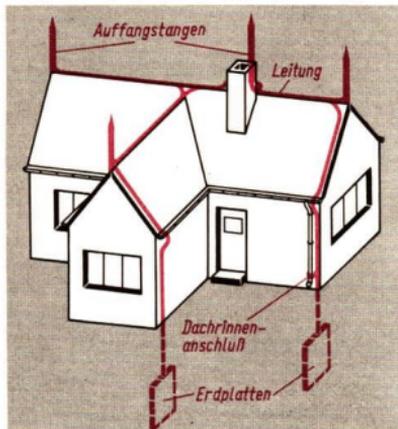
Starke aufströmende Luftmassen reißen in Wolken die leichteren Wassertropfen mit nach oben. Dabei laden sich diese negativ auf, und die unteren Schichten der Wolken bleiben positiv geladen zurück. Die Erdoberfläche hat gegenüber der Atmosphäre immer eine negative Ladung. Die Spannungen in den elektrischen Feldern können bis 100 MV betragen. So schlagen die Blitze zum Ladungsausgleich zwischen den Wolken und zwischen Wolken und Erde über.

Die sich beim Gewitter vollziehenden Vorgänge sind kompliziert und können an dieser Stelle noch nicht ausführlich dargelegt werden. Näheres dazu in Klasse 10.



## Blitzschutzanlage

Zur Erde schlagen die Blitze besonders auf hohe Gebäude und einzeln stehende Bäume über. Nachdem der Amerikaner BENJAMIN FRANKLIN schon 1752 mit Hilfe eines Papierdrachens die Ladungs- und Entladungsvorgänge beim Gewitter untersucht hatte, begann man auf Grund seiner Forschungsergebnisse alle hohen Gebäude mit Blitzschutzanlagen auszurüsten. Durch diese werden eventuelle Blitzeinschläge in ungefährlicher Weise zur Erde abgeleitet. Alle Hochantennen für Rundfunk und Fernsehen müssen eine Erdungseinrichtung besitzen.



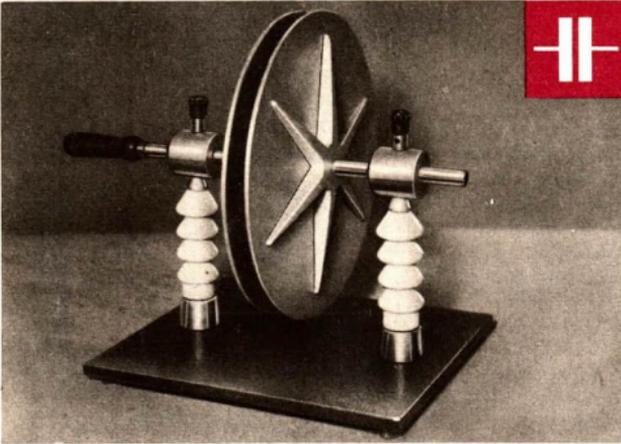


Bild 30/1 Plattenkondensator und Schaltzeichen für Kondensatoren.

Die beiden Platten können entgegengesetzt aufgeladen werden. Durch die Kraftwirkung der Ladungen aufeinander ist eine höhere Aufladung möglich als bei einer einzelnen Platte.

### 3. Der Kondensator

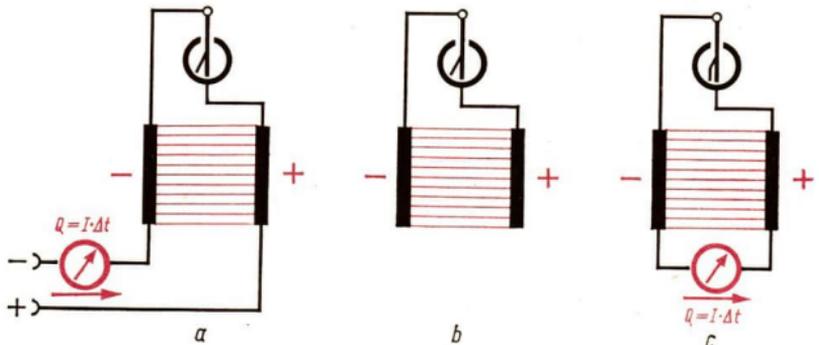
#### 3.1. Ladung und Entladung von Kondensatoren

Bei der Untersuchung des homogenen elektrischen Feldes werden zwei parallele, isoliert aufgestellte Platten verwendet. Diese Anordnung bezeichnet man als Plattenkondensator (Bild 30/1).

5

**V** Ein Plattenkondensator nimmt über ein Spiegelgalvanometer aus einer Spannungsquelle einen Stromstoß auf (Bild a). Auf der einen Platte entsteht ein *Elektronenüberschuß*, auf der anderen ein *Elektronenmangel*. Zwischen den Platten besteht ein elektrisches Feld. Löst man die Verbindungen zur Spannungsquelle, so bleiben Ladung und Feld bestehen (Bild b). Über eine Verbindungsleitung und ein Spiegelgalvanometer wird der Kondensator durch einen Stromstoß entladen (Bild c).

Ein Kondensator kann elektrische Energie in Form eines elektrischen Feldes speichern.



### 3.2. Die Kapazität des Kondensators

Wie überall in der Physik wollen wir auch hier gesetzmäßige Beziehungen genauer untersuchen.

Es gilt hier festzustellen, welche funktionalen Zusammenhänge zwischen Spannung und Ladung am Kondensator bestehen.

6

**V** In einer Versuchsanordnung nach nebenstehendem Schaltbild wird durch Betätigung einer Morsetaste ein Kondensator abwechselnd aufgeladen und entladen. Am Spannungsmesser ist die jeweilige Ladespannung  $U$  abzulesen. Mit einem ballistischen Strommesser<sup>1</sup> sind die bei der Entladung auftretenden Stromstöße mit der Ladung  $Q$  zu messen.

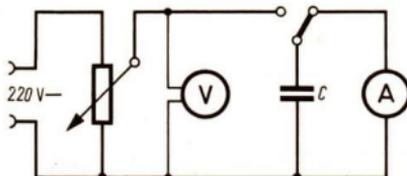


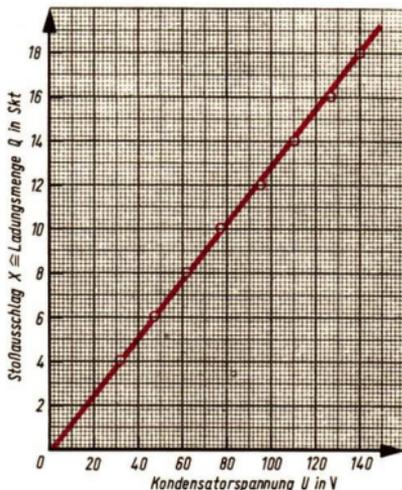
Bild 31/1

Eine Versuchsreihe und die grafische Darstellung der Meßergebnisse (Bild 31/2) ergibt, daß die Ladung der Spannung proportional ist:  $Q \sim U$ .

Der Quotient aus Ladung

und Spannung, der Quotient  $\frac{Q}{U}$ , hat für jeden Kondensator einen konstanten Wert. Man nennt diese Konstante die Kapazität eines Kondensators.

Bild 31/2 Grafische Darstellung der Abhängigkeit der Ladung von der Spannung



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

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

<sup>1</sup> Ballistische Galvanometer (Stoßgalvanometer) messen durch ihren Höchstausschlag einen durch sie in sehr kurzer Zeit entladenen Stromstoß, d. h. die durch sie entladene Elektrizitätsmenge  $Q$ .

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

**Das Farad ist die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge 1 C auf die Spannung 1 V aufgeladen wird.**

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

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

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

Technische Kondensatoren haben Kapazitäten von wenigen Picofarad bis zu einigen Hundert Mikروفард.

Da zu vermuten ist, daß die Kapazität von den Abmessungen des Kondensators abhängig ist, kann man Versuche nach der Anordnung des vorstehenden Versuches mit Kondensatoren verschiedener Plattengröße  $A$  und unterschiedlichem Plattenabstand  $d$  ausführen. Es zeigt sich:

**Die Kapazität eines Kondensators ist der Plattenfläche proportional und dem Plattenabstand umgekehrt proportional.**  $C \sim \frac{A}{d}.$

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

Der Stoff, in dem sich das elektrische Feld ausbildet, wird als Dielektrikum bezeichnet. Verschiedene Dielektrika führen bei gleicher Plattengröße und gleichem Plattenabstand zu unterschiedlichen Kapazitäten eines Kondensators.

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

*Tabelle 1: Dielektrizitätskonstante einiger Isolierstoffe*

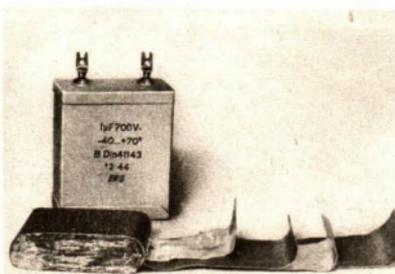
Isolierstoff	$\epsilon_r$	Isolierstoff	$\epsilon_r$
Vakuum	1	Glas, Porzellan	5
Luft	1,006	Glimmer	7
Papier	2	Aluminiumoxid	8,5
Paraffin	2	Tempa S	14
Trolitul	2,4	Condensa F	80
Styroflex	2,5	Epsilon 900	900
Preßspan	3	Epsilon 7000	7000
PVC-weich	4		

### 3.3. Technische Kondensatoren und ihre Anwendung

#### Wickelkondensator

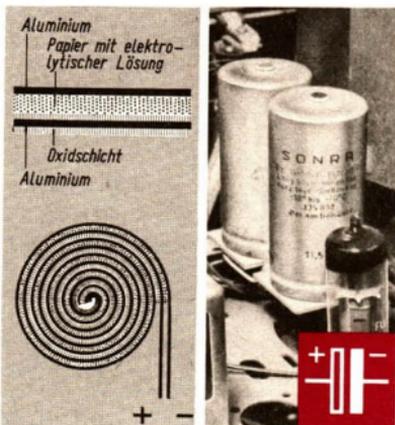
Um möglichst große Plattenflächen nahe aneinander zu bringen, werden Wickelkondensatoren gebaut.

Zwischen zwei Streifen aus Aluminiumfolie liegt dünnes Paraffinpapier oder eine Plastikfolie, zum Beispiel Styroflex. Die Streifen werden aufgerollt, mit einem Isolierstoff vergossen und in einen Metallbehälter eingeschlossen.



#### Elektrolytkondensator

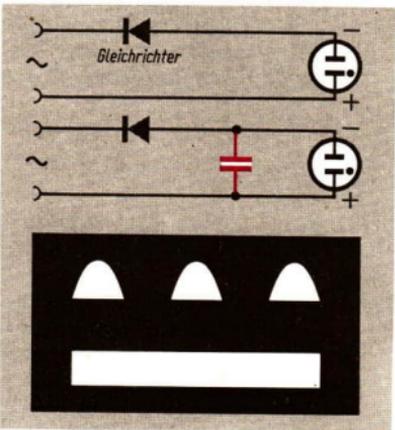
Zwischen zwei Aluminiumstreifen ist ein Papierstreifen gewickelt, der mit einer elektrolytischen Lösung getränkt ist. Diese Lösung hat die Funktion der einen Kondensatorplatte. Der eine Aluminiumstreifen ist elektrolytisch mit einer sehr dünnen Aluminiumoxidschicht als Dielektrikum überzogen. Durch das sehr dünne Dielektrikum mit einer hohen Dielektrizitätskonstante kann man große Kapazitäten auf kleinem Raum unterbringen. Der Pluspol muß immer an der oxydierten Folie liegen. Durch falsche Polung kann die Oxidschicht zerstört werden.

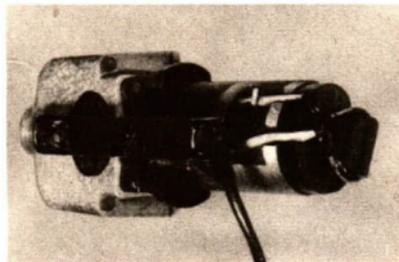


#### Glättung pulsierenden Gleichstroms

Bei der Gleichrichtung von Wechselstrom entsteht ein Gleichstrom mit schwankender Spannung (Skizze oben). Schaltet man einen Kondensator parallel, so wird der Gleichstrom ge glättet. Während der Höhepunkte der Spannung werden Ladungen gespeichert, die während der Tiefpunkte der Spannung wieder abgegeben werden (Skizze unten).

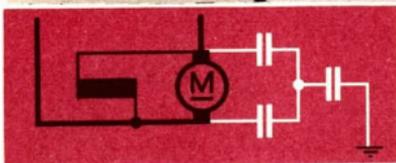
In der Darstellung unter den Schaltskizzen sind die Bilder zu sehen, die man erhält, wenn man das Glimmlicht der Glimmlampe in einem Drehspiegel betrachtet (vgl. S. 57).





### Motor mit Störschutzkondensator

Die Funkenbildung in Elektromotoren führt zu Störungen in Rundfunk und Fernsehen. Man kann sie unterdrücken, indem man eine Kombination von Kondensatoren parallel zum Motor schaltet. Die Kondensatoren nehmen die Ladungen auf, die sonst im Funken überspringen.



### Fragen und Aufgaben

- 1. Mit welchen Hilfsmitteln kann man nachweisen, ob ein Körper elektrisch geladen und ob er positiv oder negativ geladen ist?
- 2. Wie groß ist die in einer Stunde durch eine 40-W-Glühlampe fließende Ladung (Betriebsspannung 220 V)?
- 3. Wie würde sich die Spannung verhalten, wenn man den Plattenabstand eines Kondensators verändert und die Verbindung mit einer Hochspannungsquelle bestehen läßt?
- 4. Erläutern Sie die Wirkungsweise eines Elektrometers! Warum zeigt ein Elektrometer schon einen Ausschlag, wenn man ihm einen elektrisch geladenen Körper nähert?
- 5. Wie arbeitet ein Elektrofilterschlot, und welche wirtschaftliche Bedeutung hat er?
- 6. Wodurch bilden sich die hohen Spannungen zwischen Gewitterwolken aus?
- 7. Wie soll man sich bei Gewitter verhalten?
- 8. Vergleichen Sie die Feldlinienbilder elektrischer und magnetischer Felder!

### Versuche

1. Reiben Sie einen Kamm, ein Lineal oder ein Zeichendreieck aus PVC!
  - a) Halten Sie es über den Kopf eines Mitschülers und beobachten Sie die Bewegung der Haare!
  - b) Nähern Sie das geladene PVC-Stück einem Häufchen kleiner Papierschnitzel auf dem Tisch! Erklären Sie das Verhalten der Teilchen!
2. Halten Sie einen Bogen Papier gegen die Wand eines heißen Kachelofens und bürsten Sie mit einer Kleiderbürste etwa zehnmal darüber! Das trockene Papier wird stark negativ aufgeladen und klebt an der Ofenwand fest. Reißen Sie im verdunkelten Zimmer das Papier von der Ofenwand und beobachten Sie die Funkenüberschläge!

3. In einem Plattenkondensator (Plattenabstand 8 cm) wird mit Hilfe eines Bandgenerators ein elektrisches Feld aufgebaut. Die Spannung zwischen den Platten wird mit einem Elektrometer gemessen.

Vergrößern und verkleinern Sie den Plattenabstand des Kondensators! Erklären Sie die Veränderungen der Spannung, die dabei auftreten!

4. Erzeugen Sie in einem Plattenkondensator bei kleinem Plattenabstand ein elektrisches Feld! Beobachten Sie die Spannung zwischen beiden Platten an einem Elektroskop, wenn Sie eine Glasplatte, eine Platte aus Plast, eine Gummipatte oder ein trockenes Brett zwischen die Platten bringen!

## ZUSAMMENFASSUNG

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

Was unterscheidet einen geladenen von einem ungeladenen Körper?

**Die Einheit der Ladung ist das Coulomb.**

Wie mißt und berechnet man Ladungen?

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

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

**Um einen elektrisch geladenen Körper besteht ein elektrisches Feld.**

Wie kann man elektrische Felder nachweisen?

**Jedes elektrische Feld enthält Energie.**

Wie kann sie in andere Energiearten umgewandelt werden?

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

Welche Möglichkeiten kennen Sie dafür?

**Gewitter entstehen durch weiträumige elektrische Felder.**

Woher erhalten sie ihre Energie?

Welche Energieumwandlungen erfolgen beim Blitzüberschlag?

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

Welche Beziehung besteht zwischen Ladung und Spannung?

Wie ist die Einheit der Kapazität definiert?

Welche Maßnahmen muß man in der Technik ergreifen, um Kondensatoren mit möglichst großer Kapazität herzustellen?

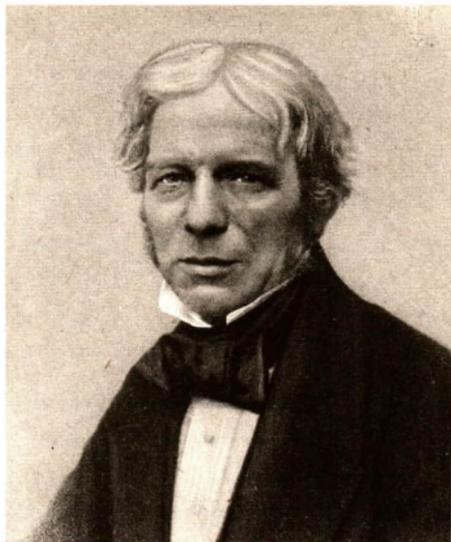
**Kondensatoren werden in der Elektrotechnik vielfältig eingesetzt.**

Beschreiben Sie verschiedene Typen von Kondensatoren!

Bei welchen Anwendungen wird die Speicherfähigkeit der Kondensatoren ausgenutzt?

# Die elektromagnetische Induktion

Dem englischen Physiker MICHAEL FARADAY gelang 1831 eine bedeutende Entdeckung. Es war schon bekannt, daß sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld bewegt. FARADAY stellte fest, daß dieser Vorgang umkehrbar ist. Bewegt man einen Leiter in einem Magnetfeld, so tritt in dem Leiter eine Spannung auf. Auf Grund dieser Erkenntnis konnten Maschinen konstruiert werden, mit denen große elektrische Energien erzeugt werden, wie man sie aus den vorher bekannten chemischen Spannungsquellen nicht gewinnen kann. So hat FARADAYS Entdeckung großen Einfluß auf die Entwicklung der Produktion und der Gesellschaft.



## 1. Erzeugung von Induktionsspannungen

### 1.1. Induktionsspannungen durch Bewegungen einer Leiterschleife

An unseren Fahrrädern benutzen wir eine Dynamomaschine als Spannungsquelle für die Beleuchtung. Öffnet man ihr Gehäuse, so findet man darin eine Spule und Magneten (Bild 55/2). Es soll hier untersucht werden, wie durch das Einwirken von Magnetfeldern in Spulen Spannungen erzeugt werden.

7

**V** Wir bewegen in einer Anordnung nach Bild 36/2 eine Leiterschleife in einem Magnetfeld schnell hin und her. Der Spannungsmesser zeigt durch wechselnde Ausschläge nach beiden Seiten kleine Spannungen an. Deutlicher sind diese Spannungen mit einem Spiegelgalvanometer nachzuweisen.

In den Bildern 37/1 a und b) sind die beiden Endstellungen der Hin- und Herbewegung gezeichnet. Man erkennt, daß die Leiterschleife in der Stellung a den stärksten Teil des Magnetfeldes umschließt, dargestellt

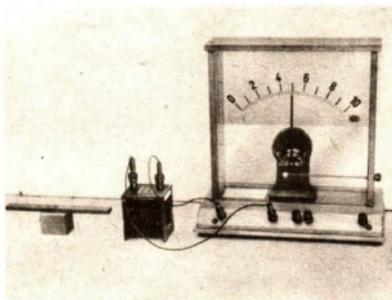


Bild 36/2 Die Bewegung einer Leiterschleife im Magnetfeld eines Hufeisenmagnetes liefert eine elektrische Spannung

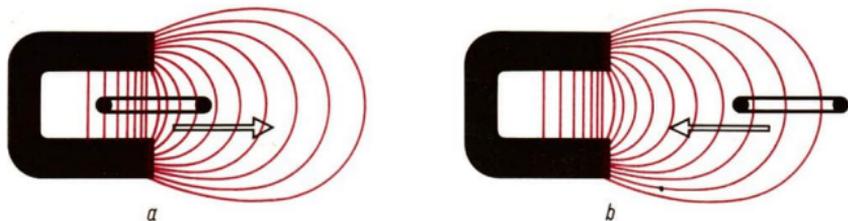


Bild 37/1 Die Ursache für das Auftreten einer Spannung liegt in der Änderung des von der Leiterschleife umschlossenen Teils des Magnetfeldes

durch viele dichtliegende Feldlinien. In der Stellung b wird nur ein schwacher Teil des Magnetfeldes von der Spule umschlossen. Während der Bewegung wird der von der Leiterschleife umschlossene Teil des Magnetfeldes geändert. Weitere Versuche bestätigen, daß diese Änderung des durch die Leiterschleife hindurchgehenden Magnetfeldes die Ursache für das Auftreten der Spannungen ist.

Modellmäßig wird ein stärkeres Magnetfeld durch eine größere Zahl dichter liegender Feldlinien dargestellt. Die Änderung des von einer Leiterschleife umschlossenen Magnetfeldes ist im Feldlinienbild dadurch zu erkennen, daß sich die Zahl der Feldlinien ändert, die durch die Leiterschleife führen.

Man bezeichnet Spannungen, die durch eine solche Einwirkung von Magnetfeldern entstehen, als **Induktionsspannungen** und den Vorgang selbst als **elektromagnetische Induktion**.

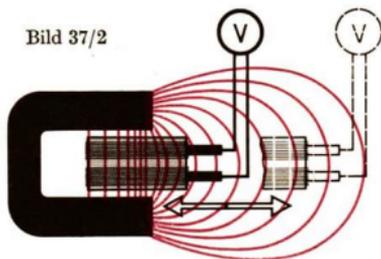
**Wenn das von einer Leiterschleife umschlossene Magnetfeld geändert wird, wird in der Leiterschleife eine Spannung induziert.**

## 1.2. Induktionsspannungen durch Bewegungen von Spulen oder Magneten

8

**V** Wir wiederholen den Einführungsversuch mit einer *Spule*, um größere Induktionsspannungen zu erhalten. Die Windungen der Spule stellen eine Reihenschaltung von Leiterschleifen dar. Die Induktionsspannungen der einzelnen Windungen addieren sich zu einer größeren Spannung.

Bild 37/2



Wir erkennen aus diesem Versuch deutlich, daß die Induktionsspannungen nur so lange auftreten, wie die Bewegung andauert, d. h. solange das von der Spule umschlossene Magnetfeld geändert wird.

Man kann auch schon feststellen, daß die Spannungen bei schnellerer Bewegung größer sind. Mit Änderung der Bewegungsrichtung ändert sich auch die Richtung der Spannung. Diese Zusammenhänge werden wir später genau untersuchen (s. S. 41).

Auch bei einer Spule im Magnetfeld eines Stabmagneten können wir durch Bewegen des Magneten erreichen, daß die Spule einen kleineren oder größeren Teil des Magnetfeldes umschließt.

### Versuchsauftrag

1. Fertigen Sie auf Transparentpapier eine Pause der Zeichnung einer Spule nach Bild 38/1 an!

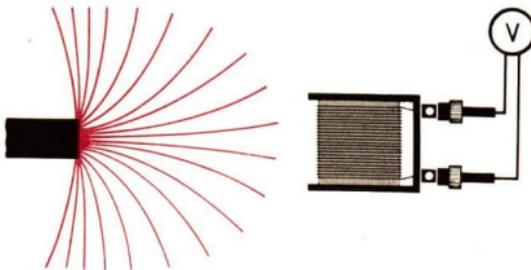


Bild 38/1 Verlauf der magnetischen Feldlinien an einem Pol eines Stabmagnetes und Zeichnung einer Spule zum Anfertigen einer Pause auf Transparentpapier

2. Legen Sie diese Pause auf die Zeichnung der Feldlinien in Bild 38/1 und führen Sie alle Bewegungen aus, die in den Bildern 38/2 a bis c skizziert sind.

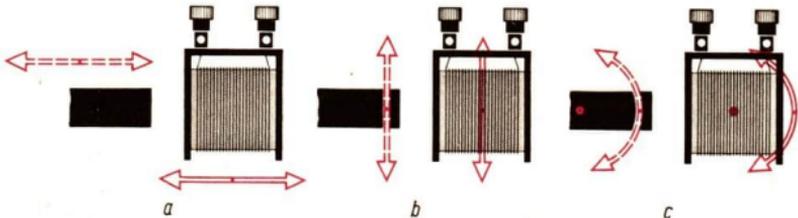


Bild 38/2 Bewegungen einer Spule im Feld eines Stabmagneten

- a) Verschiebung in Richtung der Längsachse des Magneten, b) Verschiebung senkrecht zur Längsachse des Magneten, c) Drehung

3. Beobachten Sie, wie sich während der Bewegungen der von der Spule umschlossene Teil des Magnetfeldes ändert!

4. Führen Sie die Bewegungen auch so aus, daß Sie das Bild der Spule in Ruhe halten und das Bild des Magnetfeldes darunter bewegen!
5. Stellen Sie nach Bild 39/1 eine Versuchsanordnung aus einem Magneten, einer Spule mit 500 Wdg. und einem Spannungsmesser mit Nullpunktmittellage zusammen! Weisen Sie die Induktionsspannungen nach, die Sie mit den verschiedenen Bewegungen erzeugen können!
6. Überlegen Sie, welche Drehbewegung zu keiner Änderung des umschlossenen Magnetfeldes und somit zu keiner Induktionsspannung führt!

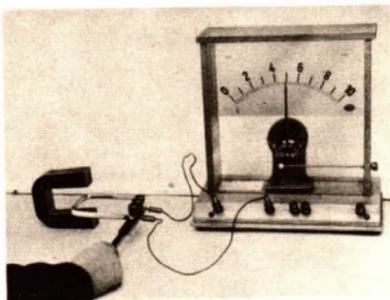


Bild 39/1 Versuchsanordnung zum Nachweis von Induktionsspannungen

### 1.3. Induktionsspannungen durch Verändern der Stromstärke eines Elektromagneten

9

**V** Bringt man die Induktionsspule in das Magnetfeld eines Elektromagneten, so kann man das von der Spule umschlossene Magnetfeld auch ändern, ohne die Spule oder den Magneten zu bewegen.

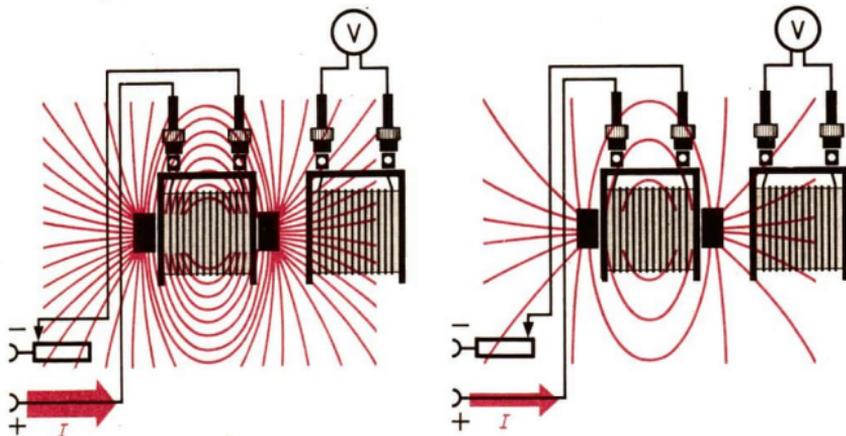


Bild 39/2 Induktionsspule im veränderlichen Feld eines Elektromagneten

Eine Veränderung der Stromstärke in dem Elektromagneten führt zu einer Änderung der Stärke des Magnetfeldes, das die Spule durchsetzt.

Wenn die Stromstärke in einem Elektromagneten verändert wird, tritt in einer Spule, die sich in seinem Magnetfeld befindet, eine Induktionsspannung auf.

- Prüfen Sie, wie es sich auswirkt, wenn man in die Induktionsspule einen Eisenkern einsetzt!

Als Ergebnis unserer bisherigen Untersuchungen fassen wir zusammen:

Während der Änderung des von einer Spule umschlossenen Magnetfeldes wird in der Spule eine Spannung induziert.

Die Änderung des Magnetfeldes kann durch relative mechanische Bewegungen (Verschiebungen oder Drehungen) der Spule oder des Magneten erreicht werden.

An einem Elektromagneten kann das Magnetfeld auch durch Änderung der Erregerstromstärke des Elektromagneten verändert werden.

## 2. Richtung und Betrag von Induktionsspannungen

### 2.1. Die Lenzsche Regel

In unseren bisherigen Versuchen zur elektromagnetischen Induktion treten Induktionsspannungen mit verschiedener Polarität auf. Wir wollen nun untersuchen, von welchen Bedingungen die Richtung des Induktionsstromes und der Induktionsspannung abhängig ist.

10

**V** An einem dünnen Faden wird ein leichter Aluminiumring aufgehängt. Er stellt eine kurzgeschlossene Spulenwindung dar. Stößt man den Nordpol eines Stabmagneten durch den Ring, so weicht der Ring vor dem Magneten etwas aus.

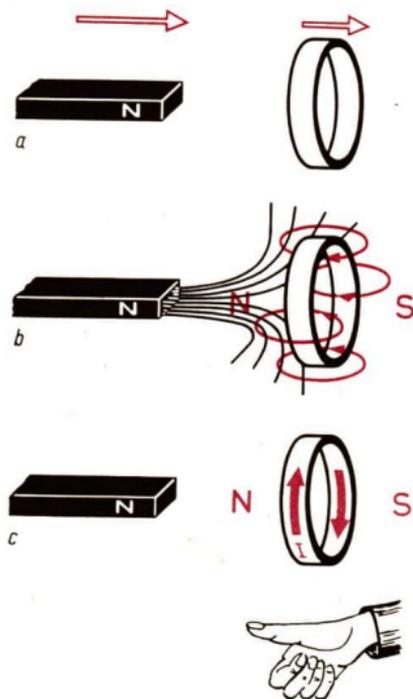


Bild 40/1

- Bewegung des Magneten und des Ringes
- Verlauf der magnetischen Feldlinien
- Richtung des Induktionsstromes

Durch die Bewegung des Magneten gegenüber dem Ring wird in diesem eine Spannung induziert. Dadurch entsteht in dem kurzgeschlossenen Ring ein Induktionsstrom. Dieser bewirkt an dem Ring ein Magnetfeld. Das Magnetfeld liegt offensichtlich so, daß der Ring von dem Stabmagneten abgestoßen wird. Auf der dem Stabmagneten zugewandten Seite des Ringes liegt also ein Nordpol. Wir wenden die *Rechte-Faust-Regel* an, mit der wir uns den Zusammenhang zwischen der elektrischen Stromrichtung und dem Feldlinienverlauf in einer Spule gemerkt haben. Dabei bringen wir den Daumen in Richtung der Feldlinien des Magnetfeldes des Induktionsstromes und finden durch die gekrümmten Finger die Richtung des Induktionsstromes (Bild 40/1).

Zieht man den Stabmagneten schnell aus dem Ring heraus, so folgt der Ring dieser Bewegung etwas. Es muß jetzt auf der Seite des Ringes, die dem Magneten zugewandt ist, ein Südpol liegen. Die Richtung des Induktionsstromes verläuft entgegengesetzt. Arbeitet man mit dem *Südpol* des Stabmagneten, so verlaufen die Bewegungen genauso, der Induktionsstrom fließt aber jeweils entgegengesetzt.

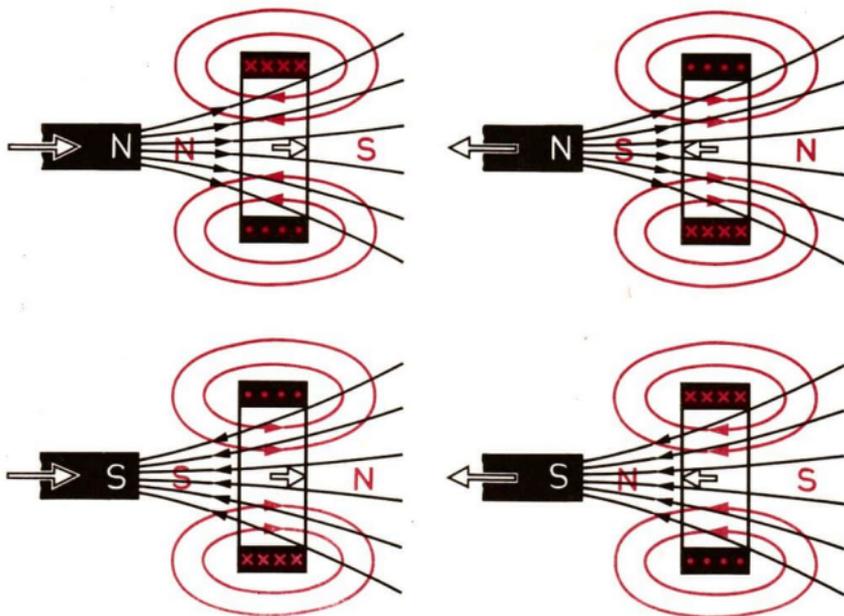


Bild 41/1 Schematische Übersicht über die vier Möglichkeiten des Ringversuches

- ⊗ zeigt, daß der Strom in die Zeichenebene hineinfließt,
- ⊙ zeigt, daß der Strom aus der Zeichenebene herausfließt

Ähnliche Versuche führte der Physiker HEINRICH FRIEDRICH EMIL LENZ (1804 bis 1865) aus und faßte die Ergebnisse in der nach ihm benannten **Lenzschen Regel** zusammen:

**Der Induktionsstrom ist immer so gerichtet, daß er seiner Ursache entgegenwirkt.**

Diese Regel können wir in zweierlei Weise auslegen:

1. In unseren Versuchen ist die Ursache für den Induktionsstrom in der Bewegung zwischen Magnet und Ring zu sehen. Infolge des Induktionsstromes wird in jedem Fall der Bewegungszustand des Magneten gegenüber dem Ring gehemmt, indem der Ring der Bewegung des Magneten folgt.

**Der Induktionsstrom hemmt die mechanische Bewegung, die ihn hervorruft.**

2. Wir haben als Ursache für die Induktionsspannung allgemein die Veränderung des von einer Spule umschlossenen Magnetfeldes kennengelernt. Das Hineinstoßen des Magneten bedeutet ein Verstärken des vom Ring umschlossenen Magnetfeldes. Das Magnetfeld des Induktionsstromes verläuft in diesem Falle immer dem Feld des Stabmagneten entgegen. Es schwächt dieses Feld. Beim Herausziehen des Magneten wird das umschlossene Feld schwächer. Das Magnetfeld des Induktionsstromes verläuft jetzt mit dem Feld des Stabmagneten gleichgerichtet und verstärkt dieses.

**Das Magnetfeld des Induktionsstromes wirkt der Änderung des induzierenden Feldes entgegen.**

### **Versuchsauftrag**

#### *Aufgabe:*

Überprüfen Sie die Lenzsche Regel im veränderlichen Feld eines Elektromagneten!

#### *Geräte und Material:*

Stromversorgungsgerät 20 V	Stativfuß
Schalter	Stativstäbe 500 mm und 250 mm
Drehwiderstand 100 $\Omega$	Kreuzklemme
Spule 500 Wdg.	Aluminiumring
I-Eisenkern	Faden

#### *Versuchsablauf:*

1. Bauen Sie eine Versuchsanordnung nach Bild 43/1 auf!

2. Stellen Sie fest, wie sich der Ring bewegt:
  - a) beim Einschalten, b) beim Ausschalten,
  - c) bei einer Vergrößerung und d) bei einer Verkleinerung der Stromstärke mit Hilfe des Vorwiderstandes!
3. Warum ist die Bewegungsrichtung unabhängig von der Polung der angelegten Spannung?

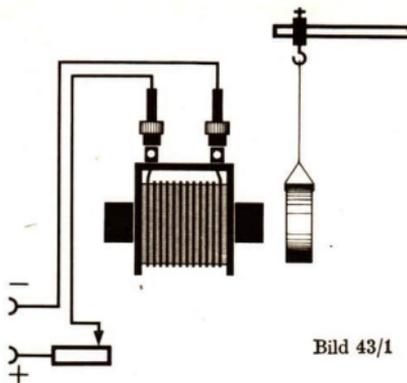


Bild 43/1

## 2.2. Der Betrag der Induktionsspannung

Eine Reihe von Versuchen gibt Auskunft, von welchen Bedingungen die Induktionsspannung abhängig ist (Bilder 43/2 bis 44/1).

Bild 43/2 In jeder Windung einer Spule entsteht eine Induktionsspannung. Da die Windungen in Reihe geschaltet sind, addieren sich die Spannungen

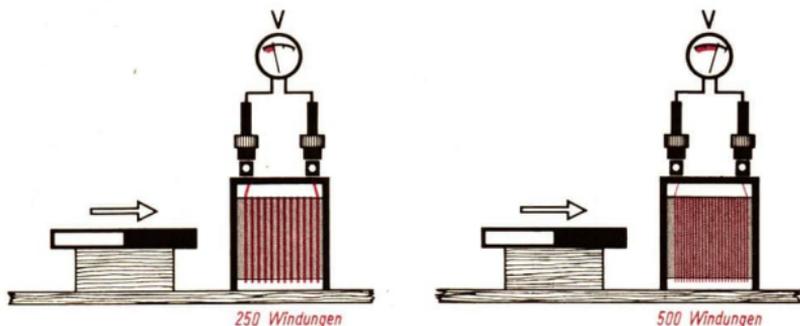
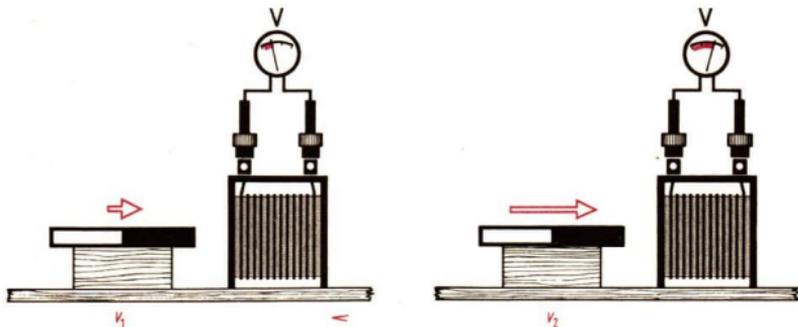


Bild 43/3 Je schneller man das Magnetfeld ändert, um so größer wird die Induktionsspannung. Die Induktionsspannung ist der Geschwindigkeit der Feldänderung proportional



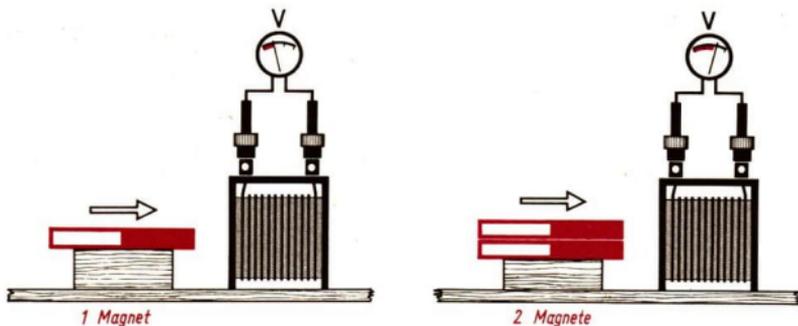


Bild 44/1 Je größer der Unterschied zwischen dem schwächsten und stärksten von der Spule umschlossenen Magnetfeld ist, um so größer wird die Induktionsspannung. Die Induktionsspannung ist der Feldänderung proportional

### 3. Energieerhaltung bei der elektromagnetischen Induktion

Wir haben im Physikunterricht schon früher eine Reihe von Beispielen für Energieumwandlungen kennengelernt. In den verschiedenartigen kraftumformenden Einrichtungen, z. B. an Hebeln, Kurbeln, Wellrädern, gilt immer der Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie. Wir kennen auch Beispiele für die Umwandlung potentieller in kinetische Energie. Ein herabsinkender Körper oder eine gespannte Feder treiben Uhren. Auch kinetische Energie kann wieder in potentielle Energieformen umgewandelt werden.

- *Stellen Sie weitere Beispiele für die Umwandlung verschiedener Formen mechanischer Energie zusammen!*

Weiter wissen wir, daß mechanische Energie und Wärmeenergie ineinander umgewandelt werden können. Wir denken dabei z. B. an die Reibung und an Wärmekraftmaschinen.

- *Suchen Sie auch für diese Art der Energieumwandlung Beispiele, die in der Technik Bedeutung haben!*

Auch die Elektrizität ist eine Energieart. In der Klasse 8 haben wir gelernt, wie sie in Wärme und Licht umgewandelt werden kann.

- *Welche technischen Beispiele kennen Sie für die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie?*

Mit der Bestimmung des mechanischen und des elektrischen Wärmeäquivalents gewannen wir die Erkenntnis, daß Energie in der Natur nicht entstehen oder verloren-

gehen kann, sondern immer nur von einer Art in eine andere umgewandelt werden kann.

**Die Energie bleibt bei allen Umwandlungen erhalten.**

Es kann nur die Qualität der Energie verändert werden, aber nicht ihre Quantität. Das ist ein umfassendes Naturgesetz. Wir werden es noch in vielen anderen Vorgängen immer wieder bestätigt finden.

Mit der elektromagnetischen Induktion haben wir eine weitere Möglichkeit der Energieumwandlung kennengelernt.

- *Welche Energieumwandlung läuft bei der Erzeugung eines Induktionsstromes ab, wenn eine Spule und ein Magnetfeld gegeneinander bewegt werden?*

Wir betrachten noch einmal den Ringversuch (Bilder 40/1 und 41/1). Der Ring folgt der Bewegungsrichtung des Magneten. Zwischen dem Pol des Magneten und dem Magnetfeld des Induktionsstromes im Ring besteht eine mechanische Kraft, die entlang des Bewegungsweges wirksam wird. Es wird also mechanische Arbeit verrichtet. An ihrer Stelle entsteht im Ring elektrische Energie; denn dort treibt eine Induktionsspannung einen Induktionsstrom für kurze Zeit durch den Ring. Der Ring wird dadurch etwas erwärmt. Die Energiemengen sind bei diesem Versuch so klein, daß man sie mit einfachen Mitteln kaum messen kann. Sie wissen, daß Sie auf Ihrem Fahrrad kräftig treten müssen, wenn Sie mit Ihrer Dynamomaschine mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln wollen. Für die Generatoren der Kraftwerke, in denen durch Induktionsvorgänge mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird, müssen erheblich größere mechanische Energien von den Antriebsturbinen abgegeben werden als z. B. von dem Rad, das den Fahrraddynamo antreibt.

**Durch die elektromagnetische Induktion kann mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt werden.**

Diese Energieumwandlung ist auch in umgekehrter Richtung möglich. Die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische wird bei der Behandlung der Elektromotoren näher untersucht.

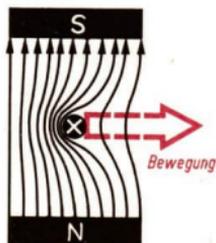
In den beiden gleichartigen Versuchsanordnungen des Bildes 46/1 ist die wechselseitige Umwandlung von elektrischer und mechanischer Energie gegenübergestellt. In einer Merksregel, der Dreifinger- oder UVW-Regel, ist das Ergebnis zusammengefaßt.



Ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld bewegt sich. Die mechanische Bewegungsenergie entsteht aus elektrischer Energie durch die Wechselwirkung der beiden Magnetfelder.



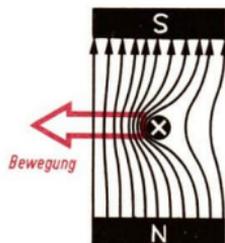
Bewegt man einen Leiter in einem Magnetfeld, so entsteht eine Induktionsspannung. Es muß mechanische Energie aufgewendet werden, um die elektrische Energie zu erhalten.



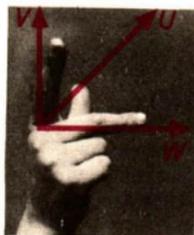
Dadurch entsteht eine Kraft, die den Leiter in Bewegung setzt.



Durch die Feldüberlagerung entsteht auf der einen Seite des Leiters (im Bild links) ein stärkeres Magnetfeld als auf der anderen.



Es entsteht eine Gegenkraft, deren Überwindung mechanische Arbeit erfordert.



Stromrichtung  
Feldlinienrichtung  
Bewegungsrichtung

Daumen  
**U**  
(Ursache)  
Zeigefinger  
**V**  
(Vermittlung)  
Mittelfinger  
**W**  
(Wirkung)

Bewegungsrichtung  
Feldlinienrichtung  
Stromrichtung

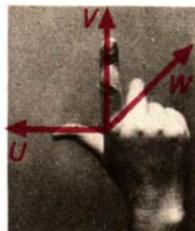


Bild 46/1 Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie (linker Bildteil) und von mechanischer in elektrische Energie (rechter Bildteil). Die Bewegungspfeile sind rot, hohl, die Stromrichtungspfeile schwarz, voll gedruckt. Die jeweilige Wirkung ist gestrichelt dargestellt.

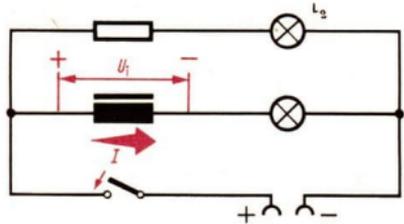
## 4. Die Selbstinduktion

### 4.1. Selbstinduktion beim Ein- und Ausschalten einer Spule

Eine stromdurchflossene Spule befindet sich immer in ihrem eigenen Magnetfeld. Wird die Stromstärke in der Spule geändert, so ändert sich das von der Spule umschlossene Magnetfeld. Es ist zu vermuten, daß diese Feldänderung zu einer Induktionsspannung in der Spule führt. In zwei Versuchen prüfen wir, ob diese Selbstinduktionsspannung beim Ein- und Ausschalten des Stromes wirklich entsteht.

11

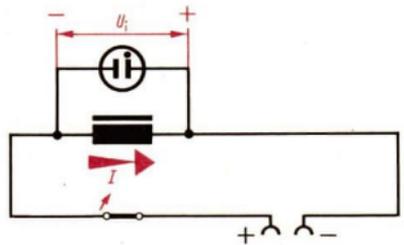
**V** Vor die Lampe  $L_1$  ist eine Spule auf einem Eisenkern geschaltet, vor die Lampe  $L_2$  ein Widerstand, der so eingestellt wird, daß beide Lampen gleich hell leuchten. Beim Einschalten stellt man fest, daß die Lampe  $L_1$  etwas später aufleuchtet als die Lampe  $L_2$ .



Nach der Lenzschen Regel muß die Selbstinduktionsspannung so gerichtet sein, daß sie ihrer Ursache entgegenwirkt. Die Ursache ist das Entstehen des Magnetfeldes. So ist die Selbstinduktionsspannung der angelegten Spannung entgegengerichtet und verzögert das Anwachsen der Stromstärke.

12

**V** Der Nachweis der Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten erfolgt mit einer Glimmlampe. Sie hat eine Zündspannung von etwa 100 V und leuchtet beim Einschalten nicht auf. Im Augenblick des Ausschaltens leuchtet an der einen Elektrode kurz ein Glimmlicht auf. An dieser Elektrode liegt der Minuspol der Selbstinduktionsspannung. Diese ist hierbei erheblich höher als die Spannung der Spannungsquelle.



Nach der Lenzschen Regel ist sie so gerichtet, daß sie den zuvor fließenden Strom kurzzeitig in seiner Richtung aufrecht erhält. Selbstinduktionsspannungen treten auch auf, wenn die Stromstärkeänderung langsamer erfolgt als bei den Schaltvorgängen. Sie sind dann aber kleiner, weil die Zeit für die Feldänderungen größer ist. Die Selbstinduktionsspannungen sind um so höher, je größer die Windungszahl der Spulen ist. Besonders groß werden die Selbstinduktionsspannungen, wenn die Spulen einen Eisenkern enthalten, durch den die Magnetfelder verstärkt werden.

Die Selbstinduktionsspannung in einer Spule wirkt der Stromstärkenänderung entgegen, durch die sie entsteht.

## 4.2. Die technische Bedeutung der Selbstinduktion

### Leistungsschalter in einem Umspannwerk

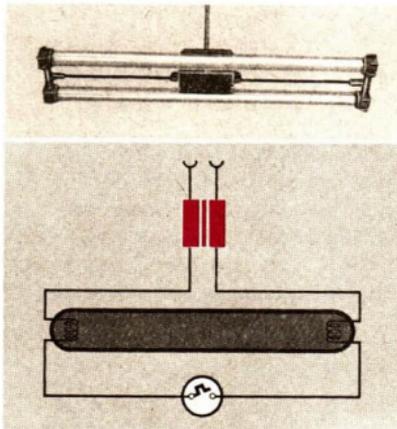
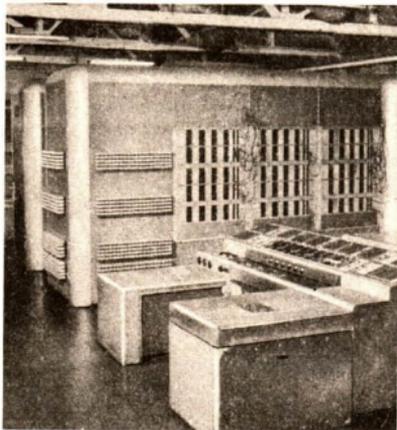
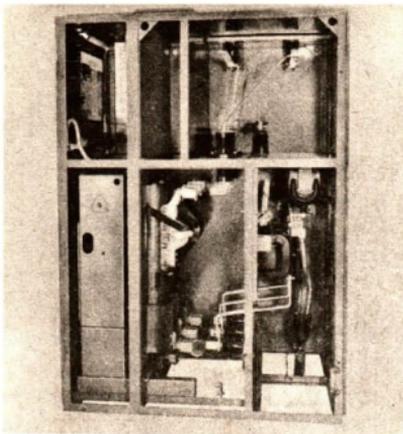
Im Energieversorgungsnetz treten große Selbstinduktionsspannungen auf, da viele Geräte mit Spulen, z. B. Generatoren, Motoren, Transformatoren, angeschlossen sind. Beim Ausschalten würde durch die Selbstinduktionsspannung ein großer Lichtbogen entstehen, durch den die Kontakte schmelzen würden. Darum wird der Lichtbogen zum Beispiel durch Preßluft gelöscht.

### Relaisgesteuerte Rechenmaschine

In der modernen Produktion müssen viele komplizierte Rechnungen ausgeführt werden, die von elektronischen Rechenanlagen übernommen werden können. Eine Art dieser Maschinen arbeitet mit vielen tausend Relais. Durch die Selbstinduktionsspannung in ihren Magnetwicklungen beim Einschalten treten kleine Schaltverzögerungen auf, so daß diese Maschinen langsamer arbeiten als Maschinen mit Elektronenröhren.

### Leuchtstofflampen

Die Selbstinduktionsspannung kann auch technisch sinnvoll genutzt werden. Vor einer Leuchtstoffröhre liegen Drosselspulen (im Bild rot) im Stromkreis. Nach dem Einschalten entsteht zunächst eine Glimmentladung (Näheres in Klasse 10) zwischen zwei Bimetallkontakten im Glimmzünder (im Bild ganz unten). Diese erwärmen sich und schließen den Stromkreis. Durch Absinken der Spannung kühlen sich die Bimetallkontakte ab und öffnen den Glimmzünderstromkreis. Dadurch entsteht in den Spulen eine Selbstinduktionsspannung von über 450 V, die zur Zündung der Leuchtstoffröhre führt. Während des Betriebes sinkt die Spannung an Röhre und Glimmzünder auf etwa 165 V, so daß der Glimmzünder nicht erneut in Betrieb kommt.



## 5. Wirbelströme

13

**V** Zwischen den Polen eines starken Elektromagneten kann eine Kupfer- oder Aluminiumscheibe pendeln. Sobald ein Strom durch den Elektromagneten fließt, wird die Pendelschwingung gedämpft, und das Pendel kommt schnell zur Ruhe (Bild 49/1),

Es entstehen Wirbelströme im *Waltenhofenschen Pendel*. In der Metallscheibe wird durch das Bewegen im Magnetfeld eine Spannung induziert. Da praktisch eine kurzgeschlossene Leiterschleife vorliegt, entsteht ein großer Induktionsstrom. Nach der Lenzschen Regel fließt dieser so, daß er der Ursache der Induktion entgegengerichtet ist. Durch Wechselwirkung seines Magnetfeldes mit dem Magnetfeld des Elektromagneten kommt das Pendel zur Ruhe. Dabei wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt.

In den Eisenteilen aller Generatoren, Elektromotoren und Transformatoren treten Wirbelströme auf. Sie beruhen zum Teil auf der Bewegung in Magnetfeldern, zum Teil auf dem Fließen von Wechselströmen.

Wirbelströme führen zu großen Energieverlusten, da ein Teil der elektrischen Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dem kann man entgegenwirken, indem man die Eisenkerne aus einzelnen Blechen zusammensetzt (Bild 49/3), die durch Ölpapier oder Lackanstrich gegeneinander isoliert werden. Die Wirbelströme in so geblättern Eisenkernen sind erheblich kleiner als in Vollkernen. Das kann man auch am Waltenhofenschen Pendel mit einem kammartigen Einsatz nachweisen. Seine Schwingungen werden kaum gebremst (Bild 50/1).

Das Bremsen von Bewegungen durch Wirbelströme kann man technisch ausnutzen (Bild 49/2). In jedem *Elektrizitätszähler* läuft zwischen den Polen eines Magneten eine Wirbelstromscheibe.

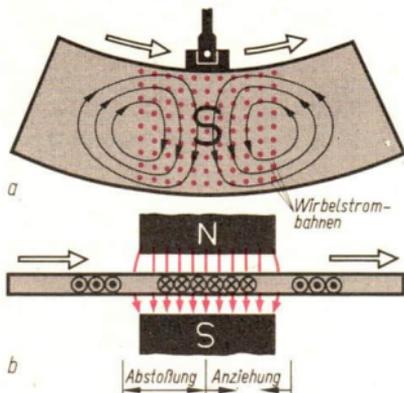
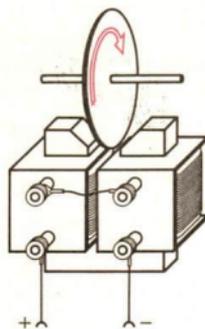
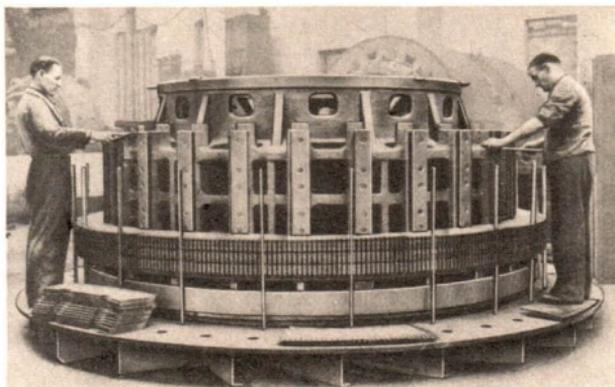


Bild 49/2 Wirbelstrombremse

Bild 49/3 Montage eines Großgenerators



4 [02 09 02]



## 6. MICHAEL FARADAY (1791 bis 1867)

FARADAY war einer der bedeutendsten Physiker. Als Buchbinderlehrling begann er, sich in seiner Freizeit mit chemischen und physikalischen Problemen zu beschäftigen. Er wurde zunächst Laborgehilfe, dann wissenschaftlicher Assistent des englischen Professors DAVY, schließlich wurde er dessen Nachfolger und Direktor des Laboratoriums der Royal Institution. Ihm gelangen auf vielen Teilgebieten der Physik bedeutende Entdeckungen. So hat er einen wesentlichen Anteil an der Untersuchung der Elektrolyse, aber auch auf dem Gebiet der Optik war er erfolgreich tätig. Seine wichtigsten Arbeiten beschäftigen sich mit elektrischen und magnetischen Feldern. Sie bilden die Grundlage für eine umfassende Theorie dieser Felder, die 1873 von dem englischen Physiker MAXWELL (1831 bis 1879) aufgestellt wurde. Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion durch FARADAY war von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung der gesamten Elektrotechnik.

### Fragen und Aufgaben

- 1. Warum ist es möglich, Induktionsspannungen durch Bewegungen von Spulen und Magneten oder durch die Veränderung der Stromstärke in einem Elektromagneten zu erzeugen?
- 2. a) Welche Bedeutung hat die Lenzsche Regel?  
b) Warum würde es dem Satz von der Erhaltung der Energie widersprechen, wenn die Bewegungen des Ringes (Bild 40/1) entgegengesetzt verlaufen würden, als sie es wirklich tun?
- 3. a) Welche Energieumwandlungen laufen bei der Fahrradbeleuchtung ab?  
b) Warum leuchtet die Lampe Ihres Fahrrades heller, wenn Sie schneller fahren?
- 4. Wie kann man Funken vermeiden, die beim Ausschalten durch Selbstinduktion entstehen (vergleiche dazu Bild 48/1)?
- 5. Stellen Sie nutzbringende Anwendungen und störende Einflüsse von Wirbelströmen gegenüber! Wie kann man Wirbelströme möglichst groß machen? Wie kann man sie vermeiden? Erläutern Sie das Bild 50/1!

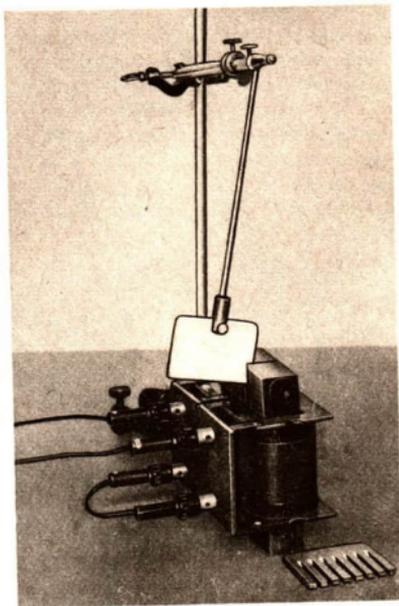


Bild 50/1 Waltenhofensches Pendel

6. Aus Klasse 8 kennen Sie das mechanische und das elektrische Wärmeäquivalent. Danach gilt:

$$1 \text{ kpm} = 2,34 \text{ cal} \quad \text{und} \quad 1 \text{ Ws} = 0,239 \text{ cal.}$$

Wieviel Kilopondmeter sind gleich einer Wattsekunde?

## Versuch

**V** 1. Schließen Sie parallel zu der Magnetwicklung einer elektrischen Klingel einen Dreiseitenspannungsmesser an! Warum ist die so gemessene Spannung beim Betrieb der Klingel höher als die Spannung der angeschlossenen Spannungsquelle?

## ZUSAMMENFASSUNG

**Induktionsspannungen entstehen in Spulen durch Veränderung des von ihnen umschlossenen Magnetfeldes.**

Welche Möglichkeiten bestehen, Magnetfelder in einer Spule so zu verändern, daß Induktionsspannungen auftreten?

**Nach der Lenzschen Regel ist ein Induktionsstrom immer so gerichtet, daß er seiner Ursache entgegenwirkt.**

Was ergibt sich aus der Lenzschen Regel für die Richtung der Magnetfelder des Induktionsstromes?

**Der Betrag der Induktionsspannung ist von der Windungszahl der Spule und von der Stärke und Dauer der Feldänderung abhängig.**

Welche Maßnahmen führen zu größeren Induktionsspannungen?

**Durch die elektromagnetische Induktion kann mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt werden.**

Warum ist der Versuch, mit dem Fahrraddynamo einen Elektromotor anzutreiben, der seinerseits das Fahrrad antreibt, sinnlos?

**Selbstinduktionsspannungen entstehen dadurch, daß das Magnetfeld einer Spule in der Spule selbst eine Spannung induziert.**

Warum ist die Polarität der Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten der beim Einschalten entgegengesetzt?

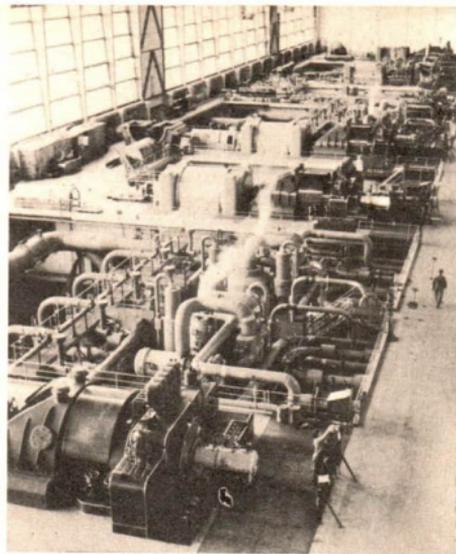
**In Metallteilen bilden sich in veränderlichen Magnetfeldern durch elektromagnetische Induktion Wirbelströme.**

Welche Energieumwandlungen treten bei Wirbelströmen auf?

# Der Wechselstrom



Die elektromagnetische Induktion ermöglicht es, mechanische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Wasser-, Dampf- und Gasturbinen treiben in den Kraftwerken die Spannungserzeuger, *Generatoren*. Diese sind auf der Grundlage der elektromagnetischen Induktion konstruiert. Weil die Antriebsmaschinen Drehbewegungen liefern, sind die Generatoren so gebaut, daß die Induktionsspannungen durch die Drehung von Spulen oder Elektromagneten erzeugt werden.



## 1. Die Erzeugung von Wechselspannungen

### 1.1. Induktion einer Wechselspannung in einer rotierenden Leiterschleife

Wie sind nun die Generatoren gebaut, damit sie mit guten Wirkungsgraden mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln?

Die Wirkungsweise eines Wechselstromgenerators erläutern wir an einem einfachen Modell (Bild 52/2).

14

**V** In einem feststehenden Magnetfeld wird eine Leiterschleife gedreht. Die Enden der Leiterschleife liegen an zwei Schleifringen, auf denen Kohlebürsten schleifen. Sie sind an einen Spannungsmesser angeschlossen. Bei langsamer Drehung zeigt der Spannungsmesser durch wechselnde Ausschläge, daß in der Leiterschleife eine Wechselspannung induziert wird.

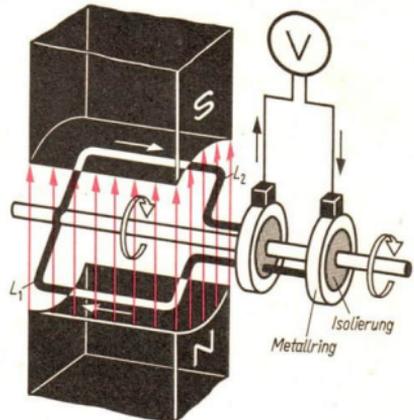
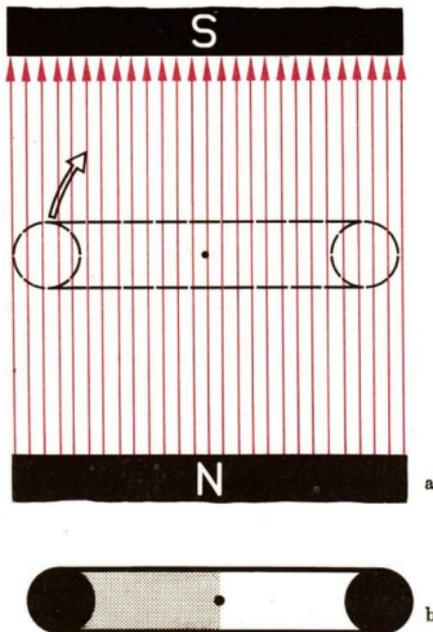


Bild 52/2 Rotierende Leiterschleife im Magnetfeld

- Fertigen Sie sich vom Bild 53/1 b) auf Transparentpapier eine Pause an! Legen Sie die Pause auf das Bild 53/1 a), befestigen Sie dieselbe durch eine Stecknadel (im schwarzen Punkt) und drehen Sie die Zeichnung der Leiterschleife im Uhrzeigersinn langsam jeweils um eine Vierteldrehung weiter! Beobachten Sie dabei, wie sich der von der Leiterschleife umschlossene Teil des Magnetfeldes ändert! Überlegen Sie, wie nach der Lenzschen Regel das Magnetfeld des Induktionsstromes während der einzelnen Vierteldrehungen verläuft! Bestimmen Sie daraus mit Hilfe der Rechten-Faust-Regel, in welcher Richtung der Induktionsstrom jeweils fließt!

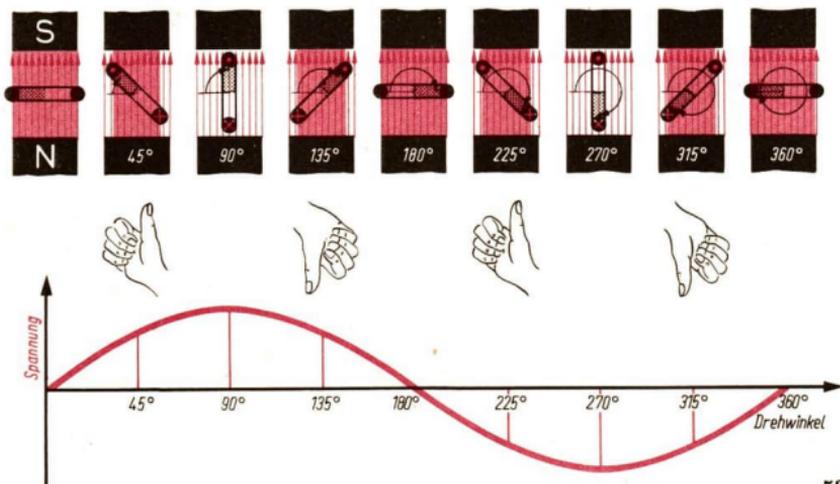


Der Daumen muß in Richtung der Feldlinien des Magnetfeldes des Induktionsstromes in der Leiterschleife gehalten werden. Bei einer Verkleinerung des umschlossenen Feldes laufen diese gleichgerichtet mit den Feldlinien des Magneten, bei einer Vergrößerung des umschlossenen Feldes entgegengesetzt. Die gekrümmten Finger zeigen in die Richtung des Induktionsstromes.

- Prüfen Sie Ihre Ergebnisse am Bild 53/2!

Bild 53/1 a) Magnetfeld  
b) Schnitt durch eine Leiterschleife

Bild 53/2



Der Induktionsstrom ändert seine Richtung, wenn die Leiterschleife die Stellung senkrecht zu den Feldlinien durchläuft. Aus dem Bild 54/1 ist zu erkennen, daß bei einem Drehwinkel von  $45^\circ$  in Nähe dieser Stellung (Bild a) eine kleinere Änderung des von der Spule umschlossenen Magnetfeldes erfolgt als beim gleichen Drehwinkel in der Nähe der Spulenstellung parallel zu den Feldlinien (Bild b). Die Induktionsspannung und die Induktionsstromstärke wechseln ihre Richtung, wenn die Ebene der Leiterschleife durch ihre senkrechte Lage zu den Feldlinien geht. Sie erreichen ihre größten Werte, wenn die Leiterschleife durch die Stellung parallel zu den Feldlinien geht.

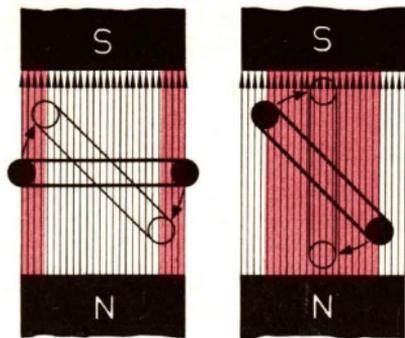


Bild 54/1 Bewegung einer Leiterschleife in einem Magnetfeld

Den zeitlichen Verlauf von Spannung und Stromstärke zeigt das Bild 54/2.

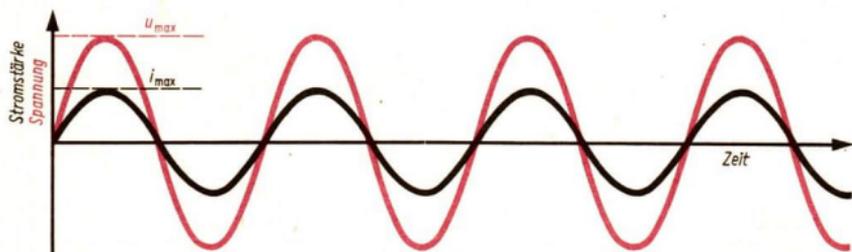


Bild 54/2 Die größte Spannung und die größte Stromstärke erhalten hierbei die Formelzeichen  $u_{\max}$  und  $i_{\max}$

**In einer im Magnetfeld rotierenden Leiterschleife wird eine Wechselspannung induziert.**

## 1.2. Technische Wechselstromgeneratoren

Nachdem wir das Prinzip der Erzeugung einer Wechselspannung erkannt haben, gilt es an den technischen Ausführungen von Wechselstromgeneratoren zu überlegen, wie die Konstrukteure auf die günstigste Weise größere Spannungen und Stromstärken erreichen.

Bild 55/1 zeigt einen *Kurbelinduktor*, wie er in den Feldfernsprechern der NVA verwendet wird, um die Rufglocke im Apparat des Gesprächspartners zu betätigen. In ihm wird nicht nur eine einfache Leiterschleife gedreht, sondern ein Doppel-T-Anker (Bildecke). Hier werden eine Reihe bekannter Gesetzmäßigkeiten ausgewertet. Durch die größere Windungszahl der Spule entsteht

eine höhere Induktionsspannung. Durch den Eisenkern wird das Magnetfeld zwischen den Polen des Hufeisenmagneten kräftiger, und das führt ebenfalls zu höheren Induktionsspannungen.

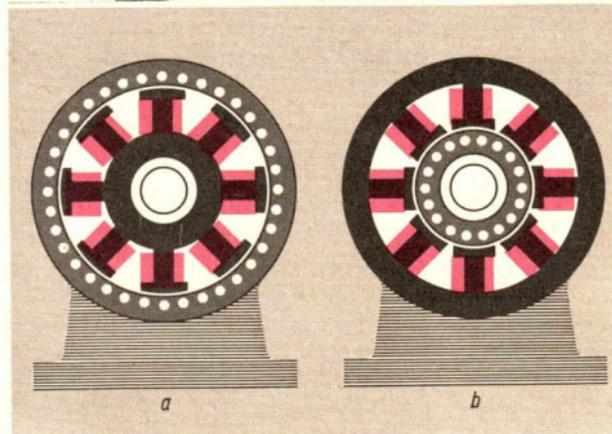
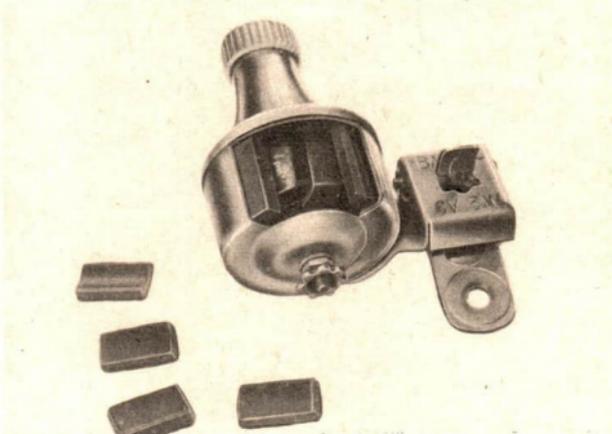
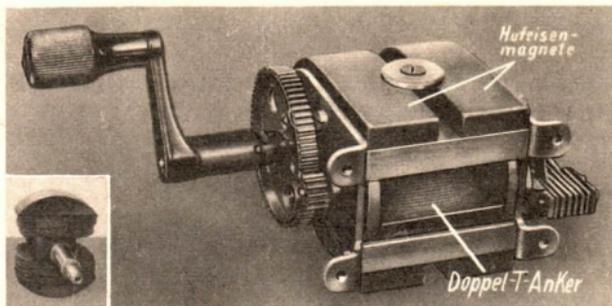
- Warum ist der Eisenkern geblättert? Warum ist eine Zahnradübersetzung eingebaut?

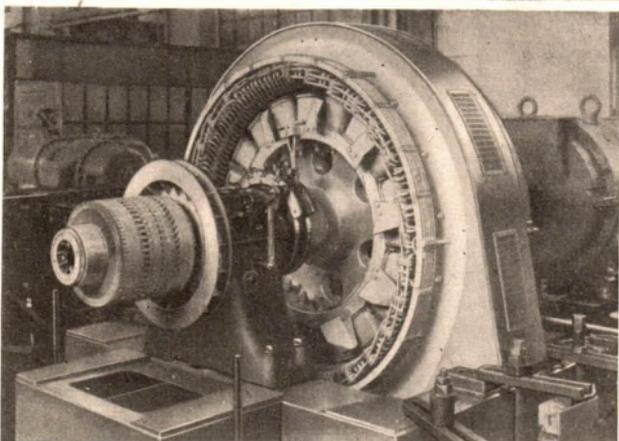
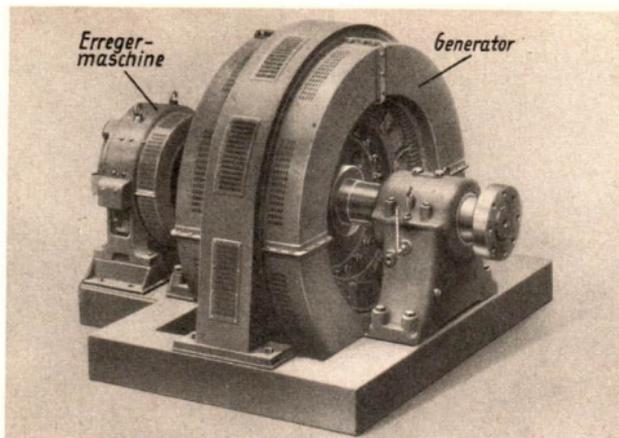
Ähnlich wie der Kurbelinduktor ist ein *Fahrraddynamo* gebaut. Die Hufeisenmagneten sind hier durch Manipermagneten<sup>1</sup> ersetzt. Sie sind auf dem Umfang des Gehäuses so angeordnet, daß immer ein Nord- und ein Südpol nebeneinanderliegen. Dadurch wird erreicht, daß während einer Umdrehung ein zwölfmaliger Polwechsel erfolgt und so die Induktionsspannungen höher werden (Bild 55/2).

Es gibt auch *Fahrraddynamos*, die so konstruiert sind, daß die Induktionsspulen sich nicht drehen, sondern fest im Gehäuse montiert sind. Zwischen ihnen wird ein vierpoliger Magnet gedreht. Diese zweite Bauform bezeichnet man als *Innenpolmaschine* im Gegensatz zu der zuerst erläuterten *Außenpolmaschine*.

*Technische Generatoren* zeigen die gleichen Konstruktionsprinzipien wie die kleineren *Fahrraddynamos* als *Innenpol- oder Außenpolmaschinen* (Bild 55/3). Die Ma-

<sup>1</sup> Maniperm ist ein keramisches magnetisches Material





gneten werden hier aber durch Elektromagneten ersetzt, um durch stärkere Magnetfelder höhere Spannungen zu erhalten. Den Gleichstrom für diese Magneten entnimmt man einem Gleichstromgenerator, der Erregermaschine, die fest an die Welle des Hauptgenerators angekoppelt ist. (Bild 56/1).

Der feststehende Teil des Generators wird als **Ständer** oder **Stator** bezeichnet, der drehbare Teil als **Läufer** oder **Rotor**. Großgeneratoren werden fast ausschließlich als Innenpolmaschinen gebaut. Über Schleifkontakte wird dem Rotor der verhältnismäßig kleine Erregerstrom mit niedriger Spannung zugeführt. Der erzeugte Wechselstrom wird den Induktionsspulen im Stator über feste Anschlüsse entnommen. In einer Außenpolmaschine muß der erzeugte Wechselstrom über die Schleifkontakte am Rotor geleitet werden. Dabei entstehen besonders bei höheren Spannungen Funkenüberschläge, das Bürstenfeuer.

Die Induktionsspulen sind in einem größeren Generator

nicht so klar zu erkennen, wie etwa an einem Doppel-T-Anker. Sie sind nach einem bestimmten Wicklungsschema in Nuten eingelegt, die in das Eisen des Stators eingearbeitet sind (Bild 56/2). Große Einphasen-Wechselstromgeneratoren werden in der Technik nur für ganz besondere Aufgaben eingesetzt. Die Großgeneratoren für das Energieversorgungsnetz erzeugen gleichzeitig drei Wechselspannungen (s. S. 76).

Mit der Entwicklung der Generatoren ist es den Wissenschaftlern und Technikern gelungen, elektrische „Energiequellen“ zu schaffen und dadurch seit etwa 1870 einen bedeutenden Fortschritt der gesamten Technik einzuleiten. Die elektrische Energie bildet heute die Grundlage für viele Produktionsprozesse. In unserer sozialistischen Gesellschaftsordnung wird darum die Erzeugung von Elektroenergie planmäßig weiterentwickelt. Auf dem Gebiet der DDR wurden 1946 11,5 Milliarden kWh erzeugt, 1965 63 Milliarden kWh.

## 2. Meßgeräte im Wechselstromkreis

### 2.1. Nachweis von Wechselstrom

#### Glimmlampenschwenkstab

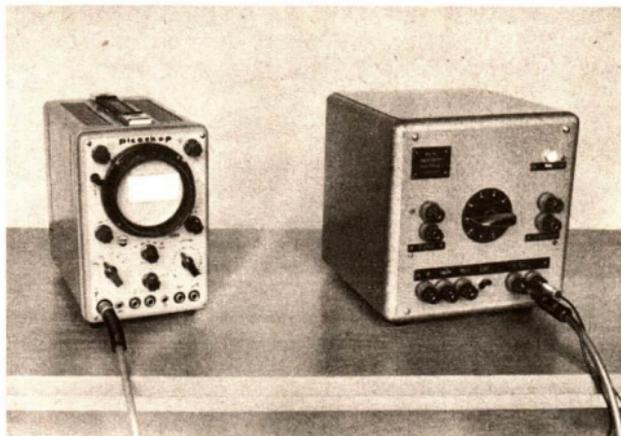
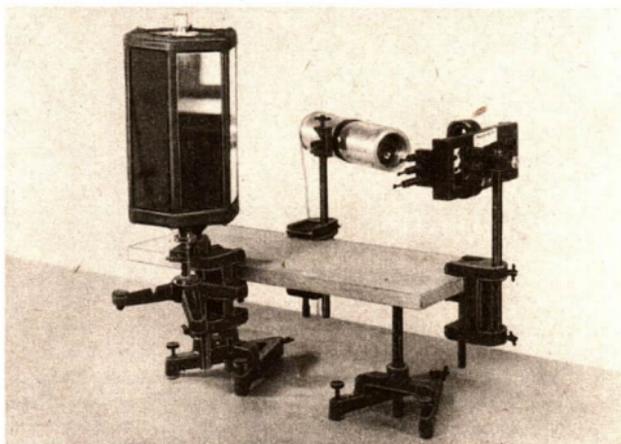
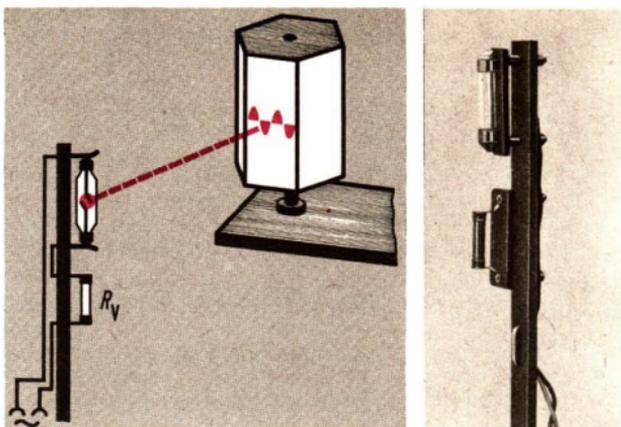
Bei angelegter Wechselspannung tritt ein Glimmlicht abwechselnd an beiden Elektroden auf. Bei schnellem Wechsel scheint es so, als ob an beiden Elektroden dauernd ein Glimmlicht ist. Bewegt man einen Glimmlampenschwenkstab jedoch hin und her, so sieht man ein Bild wie es ebenfalls entsteht, wenn man das Bild einer ruhenden Stabglimmlampe in einem rotierenden Drehspiegel beobachtet.

#### Schwingspiegelooszillografen

In einem permanenten Magnetfeld befindet sich an einer Spule oder Drahtschleife, die vom Wechselstrom durchflossen wird, ein kleiner Spiegel. Er führt durch die Wirkung zwischen dem festen und dem wechselnden Magnetfeld kleine Drehschwingungen aus. Ein auftreffendes Lichtbündel wird dadurch auf- und abwärts gelenkt. Ein Drehspiegel lenkt es auf dem Bildschirm waagrecht ab, so daß die Wechselstromkurve abgebildet wird.

#### Katodenstrahloszillograf

Ein Elektronenstrahl zeichnet auf einem Bildschirm Schwingungsbilder, auch wenn die Schwingungen so schnell erfolgen, daß ein mechanisches System ihnen nicht mehr folgen kann.



## 2.2. Frequenzmessung

Beim Wechselstrom ist von Interesse, wie oft er seine Richtung wechselt. In Anlehnung an mechanische Schwingungen spricht man beim Wechselstrom von einer **elektrischen Schwingung**. Die Zeitdauer einer Schwingung heißt **Periode**. Den Quotienten aus der Anzahl der Schwingungen und der Dauer der Schwingungen nennt man **Frequenz** (Bild 58/1). Die Einheit der Frequenz hat man zu Ehren des Entdeckers der elektromagnetischen Wellen **HEINRICH HERTZ** ein **Hertz (Hz)** genannt.

Ein Hertz ist die Einheit der Frequenz. Sie bezeichnet eine Schwingung je Sekunde.

Der Wechselstrom in unserem Energieversorgungsnetz hat eine Frequenz von 50 Hz. Der Fahrstrom für viele Elektrolokomotiven hat eine Frequenz von  $16\frac{2}{3}$  Hz.

- Ein Wechselstrom hat eine Frequenz von 48 Hz. Wie groß ist eine Periode? (Beachten Sie: Die Frequenz wird in  $\frac{1}{s}$ , die Schwingungsdauer in s gemessen!)

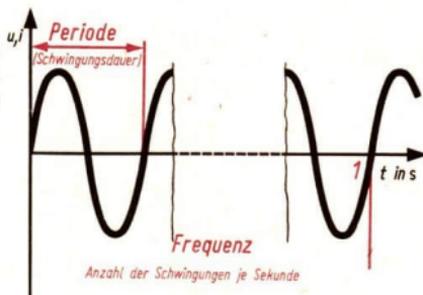
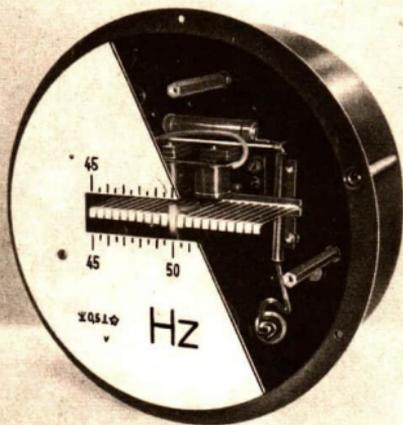


Bild 58/1 Kenngrößen im Wechselstromkreis

### Zungenfrequenzmesser

Man mißt die Frequenz technischer Wechselströme häufig mit einem Zungenfrequenzmesser. Durch einen Elektromagneten fließt der Wechselstrom. Unter dem Elektromagneten ist eine Reihe von Stahlzungen angebracht, deren Eigenfrequenz gegeneinander abgestuft ist. Unter Eigenfrequenz versteht man die Zahl der Schwingungen je Sekunde, mit der eine solche

Zunge schwingt, wenn man sie einmal aus ihrer Ruhelage herausbringt und dann frei schwingen läßt. Im Wechselfeld schwingt infolge von Resonanz die Zunge am stärksten, deren Eigenfrequenz mit der Frequenz des Wechselstromes übereinstimmt. Die benachbarten Zungen schwingen noch etwas mit, während die übrigen in Ruhe bleiben. Näheres zur Resonanz in Klasse 10.



### 2.3. Wechselspannung und Wechselstromstärke

Da sich Wechselspannung und Wechselstromstärke dauernd periodisch verändern, bestehen bei ihrer Messung einige Schwierigkeiten. Wir wollen untersuchen, wie sich die verschiedenen Meßgeräte im Wechselstromkreis verhalten.

15

**V** Mit einer Brückenschaltung zur Untersuchung des Verhaltens von Meßgeräten im Wechselstromkreis nach Bild 59/1 erzeugen wir eine Wechselspannung kleiner, veränderlicher Frequenz. Der Gleitkontakt des einen Widerstandes wird mit der Hand hin und her bewegt.

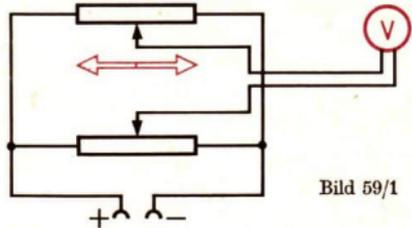


Bild 59/1

In einem Dreheiseninstrument (Bild 59/2) ist die Richtung des Zeigerauslags unabhängig von der Richtung des Stromes. Fließt ein Wechselstrom durch die Spule des Gerätes, so werden das feststehende und das bewegliche Eisenteil des Meßwerkes immer gleichzeitig von dem Wechselfeld umgepolt. Der Zeiger schlägt darum bei einem Wechselstrom kleiner Frequenz während jeder Halbperiode vom Nullpunkt bis zu einem Höchstwert nach der gleichen Seite hin aus. Mit höherer Frequenz kehrt er aber nicht mehr zum Nullpunkt zurück und erreicht auch nicht mehr den Höchstwert, da der Zeiger und die fest mit ihm verbundenen Teile zu träge sind, den schnellen Schwingungen zu folgen. Schiebt man den Gleitkontakt noch schneller hin und her, so kommt der Zeiger bei einem bestimmten Ausschlag zur Ruhe. Wenn in der Versuchsanordnung die maximale Spannung ( $u_{\max}$ ) am Meßgerät 10 V beträgt,

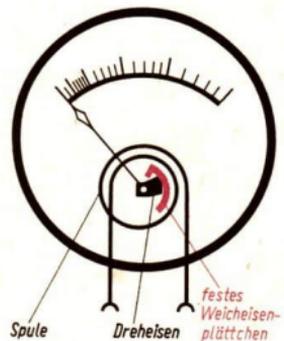
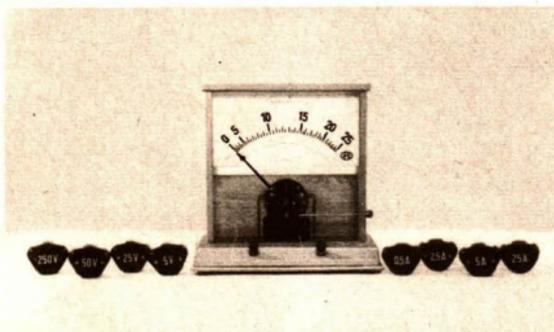


Bild 59/2 Ansicht und schematische Darstellung eines Dreheiseninstruments

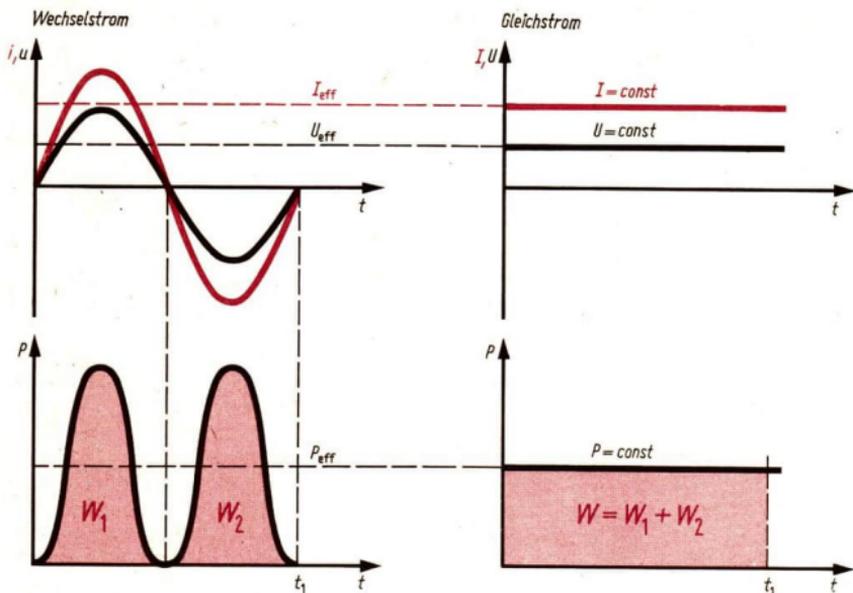


Bild 60/1 Vergleich der Spannungen, Stromstärken, Leistungen und Arbeiten eines Wechselstromes mit einem Gleichstrom

so steht der Zeiger bei einer hohen Frequenz bei etwa 7 V. Die Spannung, die das Meßgerät anzeigt, wird als **Effektivwert** der Wechselspannung bezeichnet. Der genaue Wert der Effektivspannung ist zu berechnen:

$$U_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx 0,7 \cdot u_{\text{max}}$$

Dementsprechend zeigt ein Strommesser den Effektivwert der Stromstärke an.

$$I_{\text{eff}} = \frac{i_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \approx 0,7 \cdot i_{\text{max}}$$

Diese Effektivwerte, die von den Dreheisenmeßgeräten angezeigt werden, entsprechen der Spannung und der Stromstärke eines Gleichstromes, der die gleiche elektrische Arbeit liefert wie der gemessene Wechselstrom (Bild 60/1).

Führt man den entsprechenden Versuch mit einem Drehspulinstrument durch, so pendelt der Zeiger bei niedriger Frequenz nach beiden Seiten um den Nullpunkt herum und kommt bei höherer Frequenz im Nullpunkt zur Ruhe, obwohl durch das Meßwerk der Wechselstrom fließt. Um mit einem Drehspulgerät Wechselspannungen und -ströme messen zu können, muß ein Meßgleichrichter eingebaut werden, der den

Wechselstrom in pulsierenden Gleichstrom umwandelt. Es ist eine Skale angebracht, auf der man die Effektivwerte ablesen kann.

Wechselstrommeßgeräte zeigen den Effektivwert von Wechselspannung und Wechselstromstärke an.

Die Effektivwerte entsprechen den Werten eines Gleichstromes, der in gleicher Zeit die gleiche Arbeit verrichtet.

### 3. Widerstände im Wechselstromkreis

#### 3.1. Der Ohmsche Widerstand

Im Gleichstromkreis ist der Widerstand der Quotient aus Spannung und Stromstärke. Im Wechselstromkreis verändern sich dauernd die Werte von Spannung und Stromstärke. Wie kann man hier den Widerstand bestimmen?

16

**V** In einer Versuchsanordnung nach Bild 61/1 wird an einem selbstinduktionsfreien Widerstand mit einem Oszillografen der Verlauf der Spannungs- und Stromstärkekurve aufgezeichnet.

Wir erkennen, daß ein zeitlicher Gleichlauf zwischen der Spannungs- und der Stromstärkekurve besteht (Bild 61/2).

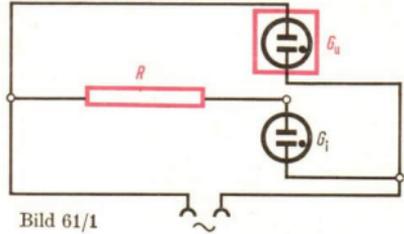
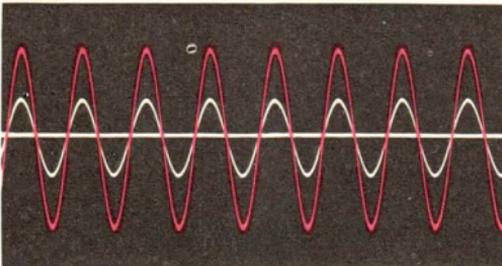
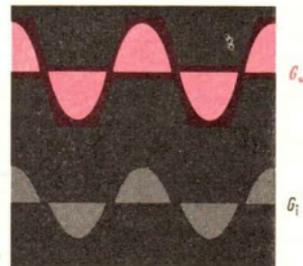


Bild 61/1



a



b

Bild 61/2 a) Verlauf der Spannungs- und Stromstärkekurve (Schleifenoszillograf)

b) Verlauf der Spannungs- und Stromstärkekurve (Glimmlichtoszillograf)

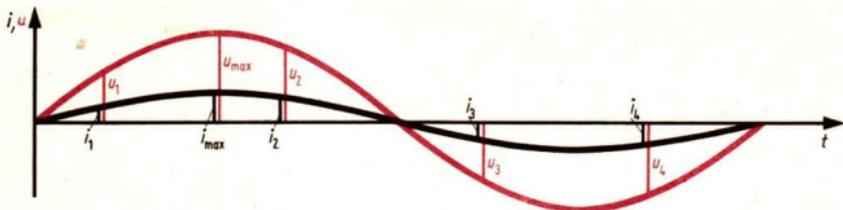


Bild 62/1 Augenblickswerte von Spannung und Stromstärke am Ohmschen Widerstand

Der Widerstand in einem Augenblick ist durch den Quotienten der Augenblickswerte von Spannung  $u$  und Stromstärke  $i$  anzugeben (Bild 62/1).

Auf Grund der geometrischen Ähnlichkeit der beiden Kurven ist dieser Quotient aber für jeden Augenblick gleich, so daß gilt:

$$R = \frac{u}{i} = \frac{u_{\max}}{i_{\max}} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$$

Dieser Wert des Widerstandes im Wechselstromkreis ist gleich dem Wert, der sich im Gleichstromkreis nach dem Ohmschen Gesetz für den gleichen Stromkreisteil ergibt. Darum wird dieser Widerstand im Wechselstromkreis als der **Ohmsche Widerstand** bezeichnet.

### Versuchsauftrag

#### Aufgabe:

Überprüfen Sie den Widerstand eines geraden Widerstandsdrahtes im Gleich- und Wechselstromkreis!

#### Geräte und Material:

Widerstandsbrett, Spannungsmesser (5 V)  
Strommesser (1 A), Stromversorgungsgerät

#### Versuchsablauf:

1. Bauen Sie eine Schaltung nach Bild 62/2 auf!
2. Legen Sie eine Gleichspannung von etwa 2 V an!
3. Messen Sie Spannung und Stromstärke! Errechnen Sie den Gleichstromwiderstand!
4. Legen Sie eine Wechselspannung von etwa 2 V an und bestimmen Sie den Ohmschen Widerstand im Wechselstromkreis!
5. Vergleichen Sie die beiden Ergebnisse!

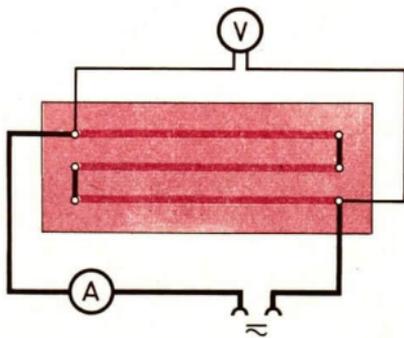


Bild 62/2 Versuchsaufbau zum Vergleich von Widerständen im Gleich- und Wechselstromkreis

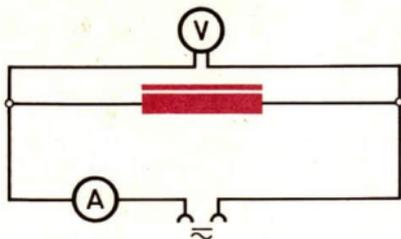


Bild 63/1 Schaltung zur Bestimmung des Widerstandes einer Spule

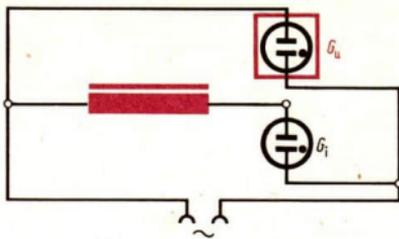


Bild 63/2 Schaltung zum Aufnehmen der Phasenverschiebung am induktiven Widerstand

### 3.2. Der induktive Widerstand

Ersetzen wir in der Versuchsanordnung nach Bild 61/1 den geraden Widerstandsdraht durch eine Spule mit 250 Windungen auf geschlossenem Eisenkern (Bild 63/1 und 63/2), so erhalten wir folgende Ergebnisse:

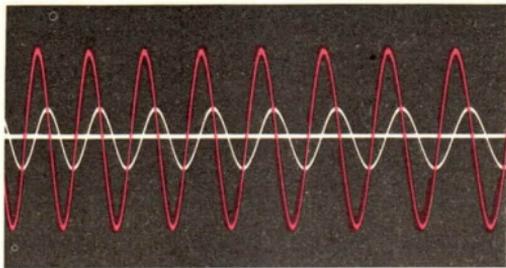
	Spannung	Stromstärke	Widerstand
Gleichstrom	$U = 4,5 \text{ V}$	$I = 4,4 \text{ A}$	$\frac{U}{I} = 1,02 \Omega$
Wechselstrom	$U_{\text{eff}} = 4,5 \text{ V}$	$I_{\text{eff}} = 0,13 \text{ A}$	$\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = 34,6 \Omega$

Warum gilt für die Spule nicht die gleiche Gesetzmäßigkeit wie für den geraden Widerstandsdraht?

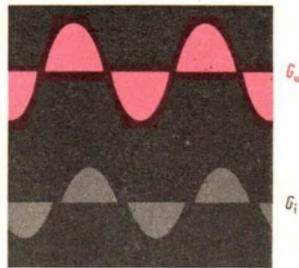
Wir wissen, daß bei der Veränderung der Stromstärke in einer Spule Selbstinduktionsspannungen auftreten. Nach der Lenzschen Regel wirken sie der angelegten Spannung entgegen. Fließt nun durch eine Spule ein Wechselstrom, so entsteht durch die periodische Änderung der Stromstärke auch eine periodische Selbstinduktionsspannung. Dadurch wird die Stromstärke verkleinert. Die Spule hat im Wechselstromkreis einen **induktiven Widerstand**  $X_L$ . Daneben bleibt natürlich der Ohmsche Widerstand bestehen, den das Leitungsmaterial auch im Gleichstromkreis besitzt.

**Eine Spule hat im Wechselstromkreis neben ihrem Ohmschen Widerstand einen induktiven Widerstand.**

An den Oszillogrammen des Spannungs- und Stromstärkenverlaufs an einer Spule im Wechselstromkreis erkennt man, daß infolge der Selbstinduktion die Stromstärkekurve zeitlich hinter der Spannungskurve zurückbleibt (Bild 64/1 a und b). Man sagt, es



a



b

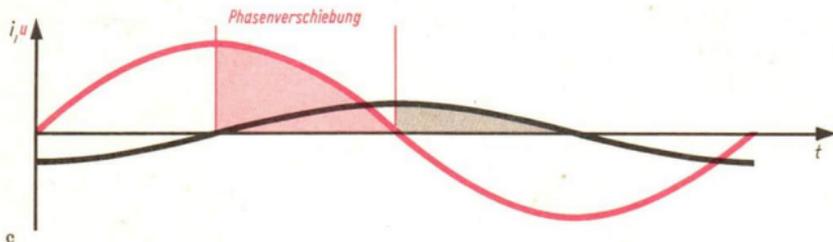


Bild 64/1 Phasenverschiebung am induktiven Widerstand

a) Bild des Schleifenoszillografen ; b) Bild des Glimmlichtoszillografen ; c) Zeichnerische Darstellung

besteht eine **Phasenverschiebung** zwischen Spannung und Stromstärke (Bild 64/1 c). Der induktive Widerstand hat für den Stromkreis eine grundsätzlich andere Bedeutung als der Ohmsche Widerstand. Der Ohmsche Widerstand ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen den bewegten freien Elektronen und den Atomen des Leiters. Die Elektronen geben Energie an die Atome ab, so daß diese erhöhte Wärmeschwingungen ausführen. *Infolge des Ohmschen Widerstandes wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt.* Die Wärme wird als äußere Wirkung des Stromes an die Umgebung abgegeben.

Durch den induktiven Widerstand erfolgt eine andere Energieumwandlung.

Es werden periodisch Magnetfelder aufgebaut. Ihre Energie wird aber infolge der Selbstinduktion wieder als elektrische Energie in den Stromkreis zurückgegeben, so daß dadurch keine Energieabgabe nach außen erfolgt. *Infolge des induktiven Widerstandes fließt Energie hin und her.* Darum bezeichnet man den Ohmschen Widerstand als **Wirkwiderstand  $R$**  und den induktiven Widerstand als einen **Blindwiderstand  $X_L$** . Der Wert des induktiven Widerstandes ist von den Größen abhängig, durch die bestimmt wird, wie hoch die Selbstinduktionsspannungen sind. Größere Windungszahlen und Eisenkerne führen zu größerem induktiven Widerstand. Aber auch die schnelleren Feldänderungen bei höheren Frequenzen ergeben höhere Selbstinduktionsspannungen und damit einen größeren induktiven Widerstand.

### 3.3. Der kapazitive Widerstand

Von besonderer Bedeutung für die Wechselstromtechnik und auch für die Funktechnik ist es, daß sich Kondensatoren im Wechselstromkreis anders verhalten als im Gleichstromkreis.

17

**V** Schließt man einen Kondensator an eine Gleichspannungsquelle an, so fließt nur ein kurzer Aufladestromstoß. Dann sperrt der Kondensator den weiteren Stromfluß (Bild 65/1 a).

Ersetzt man die Gleichspannung durch eine Wechselspannung, so fließt in dem Stromkreis ein dauernder Wechselstrom (Bild 65/1 b).

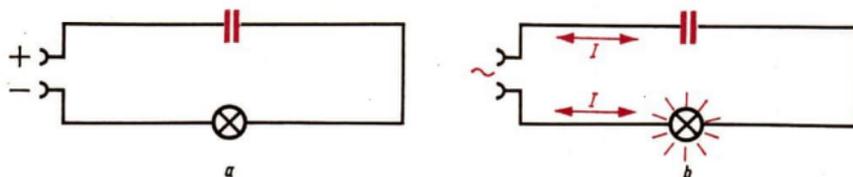
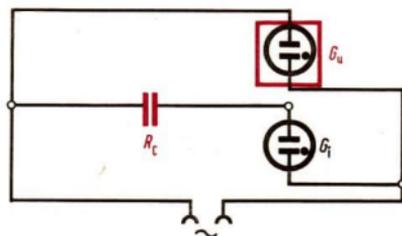


Bild 65/1 a) Kondensator im Gleichstromkreis; b) Kondensator im Wechselstromkreis

Durch den Wechselstrom wird der Kondensator in ständigem Wechsel aufgeladen, entladen, mit umgekehrter Polung aufgeladen und wieder entladen. Im Stromkreis sind dauernd Elektronen in Bewegung. Der Kondensator stellt im Wechselstromkreis einen **kapazitiven Widerstand**  $X_C$  dar. Wir untersuchen auch hier mit einem Oszillografen das Verhalten der Spannungs- und Stromstärkenkurve (Bild 65/2). Die Stromstärke ist so phasenverschoben, daß sie zeitlich vor der Spannung vorausläuft (Bild 66/1 a, b und c). Immer wenn die Spannung ihren Maximalwert hat, ist der Kondensator voll aufgeladen, und die Stromstärke ist in diesem Augenblick gleich Null. Es folgt dann jeweils in der Stromstärkekurve die Entladung und die umgekehrte Aufladung bei gleichbleibender Stromrichtung. Der kapazitive Widerstand ist wie der induktive Widerstand ein **Blindwiderstand**. Bei der Aufladung nimmt der Kondensator Energie auf, die in seinem elektrischen Feld aufgespeichert wird. Sie wird bei der Entladung wieder in den Stromkreis zurückgegeben. Der kapazitive Wider-

Bild 65/2 Schaltung zur Darstellung von Spannungs- und Stromstärkekurve am Kondensator



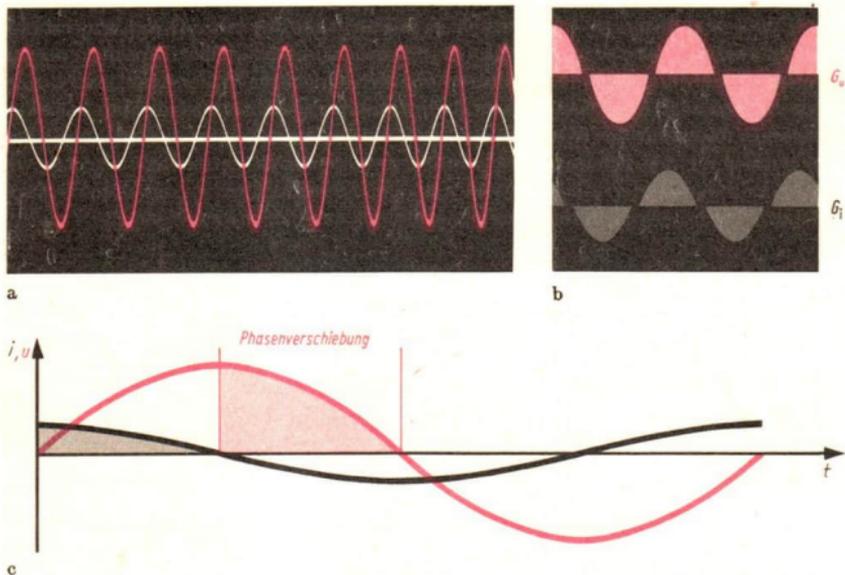


Bild 66/1 Verlauf der Spannungs- und Stromstärkekurve am kapazitiven Widerstand  
 a) Bild am Schleifenoszillografen; b) Bild am Glimmlichtoszillografen; c) Zeichnerische Darstellung

stand führt also nicht zu einer Energieabgabe nach außen, wie es am Ohmschen Widerstand der Fall ist.

Der kapazitive Widerstand ist um so kleiner, je größer die Kapazität eines Kondensators ist, weil ein Kondensator mit größerer Kapazität bei jeder Aufladung mehr Elektronen aufnehmen kann. Der kapazitive Widerstand ist auch um so kleiner, je höher die Frequenz ist, da bei schnellerer Folge der Ladevorgänge in gleicher Zeit mehr Elektronen den Querschnitt des Stromkreises passieren.

#### 4. Gesetze im Wechselstromkreis

##### 4.1. Der Scheinwiderstand im Wechselstromkreis

Die drei Wechselstromwiderstände treten in jedem Wechselstromkreis *gemeinsam* auf. Für technischen Wechselstrom<sup>1</sup> (50 Hz) kann man feststellen: Jeder Leiter hat einen Ohmschen Widerstand. Auch schon am geraden Leiter treten sehr geringe Selbstinduktionen auf, so daß auch ein einfacher Stromkreis einen sehr kleinen induk-

<sup>1</sup> Die Verhältnisse bei hochfrequenten Wechselströmen werden in der Klasse 10 untersucht.

tiven Widerstand besitzt. Entsprechendes gilt auch für den kapazitiven Widerstand. Zwischen den Leitern eines Stromkreises bestehen immer kleine Kapazitäten. Von größerer Bedeutung sind der induktive und der kapazitive Widerstand jedoch nur, wenn Spulen oder Kondensatoren in den Stromkreis geschaltet sind. Man kann das Ohmsche Gesetz auf den Wechselstromkreis anwenden, indem man den Widerstand als Quotienten der Effektivwerte von Spannung und Stromstärke ausdrückt. So erhält man den Widerstand, der sich aus dem Zusammenwirken der drei Wechselstromwiderstände ergibt. Man bezeichnet ihn als den **Scheinwiderstand  $Z$** .

**Der Scheinwiderstand ist der Quotient aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke.**

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$$

Bei vielen elektrischen Geräten sind der induktive und der kapazitive Widerstand so klein, daß der Scheinwiderstand praktisch gleich dem Ohmschen Wirkwiderstand ist. Diese Geräte kann man bei gleicher Spannung sowohl im Gleich- wie im Wechselstromkreis betreiben. Das trifft besonders für viele Wärmegeräte zu, z. B. Heizplatten, Bügeleisen, Heizkissen, Tauchsieder und Glühlampen. Obwohl die Heizwendeln spulenartig gewickelt sind, ist der induktive Widerstand gegenüber dem Ohmschen Widerstand so klein, daß man ihn unberücksichtigt lassen kann. In diesen Fällen kann man also den Wirkwiderstand wie folgt berechnen:

$$R = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$$

Will man den kapazitiven Widerstand  $X_C$  eines Kondensators bestimmen, so sind dabei der Ohmsche Widerstand und der induktive Widerstand in den Leitungen so klein, daß der Scheinwiderstand praktisch gleich dem kapazitiven Blindwiderstand des Kondensators ist. Es gilt für den Kondensator:

$$X_C = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$$

In Generatoren, Motoren, Transformatoren und Funkgeräten wird der Gesamtwiderstand durch das Zusammenwirken von Ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerständen bestimmt, so daß man hier aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke immer nur den Scheinwiderstand berechnen kann.

#### 4.2. Arbeit und Leistung im Wechselstromkreis

Ähnliche Überlegungen wie für die Widerstandsberechnungen gelten auch für die Berechnung von Arbeit und Leistung im Wechselstromkreis.

Durch den Ohmschen Widerstand wird elektrische Arbeit in eine andere Energieart umgewandelt und nach außen abgegeben. Es liegt eine **Wirkarbeit** vor.

Infolge des induktiven und kapazitiven Widerstandes wird elektrische Energie gespeichert und wieder in den Stromkreis zurückgegeben, so daß Energie zwischen

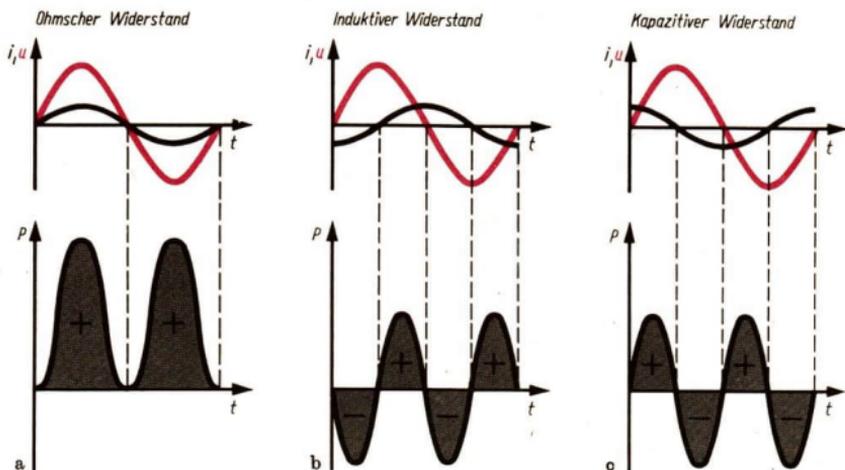


Bild 68/1 Spannung, Stromstärke, Leistung und Arbeit an Wechselstromwiderständen  
 a) Ohmscher Widerstand; b) induktiver Widerstand; c) kapazitiver Widerstand

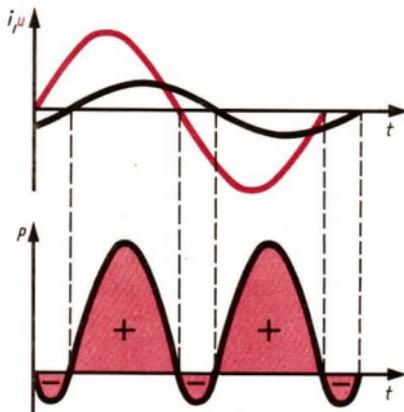
Es ist der zeitliche Verlauf von Spannung, Stromstärke und Leistung an den verschiedenen Wechselstromwiderständen dargestellt. Die Augenblickswerte der Leistung ergeben sich als Produkt der Augenblickswerte von Spannung und Stromstärke. Sie sind positiv bei gleichem Vorzeichen der Augenblickswerte von Spannung und Stromstärke und negativ bei ungleichen Vorzeichen.

Die Flächen an den Leistungskurven stellen die elektrische Arbeit  $W$  dar. Sie tragen ein positives Vorzeichen, wenn die Energie von der Spannungsquelle abgegeben wird, und ein negatives Vorzeichen, wenn die Energie infolge des induktiven oder kapazitiven Widerstandes in den Stromkreis zurückgegeben wird. So ist die Summe der Flächeninhalte und damit die Wirkarbeit beim induktiven und beim kapazitiven Widerstand gleich Null

Bild 68/2 Spannung, Stromstärke, Leistung und Arbeit in einem Wechselstromkreis mit Ohmschem und induktivem Widerstand

Die Darstellung entspricht Bild 68/1

Es zeigt sich hier, daß die Summe der Flächeninhalte nicht gleich Null ist, da die positiven Flächen größer sind als die negativen. Die Summe der Flächeninhalte stellt die Wirkarbeit dar, während die Summe der Absolutbeträge aller Flächeninhalte die Scheinleistung wiedergibt.



Spannungsquelle und Widerstand hin und her fließt. Diese Verhältnisse zeigt die grafische Darstellung in Bild 68/1.

Liegen nun im Wechselstromkreis gleichzeitig Wirk- und Blindwiderstände, so ist die Phasenverschiebung kleiner als am rein induktiven oder kapazitiven Widerstand. Im Bild 68/2 wird als Beispiel gezeigt, wie die Spannungs- und Stromstärkekurve und die Leistungskurve etwa an einem Motor verlaufen, in dem induktive und Ohmsche Widerstände zusammenwirken.

Berechnet man die Leistung aus den gemessenen Effektivwerten von Spannung und Stromstärke, so erhält man immer die **Scheinleistung  $P_S$** .

**Die Scheinleistung im Wechselstromkreis ist das Produkt aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke.**

$$P_S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

Als Einheit der Scheinleistung benutzt man das **Voltampere (VA)**.

Die **Scheinleistung** besteht aus einer **Wirkleistung** und einer **Blindleistung**.

Die Wirkleistung ist immer kleiner als die Scheinleistung. In Berechnungen bringt man das durch den **Leistungsfaktor** zum Ausdruck, der mit dem Formelzeichen  $\cos \varphi$  bezeichnet wird und immer kleiner als eins ist.

Die **Wirkleistung** ist demnach:

$$P_W = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P_W = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$$

Die Einheit der Wirkleistung ist das **Watt (W)**.

Bei den Geräten, die nur kleine induktive oder kapazitive Widerstände neben einem großen Ohmschen Widerstand besitzen, ist der Leistungsfaktor praktisch gleich eins.

Hier kann man die Wirkleistung wie folgt berechnen:

$$P_W = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

Treten in elektrischen Geräten größere induktive und kapazitive Widerstände auf, so ist meist auf dem Leistungsschild der Wert des Leistungsfaktors  $\cos \varphi$  angegeben. Das ist bei allen Wechselstromgeneratoren und motoren der Fall (Bild 69/1).

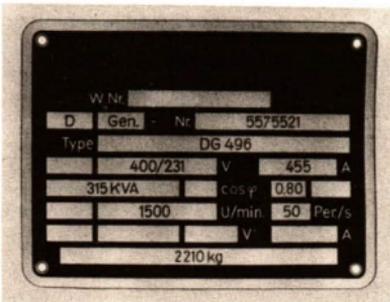


Bild 69/1 Leistungsschild eines Wechselstromgenerators. Wie groß ist der  $\cos \varphi$ ?

## Beispiel

- Auf dem Leistungsschild eines Motors ist angegeben:

$\cos \varphi = 0,78$ . Es wird gemessen  $U_{\text{eff}} = 210 \text{ V}$ ,  $I_{\text{eff}} = 2,4 \text{ A}$ . Schein- und Wirkleistung sind zu berechnen!

Gegeben:	Gesucht:	Lösung:	
$U_{\text{eff}} = 210 \text{ V}$	$P_S$ (in VA)	$P_S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$	$P_W = P_S \cdot \cos \varphi$
$I_{\text{eff}} = 2,4 \text{ A}$	$P_W$ (in W)	$P_S = 210 \text{ V} \cdot 2,4 \text{ A}$	$P_W = 504 \text{ VA} \cdot 0,78$
$\cos \varphi = 0,78$		<u><math>P_S = 504 \text{ VA}</math></u>	<u><math>P_W = 393 \text{ W}</math></u>

Die Scheinleistung beträgt 504 VA, die Wirkleistung 393 W.

Die elektrische Arbeit ist immer als Produkt aus Leistung und Zeit zu berechnen. Im Wechselstromkreis müssen wir unterscheiden:

### Scheinarbeit

$$W_S = P_S \cdot t = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot t$$

Sie wird gemessen in Voltampere Sekunden (VA s) oder Kilovoltampere Stunden (kVAh).

### Wirkarbeit

$$W_W = P_W \cdot t = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot t \cdot \cos \varphi$$

Sie wird gemessen in Wattsekunden (Ws) oder Kilowattstunden (kWh).

## 4.3. Bedeutung der Wechselstromwiderstände im Versorgungsnetz

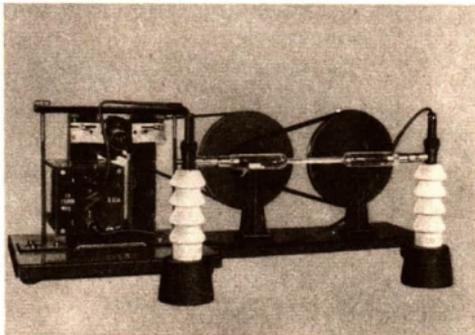
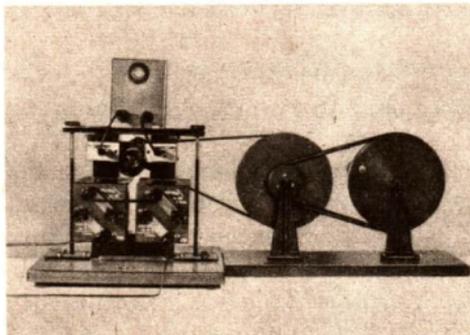
Im Energieversorgungsnetz muß man sich darum bemühen, daß die Phasenverschiebungen möglichst klein gehalten werden. Im Netz von Industriebetrieben, in denen viele Elektromotoren zum Antrieb der Maschinen eingesetzt sind, liegt der Leistungsfaktor bei  $\cos \varphi = 0,8$ . Die Wicklungen der Motoren führen zu Phasenverschiebungen. Ähnlich liegen die Verhältnisse in großen Gebäuden, die mit Leuchtstofflampen ausgestattet sind. Hier führen die Drosselspulen zu Phasenverschiebungen. Dadurch wird das Leitungsnetz mit großen Blindströmen belastet, und auch die Generatoren und Transformatoren im Versorgungsnetz müssen größer gebaut werden, als es der Wirkleistung entspricht. Man kann diese Phasenverschiebung aber weitgehend aufheben. Dazu werden in den Betrieben Phasenschieberanlagen eingebaut. Man schaltet entsprechend große Kondensatoren parallel zum Hauptanschluß des Betriebes. Da die Phasenverschiebung am kapazitiven Widerstand der Phasenverschiebung am induktiven Widerstand entgegengesetzt ist, kann man durch Kondensatoren auf diese Weise die Phasenverschiebung in der Zuleitung zum Betrieb aufheben. Im inneren Netz des Betriebes fließt zwar immer noch eine Energie mit einem Blindstrom zwischen den induktiven Widerständen der Motoren und dem kapazitiven Widerstand des Phasenschiebers hin und her. Dadurch wird aber nicht mehr das Energieversorgungsnetz belastet.

## Fragen und Aufgaben

1. Erklären Sie das Prinzip eines Wechselstromgenerators am Fahrraddynamo!
2. Wie werden in einem Generator die Grundgesetze der elektromagnetischen Induktion angewendet, um möglichst hohe Spannungen zu erzeugen?
3. Warum ist bei größeren Generatoren der Aufbau als Innenpolmaschine vorteilhaft?
4. Wie arbeiten Glimmlichtoszillograf und Zungenfrequenzmesser?
5. Warum kann man mit einem Drehspulmeßwerk nicht ohne weiteres Wechselströme messen?
6. Berechnen Sie:
  - a) Den Maximalwert der Netzspannung ( $U_{\text{eff}} = 220 \text{ V}$ ),
  - b) die Maximalstromstärke in einem Heizkörper ( $I_{\text{eff}} = 4,7 \text{ A}$ )!
7. Welche Phasenverschiebungen treten am induktiven und am kapazitiven Widerstand auf?
8. Warum ändern sich der induktive und der kapazitive Widerstand in Abhängigkeit von der Frequenz?
9. Eine Kochplatte nimmt bei einer Spannung  $U_{\text{eff}}$  von 215 V eine Stromstärke  $I_{\text{eff}}$  von 6,9 A auf.  
Berechnen Sie den Ohmschen Widerstand und die Wirkleistung! Erklären Sie, welche Formeln Sie benutzen können!
10. Berechnen Sie Scheinwiderstand und Scheinleistung!
  - a) Wechselstrommotor:  $U_{\text{eff}} = 380 \text{ V}$ ;  $I_{\text{eff}} = 13,2 \text{ A}$ .
  - b) Rundfunkgerät:  $U_{\text{eff}} = 220 \text{ V}$ ;  $I_{\text{eff}} = 350 \text{ mA}$ .
11. Wie groß ist der Effektivwert der Stromstärke in einem Generator mit einer Wirkleistung von 1,5 kW bei einer Spannung  $U_{\text{eff}}$  von 218 V ( $\cos \varphi = 0,81$ )?
12. Ein mittlerer Industriebetrieb entnimmt dem Versorgungsnetz eine Wirkleistung von 60 kW. Wie groß ist der Effektivwert der Wirkstromstärke ( $I_w$ ) bei einer Spannung  $U_{\text{eff}}$  von 220 V? Für welche Scheinstromstärke ( $I_s$ ) muß der Querschnitt der Zuleitung berechnet werden, wenn in dem Betrieb eine Gesamtphasenverschiebung mit  $\cos \varphi$  von 0,84 auftritt?  
Welche Maßnahme kann man im Betrieb ergreifen, um mit einer Zuleitung auszukommen, die der Wirkstromstärke entspricht?

## Versuche

1. Bauen Sie aus Aufbauteilen (Bild 71/1) die Modelle eines Außen- und Innenpolgenerators für Wechselstrom!



2. Legen Sie auf eine Glasplatte angefeuchtetes Polreagenzpapier! Schließen Sie an eine Wechselspannung von etwa 20 V zwei Verbindungsleitungen an! Halten Sie die beiden freien Bananenstecker dicht nebeneinander und fahren Sie damit über das Polreagenzpapier! Beobachten und erklären Sie die Spuren auf dem Papier!
3. Spannen Sie einen etwa 10 m langen, dünnen Eisendraht geradlinig vom Experimentiertisch zu einer Holtzschen Klemme und wieder zurück! Bestimmen Sie den Gleich- und Wechselstromwiderstand mit einer Spannung von etwa 2 V!  
Wickeln Sie den Draht auf einen I-Eisenkern und legen Sie diesen auf einen U-Eisenkern!  
Bestimmen Sie jetzt wieder den Gleich- und Wechselstromwiderstand!  
Vergleichen und erklären Sie die Ergebnisse aller Teilversuche!

## ZUSAMMENFASSUNG

### **In rotierenden Spulen werden in Magnetfeldern Wechselspannungen induziert.**

Welche Maßnahmen führen in einem Fahrraddynamo zu höheren Spannungen als in einer Leiterschleife?

### **Der Nachweis von Wechselspannungs- und Stromstärkekurven erfolgt mit Oszillografen.**

Erklären Sie am Glimmlampenschwenkstab das Grundprinzip der Oszillografen!

### **Dreheiseninstrumente kann man für Wechselstrommessungen einsetzen. Drehpulinstrumente müssen mit einem Gleichrichter ausgerüstet sein.**

Warum zeigen die Meßgeräte die Effektivwerte an? Wie berechnet man die Maximalwerte?

### **Der Ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis ist gleich dem Gleichstromwiderstand. Es tritt keine Phasenverschiebung auf.**

Wie bestimmt man den Ohmschen Widerstand im Wechselstromkreis?

### **Spulen haben im Wechselstromkreis neben ihrem Ohmschen einen induktiven Widerstand. Die Maximalwerte der Stromstärke werden später als die Maximalwerte der Spannung erreicht.**

Wie ist die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke zu erklären?

### **Kondensatoren stellen im Wechselstromkreis einen kapazitiven Widerstand dar. Die Maximalwerte der Stromstärke werden früher als die Maximalwerte der Spannung erreicht.**

Warum ist der kapazitive Widerstand ein Blindwiderstand?

### **Der Scheinwiderstand setzt sich aus dem Wirkwiderstand und dem Blindwiderstand zusammen. Der Quotient aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke ergibt den Scheinwiderstand.**

Bei welchen Geräten ist der Wirkwiderstand annähernd gleich dem Scheinwiderstand?

### **Infolge der Phasenverschiebungen im Wechselstromkreis ist die Wirkleistung kleiner als die Scheinleistung.**

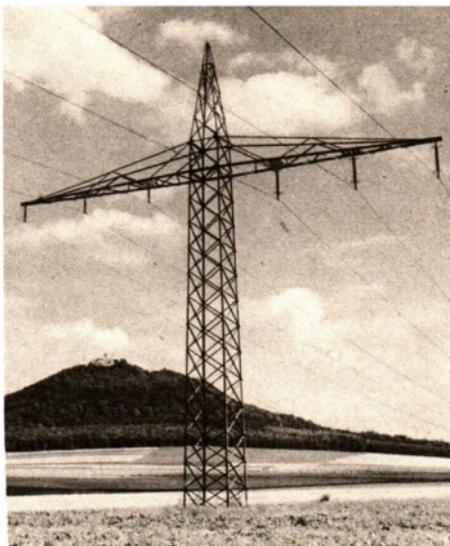
Wie berechnet man Scheinleistung und Scheinarbeit im Wechselstromkreis?

Unter welchen Bedingungen sind sie annähernd gleich der Wirkleistung und Wirkarbeit oder gleich der Blindleistung und Blindarbeit?

## Dreiphasenwechselstrom



Hochspannungsfreileitungen dienen der Übertragung elektrischer Energie. Ein solches Leitungssystem besteht meist aus drei bzw. mehr Kupfer- oder Aluminiumseilen. Betrachten Sie eine beliebige Hochspannungsanlage! Wieviel Seile sind verlegt? Haben alle Seile den gleichen Querschnitt? Sind alle Seile an Isolatoren aufgehängt?



### 1. Dreiphasenwechselstromsystem

Ein Dauermagnet, der sich vor einer Spule dreht, induziert in ihr eine Wechselspannung (vgl. S. 38/39, Versuchsauftrag, Punkt 4 und 5).

18

**V** Werden mehrere Spulen um den sich drehenden Magneten gruppiert, so wird in jeder Spule eine Wechselspannung erzeugt. Im Bild 73/2 sind drei Spulen mit je einem angeschlossenen Meßinstrument in gleichen Abständen um den rotierenden Magneten angeordnet.

Ein solches Leitungssystem, bei dem drei getrennte Leitungskreise vorhanden sind, bezeichnet man als **offenes Dreiphasenwechselstromsystem**.

Da derselbe Magnetpol zu verschiedenen Zeiten an den einzelnen Spulen vorbeiläuft, erreichen die in den Spulen induzierten Spannungen bzw. die Stromstärken bei geschlossenem Stromkreis zu verschiedenen Zeiten ihre Maximalwerte. Im Bild

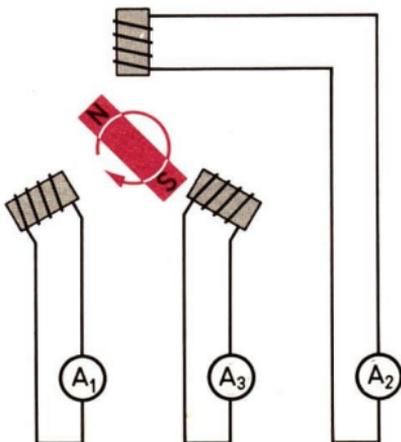


Bild 73/2 Offenes Dreiphasenwechselstromsystem

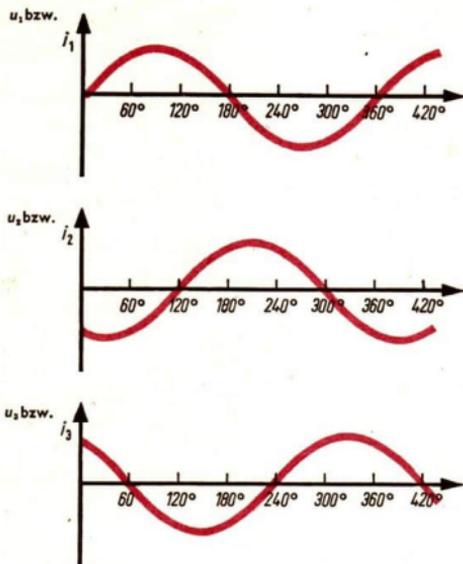


Bild 74/1 Phasenverschiebung in einem offenen Dreiphasenwechselstromsystem

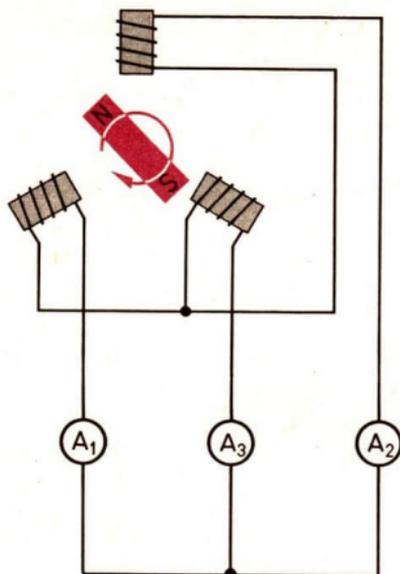


Bild 74/2 Geschlossenes Dreiphasenwechselstromsystem

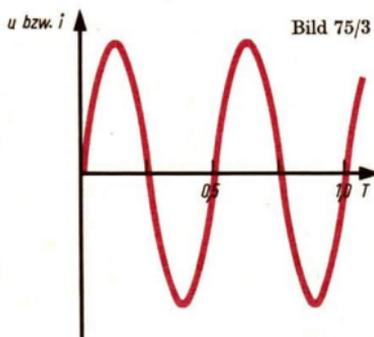
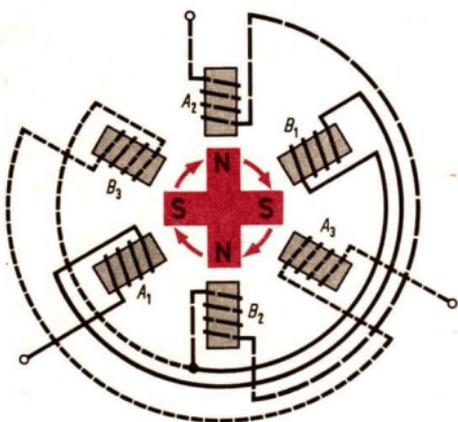
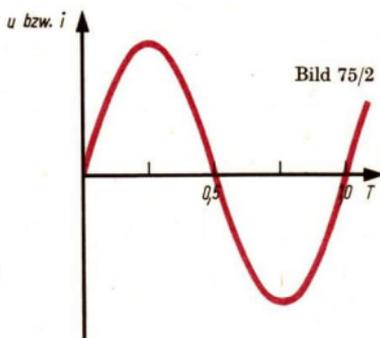
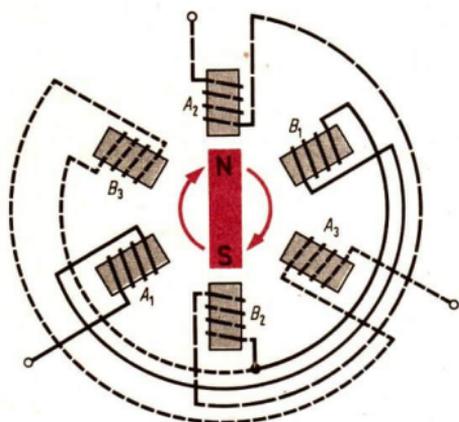
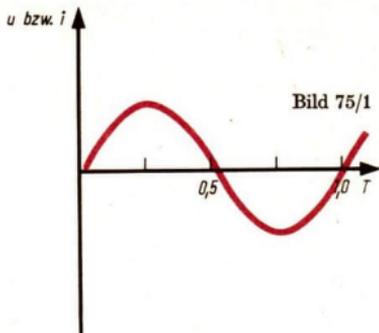
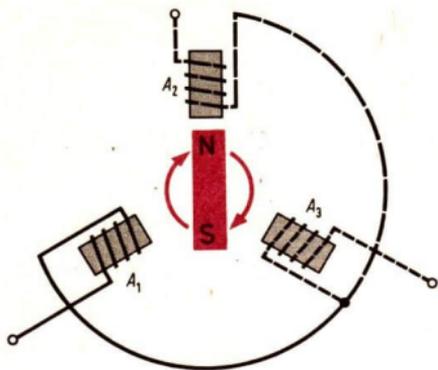
74/1 sind die entsprechenden Kurven in drei getrennten Koordinatensystemen grafisch dargestellt. Die Phasenverschiebung zwischen zwei Spannungs- bzw. Stromstärkekurven beträgt jeweils  $120^\circ$ .

- Ersetzen Sie auf den Abszissenachsen der Koordinatensysteme nach Bild 74/1 die jeweilige Gradzahl durch die Rotationsdauer  $T$  des Magneten!

In den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts hat man in verschiedenen Ländern unabhängig voneinander festgestellt, daß die drei Stromkreise eines offenen Dreiphasenwechselstromsystems unter Einsparung von Leitungen in bestimmter Weise zusammengeschaltet werden können. In den Bildern 74/2 und 75/1 ist ein derart vereinfachtes Leitungssystem wiedergegeben.

Ein System, bei dem die Anzahl der Leitungen durch Zusammenschalten der drei Stromkreise verringert wird, bezeichnet man als **geschlossenes Dreiphasenwechselstromsystem**.

Ein Nachteil der Versuchsanordnung nach Bild 75/1 besteht darin, daß in einem bestimmten Augenblick immer nur ein einziger Magnetpol einer Induktionsspule direkt gegenübersteht und damit unmittelbar an der Spannungserzeugung beteiligt ist. Die induzierten Spannungen lassen sich jedoch erhöhen, wenn man der ersten Spule jeweils diametral gegenüber eine zweite Spule aufstellt und beide Spulen unter Beachtung der richtigen Polung in Reihe schaltet. In Bild 75/2 sind zusätzlich zu den



drei Spulen  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  (Bild 75/1) weitere drei Spulen  $B_1$ ,  $B_2$  und  $B_3$  in das geschlossene Dreiphasenwechselstromsystem eingeordnet worden. Die induzierten Spannungen verdoppeln sich dadurch in jedem Leiter des Dreiphasenwechselstromsystems; die Frequenz der erzeugten Wechselspannungen bleibt erhalten. Verdoppelt man in dem Versuchsaufbau nach Bild 75/2 bei konstant bleibender Drehzahl die Anzahl der rotierenden Magnetpole, dann verdoppelt sich auch die Frequenz der induzierten Spannungen (Bild 75/3).

Die erzeugte Spannung in einem Dreiphasenwechselstromsystem ist also von der Anzahl der Induktionsspulen und der Anzahl der Magnetpole abhängig.

## 2. Dreiphasenwechselstromgenerator

Die in der Industrie und in der Landwirtschaft, im Gewerbe und im Haushalt benötigte Elektroenergie wird überwiegend in *Dreiphasenwechselstromgeneratoren* (Schaltzeichen nebenstehend) erzeugt.



Der prinzipielle Aufbau eines solchen Generators entspricht dem Schema des Bildes 75/3.

Die Induktionsspulen (Ständerspulen) der Generatoren befinden sich jedoch auf einem geschlossenen Eisenkörper. Das Magnetfeld wird durch kräftige Gleichstromelektromagneten hervorgerufen. Die Magnetspulen sind auf der Läuferwelle angebracht. Das sich mit dem Läufer drehende Magnetfeld induziert in den Ständerspulen die Wechselspannungen. Der Läufer wird auch als *Polrad* oder als *Rotor* bezeichnet.

Die *Frequenz  $f$*  der erzeugten Wechselspannungen hängt von der *Anzahl der Polpaare  $p$*  und der *Drehzahl  $n$  des Läufers* ab. Mit wachsender Drehzahl des Läufers steigt die Frequenz der induzierten Wechselspannungen. Zwischen der Frequenz  $f$  der abgegebenen Wechselspannungen und der Drehzahl  $n$  des Läufers besteht die Beziehung

$$\text{Frequenz} = \text{Drehzahl} \cdot \text{Anzahl der Polpaare} \qquad f = n \cdot p$$

Beachten Sie, daß die Frequenz  $f$  in Hz und die Drehzahl  $n$  in der Technik in  $\frac{1}{\text{min}}$  gemessen werden! Deshalb muß die Drehzahl in  $\frac{1}{s}$  umgerechnet werden.

- *Der Läufer eines Dreiphasenwechselstromgenerators dreht sich 100mal in der Minute. Er hat 10 Polpaare. Wie groß ist die Frequenz der abgegebenen Wechselspannungen?*  
*Der Läufer eines Dreiphasenwechselstromgenerators besitzt 24 Polpaare. Wie hoch muß die Drehzahl des Läufers sein, damit der Generator an das 50-Hz-Netz angeschlossen werden kann?*

Die von den Generatoren abgegebenen Spannungswerte sind nach bestimmten Vorschriften einheitlich festgelegt. Generatoren werden normalerweise für folgende Klemmenspannungen gebaut: 130 V, 230 V, 400 V, 525 V, 3 150 V, 6 300 V, 10 500 V und 15 750 V. Die von den Generatoren abgegebenen Klemmenspannungen liegen rund 5% höher, als sie vom Energieabnehmer benötigt

werden. Dadurch wird der Spannungsabfall im Leitersystem zwischen den Erzeugern und den Abnehmern von Elektroenergie ausgeglichen. In den Dreiphasenwechselstromgeneratoren werden die Magnetspulen des Läufers durch einen Gleichstromgenerator erregt. Der Gleichstromgenerator ist mit der Welle des Dreiphasenwechselstromgenerators gekuppelt und wird gleichfalls von der Dampf- oder Wasserturbine angetrieben. Um die Frequenz der abgegebenen Spannungen mit größtmöglicher Genauigkeit konstant zu halten, regelt man die Drehzahl der Antriebsmaschine des Dreiphasenwechselstromgenerators durch besondere Einrichtungen automatisch auf den Sollwert ein.

Da das Magnetfeld mit der Läuferbewegung in dem Eisen des Ständers umläuft, bilden sich im Ständereisen auf Grund der räumlich-zeitlichen Änderung des Magnetfeldes Wirbelströme aus. Um die hiermit verbundenen Verluste an Elektroenergie weitgehend herabzudrücken, muß der Ständer aus dünnen, gegeneinander isolierten Eisenblechen zusammengesetzt werden. Der Läufer dagegen kann aus Stahlguß hergestellt werden, da das Magnetfeld mit dem Läufer rotiert und sich in ihm nicht verändert. Eine Wirbelstrombildung ist also im Läufer nicht möglich (vgl. S. 49)

### 3. Fortleitung der elektrischen Energie

Die in einem Generator erzeugte elektrische Energie muß über ein Leitungssystem dem Energieabnehmer zugeführt werden. Dazu werden in der Praxis Vierleitersysteme (Bild 77/1) und Dreileitersysteme (Bild 77/2) verwendet.

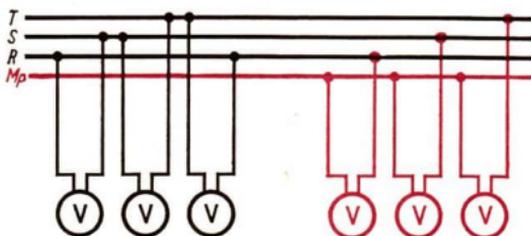


Bild 77/1 Vierleitersystem

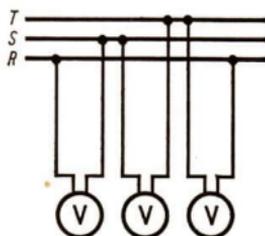


Bild 77/2 Dreileitersystem

Ein Vierleitersystem besteht aus drei Hauptleitern und einem Mittelpunktleiter. Die einzelnen Hauptleiter werden als *R-Leiter*, *S-Leiter* und *T-Leiter* bezeichnet. Der vierte Leiter heißt *Mp-Leiter*. Verbindet man in einem Vierleitersystem für die Lichtversorgung zwei beliebige Hauptleiter über ein Spannungsmesser, so mißt man eine Effektivspannung von 380 V. Die Spannung zwischen einem Hauptleiter und dem Mittelpunktleiter beträgt dagegen nur 220 V. In einem Vierleitersystem stehen also zwei Spannungswerte zur Verfügung. Zwischen diesen beiden Spannungswerten gilt die Beziehung  $380 \text{ V} \approx \sqrt{3} \cdot 220 \text{ V}$ . Der Faktor  $\sqrt{3}$  heißt *Verkettungsfaktor*; er ist von den Spannungsarten abhängig und demzufolge für alle Leitungssysteme gleich.

Die Spannung zwischen zwei Hauptleitern bezeichnet man als *Leiterspannung*; die Spannung zwischen einem Hauptleiter und dem Mittelpunktleiter nennt man *Leiter-Mittelpunktleiter-Spannung*.

Führt man in einem Vierleitersystem den Mittelpunktleiter nicht mehr mit, dann erhält man ein *Dreileitersystem*. In einem Dreileitersystem steht im Gegensatz zum Vierleitersystem nur noch ein einziger Spannungswert zur Verfügung.

Da in einem Dreiphasenwechselstromgenerator drei phasenverschobene Spannungen bzw. Stromstärken bestehen, muß sich die Phasenverschiebung auch in einem Vierleiter- oder einem Dreileitersystem experimentell nachweisen lassen.

- Entwickeln Sie eine Versuchsanordnung zur Demonstration der Phasenverschiebung!  
In einem Vierleitersystem beträgt die Leiterspannung  $U_{RS}$  zwischen dem R-Leiter und dem S-Leiter 6000 V. Wie hoch ist die Spannung  $U_{RMp}$  zwischen dem R-Leiter und dem Mp-Leiter?

## 4. Schaltungsarten

### 4.1. Sternschaltung

Werden in einem Leitungssystem die Hauptleiter durch Widerstände verbunden so taucht die Frage auf, wie sich die Phasenverschiebung der Spannungen auf die Stromüberlagerung in dem gesamten Leitungssystem auswirkt. Mit der Versuchsanordnung nach Bild 78/1 läßt sich dieses Problem experimentell lösen.

19  
**V** Solange die vier Schalter in der Versuchsanordnung geöffnet sind, fließt in keinem Leiterzweig ein Strom.

Werden der Schalter  $Sch_R$  und  $Sch_{Mp}$  geschlossen, so leuchten die beiden Glühlampen  $G_R$  und  $G_{Mp}$  auf. Die Stromstärke kann mit dem Strommesser  $A_R$  bzw.  $A_{Mp}$  bestimmt werden.

Es wird der Schalter  $Sch_S$  geschlossen. Die Helligkeit der Glühlampe  $G_R$  nimmt zu, die der Glühlampe  $G_{Mp}$  nimmt ab. Die Glühlampe  $G_S$  leuchtet so hell wie die Glühlampe  $G_R$ .

Schließlich wird auch noch der Schalter  $Sch_T$  geschlossen. Die drei Glühlampen  $G_R$ ,  $G_S$  und  $G_T$  leuchten mit normaler Helligkeit, während die Glühlampe  $G_{Mp}$  erloschen ist. Wie man am Strommesser  $A_{Mp}$  erkennt, fließt in dem Mp-Leiter überhaupt kein Strom mehr. Öffnet man den Schalter  $Sch_{Mp}$ , ändert sich nichts an den Strom- und Spannungsverhältnissen der gesamten Versuchsanordnung.

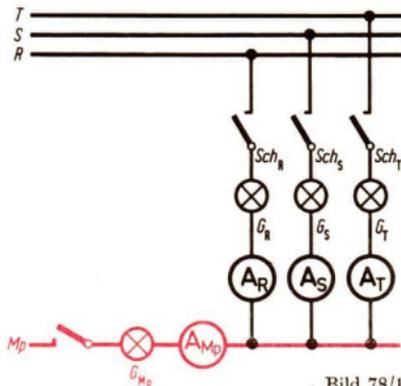


Bild 78/1

Das Versuchsergebnis läßt sich geometrisch erklären, wenn man in einem Koordinatensystem die Stromstärken der sich im Mp-Leiter überlagernden Wechselströme

in Abhängigkeit von der Zeit aufträgt und die Augenblickswerte der Stromstärken addiert. Dabei ergibt sich, daß im Mp-Leiter bei symmetrischer Belastung die Summe der drei Stromstärken stets Null ist.

- Überprüfen Sie diese Aussage anhand einer grafischen Darstellung wie in Bild 79/1 für  $\frac{1}{6} T$ ,  $\frac{2}{6} T$ ,  $\frac{3}{6} T$ ,  $\frac{4}{6} T$ ,  $\frac{5}{6} T$  und  $\frac{6}{6} T$ !

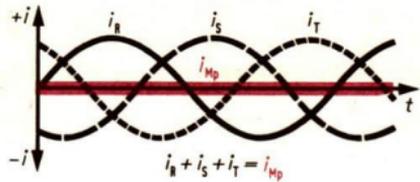


Bild 79/1 Addition der drei phasenverschobenen Wechselströme im Mp-Leiter eines Vierleitersystems

Der Versuchsaufbau nach Bild 78/1 kann dadurch vereinfacht werden, daß man auf den stromlosen Mp-Leiter verzichtet (Bild 79/2). Die Schaltelemente im Bild 79/2 a lassen sich durch Umzeichnen sternförmig anordnen (Bild 79/2 b). Diese Verbindungsart der drei Schaltelemente bezeichnet man als *Sternschaltung*. Das Schaltsymbol für sternförmig verbundene Schaltelemente ist  $\Upsilon$ . Die Versuchsanordnungen nach Bild 79/2 a und b sind physikalisch gleich.

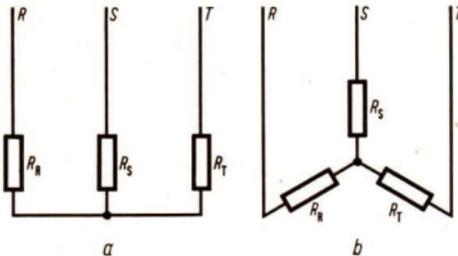


Bild 79/2

- Schaltelemente  $R_R$ ,  $R_S$ ,  $R_T$
- sternförmige Anordnung der Schaltelemente
- Schaltsymbol

Man nennt die Leitungsteile, in denen die Schaltelemente liegen, *Stränge*; der R-Leiter, S-Leiter und T-Leiter als die Stromzuleitungen werden kurz als *Leiter* bezeichnet. Demzufolge unterscheidet man zwischen *Strangspannungen* und *Leiterspannungen*, zwischen *Strangströmen* und *Leiterströmen*. Die Strangspannung gibt den Spannungsabfall an dem Schaltelement  $R_R$ ,  $R_S$  oder  $R_T$  und die Leiterspannung die Spannung zwischen zwei Hauptleitern an. Der in einem Strang fließende Strom heißt *Strangstrom*, der in einem Hauptleiter fließende Strom heißt *Leiterstrom*.

- Entwickeln Sie ein Schaltbild zur Messung der Strangspannung, der Leiterspannung, der Strangstromstärke und der Leiterstromstärke in einer Sternschaltung!  
In welchem Verhältnis steht die Strangstromstärke zur Leiterstromstärke?

In der Praxis erreicht man nur selten, daß die drei Hauptleiter gleichmäßig belastet sind. Daraus erklärt sich die Tatsache, daß in den Leitungssystemen der Mp-Leiter

meist mitgeführt wird. Im Vergleich zu den drei Hauptleitern kann er einen geringeren Querschnitt erhalten, da in ihm ein wesentlich kleinerer Differenzstrom fließt.

Werden in der Versuchsanordnung nach Bild 78/1 die drei gleichen Glühlampen in den Hauptleitern beispielsweise durch eine 25-Watt-Glühlampe, eine 60-Watt-Glühlampe und eine 100-Watt-Glühlampe ersetzt, dann fließt wegen der unsymmetrischen Belastung ein Differenzstrom im Mp-Leiter.

**Bei einer Sternschaltung sind die drei Schaltelemente in einem gemeinsamen Punkt verbunden.**

**Die Spannungen sind verkettet; die Leiterspannung ist gleich dem Produkt aus Strangspannung und dem Faktor  $\sqrt{3}$ .**

**Die Leiterstromstärke ist gleich der Strangstromstärke.**

Um in einem Leitungssystem die Hauptleiter etwa gleichmäßig zu belasten und den Differenzstrom möglichst niedrig zu halten, werden beispielsweise in die einzelnen Häuser eines Straßenzuges der Mp-Leiter und jeweils von Haus zu Haus wechselnd ein anderer Hauptleiter gezogen. In das erste Haus werden z. B. der Mp-Leiter und der R-Leiter, in das zweite Haus der Mp-Leiter und der S-Leiter, in das dritte Haus der Mp-Leiter und der T-Leiter, in das vierte Haus der Mp-Leiter und wieder der R-Leiter geführt usw. Bei großen Wohn- und Bürohäusern legt man alle vier Leiter in das Haus und verteilt die R-Leiter, S-Leiter und T-Leiter ähnlich wie in einem Straßenzug abwechselnd auf die einzelnen Stockwerke.

- *Entwickeln Sie ein Leitungsschaltbild für Lichtanschluß eines mehrgeschossigen Hauses!*

Der Mp-Leiter kann auch teilweise eine Erdleitung sein. Dazu erdet man den metallischen Mp-Leiter am Anfang und am Ende der Leitung. Zur Erdung werden Stahlblechplatten möglichst bis zum Grundwasserspiegel in das Erdreich versenkt.

#### 4.2. Dreieckschaltung

In der Praxis ist neben der Sternschaltung noch eine zweite Schaltungsart üblich. Dabei werden jeweils zwei Hauptleiter eines Dreileitersystems durch Schaltelemente (z. B. Ohmscher Widerstand) verbunden (Bild 81/1 a). Die drei Schaltelemente bilden einen geschlossenen Kreis. Durch räumliches Umgruppieren können sie auch dreieckförmig angeordnet werden (Bild 81/1 b). Diese Verbindungsart bezeichnet man als *Dreieckschaltung*. Das Schaltsymbol für Dreieckschaltungen ist  $\triangle$ . Es ist oftmals auf den Leistungsschildern von Dreiphasenwechselstrommaschinen zu finden.

- *Übertragen Sie die Begriffe „Leiter“ und „Strang“, wie sie bei der Sternschaltung eingeführt worden sind, sinngemäß auf die Dreieckschaltung!  
Messen Sie in einer Dreieckschaltung die Leiterstromstärke und die Strangstromstärke und vergleichen Sie beide miteinander!*

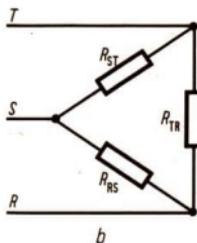
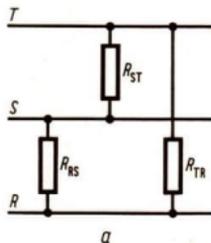


Bild 81/1  
 a) Schaltelemente  
 b) dreieckförmige Anordnung  
 der Schaltelemente  
 c) Schaltsymbol

Bei einer Dreieckschaltung bilden die drei Schaltelemente einen geschlossenen Kreis.

Die Ströme sind verkettet; die Leiterstromstärke ist gleich dem Produkt aus Strangstromstärke und dem Faktor  $\sqrt{3}$ .

Die Leiterspannung ist gleich der Strangstromspannung.

### Fragen und Aufgaben

- \*1. Die Ständerspulen eines Dreiphasenwechselstromgenerators können in Stern oder in Dreieck geschaltet werden. Informieren Sie sich in der Fachliteratur oder im UTP über die entsprechenden Schaltzeichen und erläutern Sie diese!
- \*2. In der Sternschaltung nach Bild 81/2 beträgt die Leiterspannung 380 V. Bei symmetrischer Belastung fließt in jedem Hauptleiter ein Strom von 2,2 A. Wie groß ist die Stromstärke  $I_S$  bzw.  $I_T$ , wenn der Schalter Sch geöffnet wird?
- 3. In einer bestimmten Dreieckschaltung beträgt die Strangstromstärke 0,5 A. Wie groß ist die Leiterstromstärke?

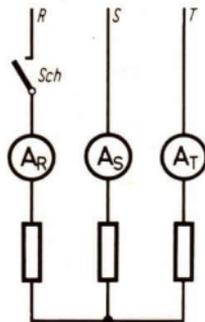
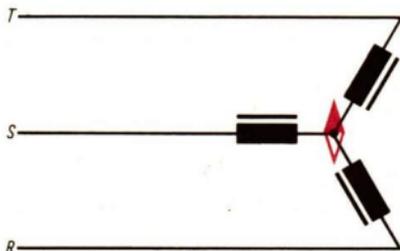


Bild 81/2 zu \*2

### 5. Drehfeld

Wird eine Spule von einem Wechselstrom durchflossen, so wird sie von einem magnetischen Wechselfeld umgeben. Magnetfelder lassen sich zu einem resultierenden Magnetfeld überlagern. Werden in einem Dreiphasenwechselstromsystem drei Spulen als Schaltelemente in Stern geschaltet und in einer Ebene um  $120^\circ$  versetzt angeordnet, dann bildet sich in dem Raum zwischen den drei Spulen das resultierende Magnetfeld aus. Da sich die drei magnetischen Einzelfelder in ihrer Stärke dauernd ändern, gegeneinander eine Phasenverschiebung aufweisen und räumlich unterschiedlich orientiert sind, kann man über die Art des resultierenden Magnetfeldes zunächst nur eine Vermutung aufstellen. Es müßte sich ein veränderndes Magnetfeld herausbilden. Ein Experiment soll diese Frage beantworten.

**V** Drei Spulen werden sternförmig an ein Dreiphasenwechselstromsystem angeschlossen. Zum Nachweis des Magnetfeldes wird zwischen den drei Spulen eine Magnetnadel leicht drehbar gelagert. Nachdem der Strom eingeschaltet worden ist, beginnt sich die Magnetnadel zu drehen.



Das Drehen der Magnetnadel wird durch ein rotierendes Magnetfeld hervorgerufen. Ein solches Magnetfeld bezeichnet man als *Drehfeld*. Die Stärke des Magnetfeldes ist dabei in jedem Augenblick konstant, jedoch ändert sich dauernd die Richtung des resultierenden Feldes (Bild 83/1).

Magnetische Drehfelder konnten schon vor der Erfindung des Dreiphasenwechselstroms mit Hilfe von Gleichstrom oder einphasigem Wechselstrom erzeugt werden. So führte WALTER BAILY am 28. 6. 1879 den Mitgliedern der Physikalischen Gesellschaft in London ein rotierendes Magnetfeld vor. Er rief es durch die periodische Unterbrechung eines Gleichstroms hervor. Eine praktische Bedeutung hat sein Verfahren nicht erlangt. Im Jahre 1885 gelang es dem Italiener GALILEO FERRARIS (1847 bis 1897), Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Turin, ein Drehfeld mit Hilfe einphasiger Wechselströme zu erzeugen. Er spaltete den einphasigen Wechselstrom in zwei phasenverschobene Wechselströme auf und erhielt damit zwei magnetische Wechselfelder, die in ihrer Phase jeweils um  $90^\circ$  verschoben waren. Bevor FERRARIS seine Untersuchungen 1888 veröffentlichte, haben FRIEDRICH AUGUST HASSELWANDER (1859 bis 1932), NICOLA TESLA (1856 bis 1943) und CHARLES SCHENK BRADLEY unabhängig voneinander Dreiphasenwechselströme erzeugen können.

Wegen der Möglichkeit, mit Hilfe des Dreiphasenwechselstroms *Drehfelder* zu erzeugen, wurde von dem gebürtigen Russen M. O. v. DOLIVO-DOBROWOLSKI (1861 bis 1919) für den Dreiphasenwechselstrom der Ausdruck *Drehstrom* geprägt. Diese Bezeichnungsweise hat sich allgemein durchgesetzt.

Richtet man in einer Dreieckschaltung die drei Spulen räumlich so aus, daß die Längsachsen der Spulenkörper zur Mitte des Dreiecks zeigen, dann läßt sich auch mit dieser Schaltung ein Drehfeld erzeugen. Zur Verstärkung der einzelnen Magnetfelder werden in die Spulenkörper geblättrte Eisenkerne gesteckt (Bild 82/2).

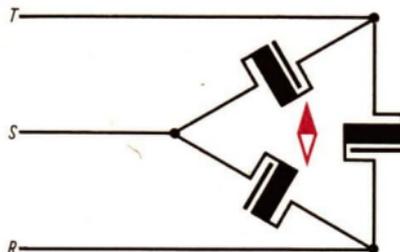


Bild 82/2 Erzeugung eines Drehfeldes mit einer Dreieckschaltung

## 6. Drehstrommotor

21

**V** In der Versuchsanordnung nach Bild 82/1 wird die Magnetnadel durch einen drehbar gelagerten Metallzylinder ersetzt. Eine leere Konservendose ist für diesen Zweck recht gut geeignet. Nachdem der elektrische Strom eingeschaltet ist, beginnt sich der Zylinder zu drehen. Vertauschen Sie zwei Hauptleiter miteinander! Was beobachten Sie?

Die magnetischen Wechselfelder induzieren in der Metallwand des unmagnetischen Zylinders Wirbelströme. Durch das Zusammenwirken aller Magnetfelder wird die Drehung des Metallzylinders hervorgerufen. Diese Versuchsanordnung spiegelt das Funktionsprinzip eines Drehstrommotors wider.

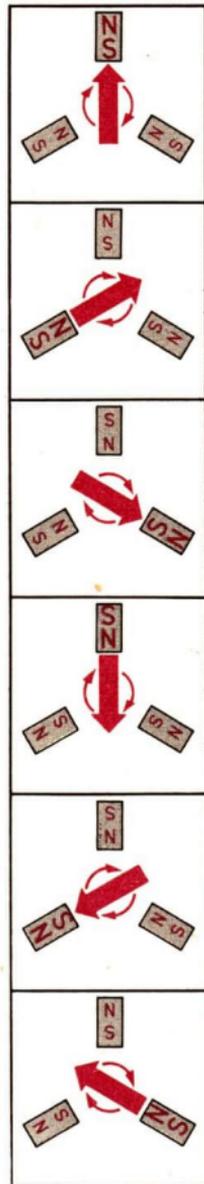
Bei technischen Drehstrommotoren wird der Metallzylinder durch einen Metallkäfig aus Kupfer- oder Aluminiumstäben ersetzt.

Ein solcher Käfigläufer, auch Kurzschlußläufer genannt, wird in das Motorgehäuse, das die Wicklungen der Induktionsspule trägt, eingesetzt. Diese Konstruktion eines Dreiphasenwechselstrommotors bezeichnet man als *Kurzschlußläufermotor* (Bild 84/1).

In den achtziger und neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts begann man in verschiedenen Ländern mit dem Bau von Mehrphasenwechselstrommaschinen. 1888 konstruierte der Ingenieur MICHAEL OSSIPOWITSCH v. DOLIVO-DOBROWOLSKI (damals Konstrukteur in der AEG, ab 1909 technischer Direktor der AEG) — auf den Vorarbeiten FERRARIS, HASELWANDERS, TESLAS u. a. fußend — den ersten technisch brauchbaren Drehstrommotor. Darüber hinaus trat er in Wort und Schrift für die Übertragung elektrischer Energie durch Dreiphasenwechselstromsysteme ein. In jener Zeit existierten fast ausschließlich Gleichstromanlagen. Für viele Zwecke (z. B. Bogenlampen, die sehr verbreitet waren; Galvanotechnik usw.) benötigte man Gleichstrom, und es gab noch keine leistungsstarken Gleichrichteranlagen, die den Wechselstrom in Gleichstrom hätten umwandeln können.

Vor allem konnte Wechselstrom nicht wie Gleichstrom in Akkumulatoren gespeichert werden, und deshalb mußten die noch verhältnismäßig leistungsschwachen Wechselstrommaschinen Tag wie Nacht in Betrieb sein. In Gleichstromnetzen war es dagegen üblich, das Netz des Nachts nur aus Akkumulatoren zu speisen. So erklärt sich, daß die Stadtverwaltungen, die Gleichstromanlagen häufig für technisch zweckmäßiger hielten, den Übergang auf Wechselstrom ablehnten.

Bild 83/1 Drehfeld (schematisch)



Diese Verhältnisse änderten sich, als durch den Zusammenschluß der kleineren Netze zu größeren Versorgungsgebieten die „Energieverluste“ zu groß wurden. Sie konnten aber durch die Einführung von Drehstromsystemen stark herabgesetzt werden.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden schließlich die Gleichstromsysteme von den Drehstromanlagen endgültig verdrängt.

Heutzutage werden in vielen Industriezweigen und in der Landwirtschaft Drehstrommotoren verwendet. Die überwiegende Anzahl aller installierten Motoren sind Drehstrommotoren.

Bei der Mechanisierung und Automatisierung vieler Produktionsprozesse kommt der Ausrüstung mit Drehstrommotoren eine große Bedeutung zu. Dabei treiben die Motoren nicht nur die Anlagen an, sie dienen auch der Steuerung und Regelung der ablaufenden Prozesse.

Um das Auswechseln einzelner Motoren verschiedener Leistung in den komplizierten Anlagen schnell und reibungslos durchführen zu können, ist es notwendig, die äußeren Abmessungen und die Anbaumaße einheitlich zu gestalten. Das ist nur durch eine konsequente Standardisierung möglich. Aus diesem Grunde wurde in der Deutschen Demokratischen Republik eine einheitliche Typenreihe von Drehstrommotoren mit verschiedenen Leistungswerten entwickelt. Durch die damit ermöglichte Großserienfertigung konnten auch umfangreiche Energie- und Materialeinsparungen erzielt werden.

- *Nennen Sie die wichtigsten Bauteile eines Kurzschlußläufermotors!  
Nehmen Sie einen alten Kurzschlußläufermotor auseinander und beschreiben Sie den Aufbau und die Wicklung des Motors!  
Erklären Sie nach Bild 84/1 das Schaltzeichen eines Kurzschlußläufermotors!*

Neben den Kurzschlußläufermotoren verwendet man in der Praxis auch *Schleifringläufermotoren* und *Synchronmotoren*.

- *Informieren Sie sich in einschlägigen Fachbüchern über den Aufbau und die Wirkungsweise dieser Motorarten!*

#### Bild 84/1 Kurzschlußläufermotor

Der Kurzschlußläufermotor ist in seinem Aufbau äußerst einfach, in der Herstellung billig und im Betrieb robust und zuverlässig. Durch das Fehlen gleitender Kontakte arbeitet die Maschine funkenfrei. Aus diesem Grunde kann sie auch in feuergefährlichen und explosionsgefährdeten Anlagen der Industrie und Landwirtschaft eingesetzt werden. Der Motor läuft von selbst an

und besitzt ein kräftiges Anlaufmoment. Seine Drehzahl ist nahezu konstant. Somit ist er besonders zum Antrieb von Werkzeugmaschinen geeignet; als Antriebsmotor von Fahrzeugen ist er nicht brauchbar.

Um die Drehwirkung des Läufers zu verstärken, sind die Käfigstäbe in den Nuten eines geblättern Eisenzylinders untergebracht.

In der Bildecke: Schaltzeichen eines Kurzschlußläufermotors in Sternschaltung.



## 7. Stern-Dreieck-Schalter

Beim Einschalten eines Drehstrommotors können erhebliche Anlaufstromstärken auftreten. (Warum?) Sie betragen oft ein Mehrfaches der Betriebsstromstärke. Um dabei die Wicklungen der Motoren vor Überlast zu schützen, muß der Anlaufstrom begrenzt werden.

22

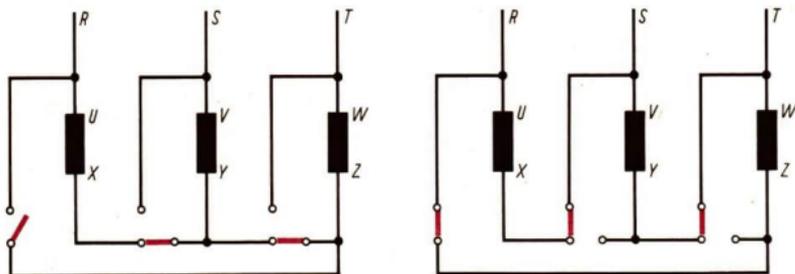
**V** Ein Drehstrommotor wird an das Drehstromnetz angeschlossen und in eine der Zuleitungen ein Strommesser eingeschaltet! Beobachten Sie den Zeigerausschlag des Strommessers beim Einschalten des Motors!

- *Machen Sie Vorschläge, wie man den Anlaufstrom beim Einschalten des Motors begrenzen kann!*

Eine Möglichkeit, den Anlaufstrom eines Drehstrommotors zu begrenzen, bietet der *Stern-Dreieck-Schalter*. Dabei werden die sechs Anschlüsse der drei Wicklungsstränge des Motors mit den entsprechenden Klemmen des Schalters verbunden. Die Enden der Ständerwicklungen werden mit den Buchstaben *U, V, W* und *X, Y, Z* bezeichnet. Durch den Stern-Dreieck-Schalter werden die drei Ständerwicklungen des Motors zunächst in Stern und dann in Dreieck geschaltet. In der ersten Schalterstellung liegt nur die Strangspannung an den Wicklungen, in der zweiten Schalterstellung liegt schließlich die volle Leiterspannung an den Spulen.

23

**V** Bauen Sie eine Versuchsanordnung nach Bild 85/1 auf! An diesem Versuchsaufbau ist das Prinzip eines Stern-Dreieck-Schalters zu erkennen. Messen Sie die Spannungen an den Widerständen in beiden Schalterstellungen! Messen Sie gleichfalls die Stromstärken in den Leiterzweigen für beide Schalterstellungen!



a) Sternschaltung (Einschaltstufe)

b) Dreieckschaltung (Betriebsstufe)

Bild 85/1 Schaltungsprinzip eines Stern-Dreieck-Schalters

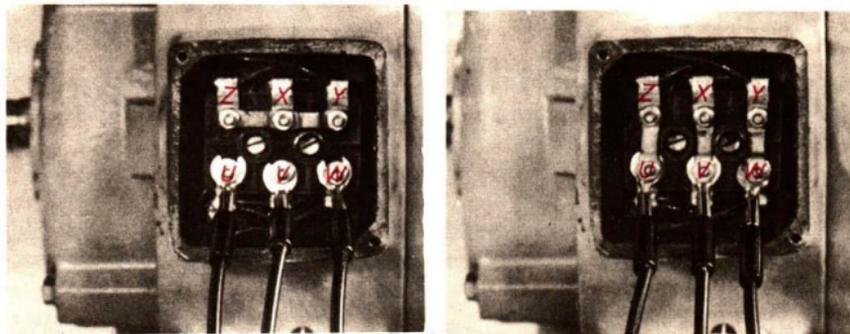


Bild 86/1 a und b) Klemmenbrett eines Drehstrommotors

### Fragen und Aufgaben

- 1. Wie erklärt sich der Name *Drehstrom*?
- 2. Beschreiben Sie das Prinzip eines Kurzschlußläufermotors!
- 3. In Bild 86/1a und b ist das Klemmenbrett eines Drehstrommotors wiedergegeben. In welchem Bild liegt eine Sternschaltung und in welchem Bild liegt eine Dreieckschaltung des Motors vor? Begründen Sie Ihre Aussage!
- 4. Was geschieht in der Versuchsanordnung nach Bild 86/2, wenn der Schalter aus Stellung 1 nach Stellung 2 umgelegt wird?

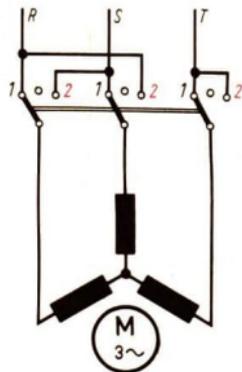


Bild 86/2 zu 4

### ZUSAMMENFASSUNG

Bei einem Drehstromgenerator ist die Frequenz der induzierten Wechselspannungen von der Anzahl der Polpaare und von der Drehzahl des Läufers abhängig.

Geben Sie hierfür ein Zahlenbeispiel an!

Zur Übertragung elektrischer Energie werden Dreileitersysteme und Vierleitersysteme verwendet.

Welche Aufgabe hat der Mp-Leiter?

In einer Drehstrommaschine können die Wicklungen sternförmig oder dreieckförmig verbunden werden.

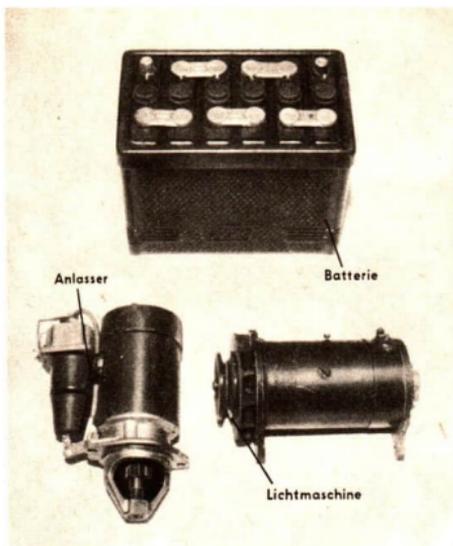
Vergleichen Sie die Sternschaltung mit der Dreieckschaltung!

Beim Drehstrommotor wird die Läuferbewegung durch das magnetische Drehfeld hervorgerufen.

Vergleichen Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Dreiphasenwechselstrommotors mit dem Aufbau und der Wirkungsweise eines Einphasenwechselstrommotors!

## Gleichstrommaschinen

Batterie, Anlasser und Lichtmaschine gehören zur elektrischen Ausrüstung von Kraftfahrzeugen. Der *Anlasser* ist ein *Gleichstrommotor*, er wird von der Batterie gespeist und dient beim Starten zum Anwerfen des Fahrzeugmotors. Die *Lichtmaschine* ist ein *Gleichstromgenerator*, sie liefert während der Fahrt den Strom für die Lichtanlage und lädt gleichzeitig die Batterie nach. Kennen Sie Fahrzeugtypen, bei denen Anlasser und Lichtmaschine zu einer einzigen Gleichstrommaschine vereinigt sind?



### 1. Gleichrichtung des Wechselstroms durch einen Kollektor

Wechselstrom ist für bestimmte technische Produktionsverfahren und die Inbetriebnahme mancher Geräte wegen der periodischen Änderung der Stromrichtung ungeeignet. In solchen Fällen muß der Wechselstrom durch *Gleichstrom* ersetzt werden. Gleichstromgeneratoren arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Wechselstromgeneratoren. Ein Unterschied besteht nur darin, daß die Schleifringe des Wechselstromgenerators beim Gleichstromgenerator durch den sogenannten *Kollektor* ersetzt sind. Der Kollektor wird vielfach auch als *Kommutator* oder als *Stromwender* bezeichnet. Der Kollektor hat die Aufgabe, den induzierten Wechselstrom gleichzurichten. Das Modell eines Gleichstromgenerators mit einer einfachen Drahtschleife als Anker und einem Kollektor aus zwei Lamellen zeigt Bild 87/2.

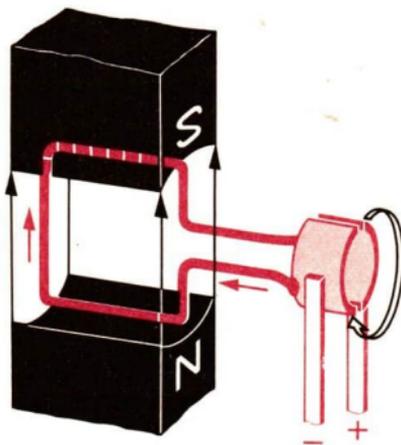


Bild 87/2 Gleichstromgenerator mit einfacher Ankerschleife

Die beiden Enden der Ankerschleife sind mit je einer Lamelle des Kollektors fest verbunden. In dem rotierenden Anker wird der Strom induziert und über den sich mittdrehenden Kollektor auf die feststehenden Kohlebürsten weitergeleitet. Durch das Schleifen der Kohlebürsten auf dem rotierenden Kollektor wird ein hinreichender elektrischer Kontakt zur Stromabnahme gewährleistet.

Die Wirkungsweise eines Gleichstromgenerators kann ähnlich wie beim Wechselstromgenerator (vgl. S. 46 und 53) mit Hilfe der UVW-Regel erklärt werden. Der Zusammenhang zwischen der jeweiligen Lage des rotierenden Ankers und der induzierten Gleichspannung ist in Bild 88/1 grafisch dargestellt.

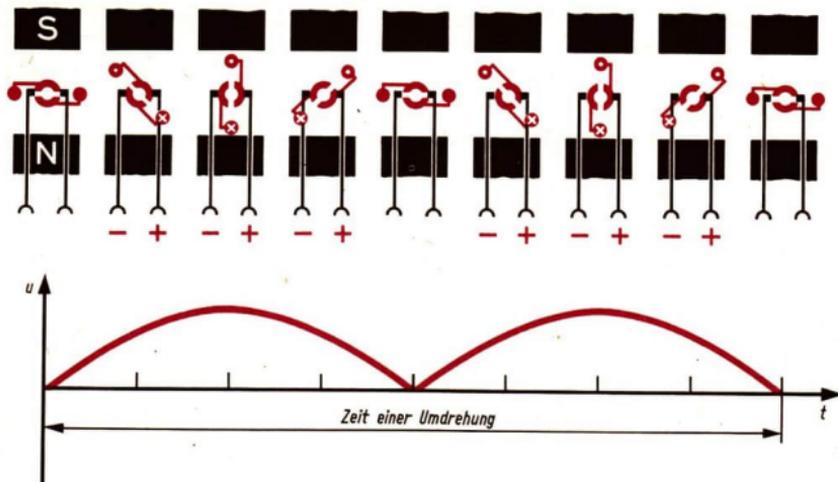


Bild 88/1 Die Höhe der induzierten Gleichspannung in Abhängigkeit von der Augenblicklichen Lage des rotierenden Ankers

Die entgegengesetzten elektrischen Stromrichtungen in den beiden entscheidenden Teilen der Ankerschleife sind durch  $\oplus$  und  $\ominus$  angedeutet. Im ersten Fall verläuft die elektrische Stromrichtung vom Betrachter des Bildes weg. Im zweiten Fall verläuft sie auf den Betrachter zu.

Ein Strom, der seine Richtung stets beibehält, seine Stärke aber periodisch ändert, wird als **pulsierender Gleichstrom** bezeichnet.

- Diskutieren Sie das Spannungs-Zeit-Diagramm in Bild 88/1! Beachten Sie besonders die Verhältnisse bei „horizontaler“ Stellung des Ankers! Entwickeln Sie das Spannungs-Zeit-Diagramm für einen Gleichstromgenerator aus RFT-Aufbauteilen!

Um die Wirksamkeit der Gleichstromgeneratoren zu verbessern, wird der Anker mit möglichst vielen Wicklungen versehen. Mit der Zahl der Wicklungen wächst die Zahl der Kollektorlamellen, da der Anfang und das Ende jeder Wicklung an eine gesonderte Lamelle führen. Die Wicklungen werden so miteinander verbunden, daß sie alle gleichzeitig zur Erzeugung der Klemmenspannung beitragen. In jeder Wicklung wird eine stark pulsierende Gleichspannung erzeugt. Die Überlagerung aller pulsierenden Gleichspannungen ergibt eine **geglättete Gleichspannung**. In Bild 89/2 ist der Einfluß der Wicklungszahl auf die Höhe und die Glättung der induzierten Spannung zeichnerisch wiedergegeben.

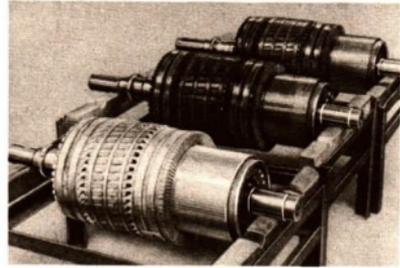


Bild 89/1 Trommelanker technischer Gleichstrommaschinen

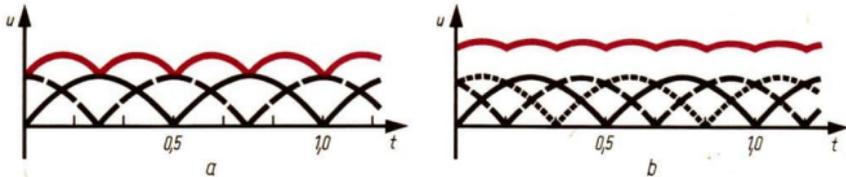


Bild 89/2

- a) Spannungs-Zeit-Diagramm eines Gleichstromgenerators mit *zwei* Ankerwicklungen
- b) Spannungs-Zeit-Diagramm eines Gleichstromgenerators mit *drei* Ankerwicklungen

Bei der Elektrolyse und der galvanischen Metallveredlung, bei der Aufladung von Akkumulatoren, bei der Magnetfelderzeugung in Wechselstrom- und Drehstromgeneratoren, beim Antrieb von S-Bahn, U-Bahn, Straßenbahn, O-Bus usw. wird Gleichstrom verwendet. Elektrische Haupt- und Nebenuhren werden häufig mit Gleichstrom betrieben.

## 2. Das dynamoelektrische Prinzip

In großen Gleichstromgeneratoren reichen gewöhnliche Dauermagnete zur Erzeugung eines hinreichend starken Magnetfeldes im allgemeinen nicht aus. Darum verwendet man an ihrer Stelle Elektromagnete, die mit Gleichstrom erregt werden. Entnimmt man den Gleichstrom zur Erzeugung des Magnetfeldes einer fremden Gleichstromquelle, so spricht man von einer *Fremderregung des Generators*. Dieses Verfahren ist recht umständlich, da zur Erregung des Generators eine gesonderte Gleichstromquelle benötigt wird. Aus diesem Grunde suchte man nach Wegen, den Erregerstrom dem Gleichstromgenerator selbst zu entnehmen. Ein solches Verfahren der

Stromerzeugung, bei dem keine Hilfsstromquelle notwendig ist, bezeichnet man als *Selbsterregung des Generators*.

Im Jahre 1866 gelang es WERNER v. SIEMENS (1816 bis 1892), Generatoren zu bauen, die keine zusätzliche Stromquelle brauchen. Er konnte zeigen, daß beim Drehen des Generatorankers der im Weicheisenkern stets vorhandene Restmagnetismus ausreicht, um einen geringen Ankerstrom zu erzeugen. Der induzierte Strom wird durch die Feldwicklungen geschickt und verstärkt somit das Magnetfeld. Auf Grund des kräftigeren Magnetfeldes wird wiederum ein stärkerer Strom im Anker induziert. Der Strom fließt durch die Feldwicklungen und ruft abermals eine Feldverstärkung hervor. Der Vorgang wiederholt sich, bis durch magnetische Sättigung des Eisens ein Endzustand im Generator erreicht worden ist. In einem Magnetfeld befindliches Eisen kann durch dieses nur bis zu einem Höchstwert magnetisiert werden. Ist dieser Wert erreicht, spricht man von magnetischer Sättigung. Die Nutzung des Restmagnetismus beim Inbetriebsetzen des Generators und das gegenseitige Aufschaukeln von Ankerstrom und magnetischem Feld bezeichnet man als **dynamoelektrisches Prinzip**. Erst die Entdeckung dieses Prinzips ermöglichte die schnelle Entwicklung der Elektrotechnik in den letzten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts.

### 3. Gleichstromgeneratoren

Für die Selbsterregung von Gleichstromgeneratoren wurden verschiedene Schaltungsarten entwickelt. Man unterscheidet:

*Gleichstromreihenschlußgeneratoren* und *Gleichstromnebenschlußgeneratoren*.

**Beim Gleichstromreihenschlußgenerator liegen Ankerwicklung, Feldwicklung und Energieabnehmer in Reihe.**

Die Anker- und Feldwicklungen eines Gleichstromreihenschlußgenerators sind aus dickem Draht gewickelt und haben nur wenige Windungen. Bei Leerlauf wird keine Spannung induziert. Erst bei Belastung nimmt die Spannung stark zu.

Reihenschlußgeneratoren werden in der Praxis nur selten angewendet, da die erzeugte Spannung zu stark von der Belastung des Generators abhängt. Sie können nur dort eingesetzt werden, wo die Stromentnahme während der Betriebsdauer konstant bleibt. Beim Einzelbetrieb von (Schiffs-) Scheinwerfern werden beispielsweise Reihenschlußgeneratoren verwendet.

**Beim Gleichstromnebenschlußgenerator liegen Ankerwicklung, Feldwicklung und Energieabnehmer parallel.**

Beim Gleichstromnebenschlußgenerator besteht die Ankerwicklung aus wenigen Windungen dicken Drahtes und die Feldwicklung aus vielen Windungen dünnen Drahtes. Im Leerlauf wird die volle Spannung erzeugt. Unter Belastung sinkt die Spannung nur wenig ab.

Nebenschlußgeneratoren werden vor allem bei der Gleichstromerzeugung in den Elektrizitätswerken bestimmter Industriebetriebe verwendet. Kleine Nebenschlußgeneratoren sind in Kraftfahrzeugen und Vollbahnen installiert; sie liefern den Strom für die Beleuchtungsanlagen und dienen zum Aufladen der Akkumulatoren.

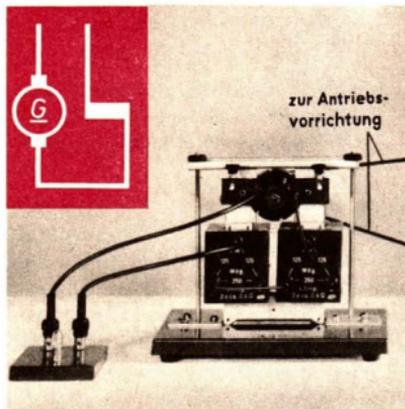


Bild 91/1 Gleichstromreihenschlußgenerator aus Aufbauteilen; Schaltzeichen

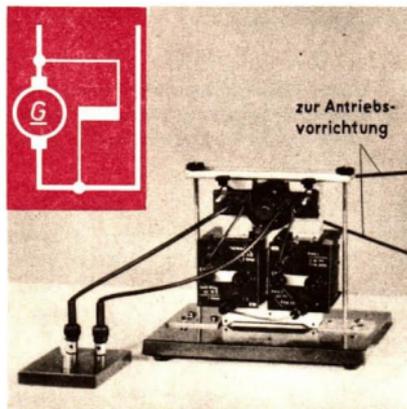


Bild 91/2 Gleichstromnebenschlußgenerator aus Aufbauteilen; Schaltzeichen

Gleichstromgeneratoren können wie Elemente hintereinander oder parallel geschaltet werden (vgl. S. 15). Durch die Reihenschaltung der Generatoren wird die angegebene Spannung erhöht und durch die Parallelschaltung der Generatoren die abgegebene Gesamtstromstärke heraufgesetzt.

In den Elektrizitätswerken von Walz- und Hüttenwerken mit stoßweise auftretender Belastung arbeiten sogenannte *Doppelschlußgeneratoren*. Doppelschlußgeneratoren haben zwei getrennte Feldwicklungen, eine *Hauptschlußwicklung* und eine *Nebenschlußwicklung*. Diese Maschinen vereinigen die Eigenschaften beider Generatortypen miteinander.

- *Entwickeln Sie das Schaltschema eines Gleichstromdoppelschlußgenerators! Informieren Sie sich in einschlägigen Fachbüchern über den Aufbau und die Wirkungsweise dieser Generatorarten!*

#### 4. Gleichstrommotoren

Wird eine Gleichstrommaschine mechanisch angetrieben, so liefert sie einen Gleichstrom. In diesem Falle arbeitet sie nach dem Prinzip eines Gleichstromgenerators. Legt man umgekehrt an dieselbe Gleichstrommaschine eine Gleichspannung, so arbeitet sie als Gleichstrommotor und ist in der Lage, andere Maschinen oder Geräte mechanisch anzutreiben.

**Eine Gleichstrommaschine kann je nach Art der Energieumwandlung als Generator oder als Motor arbeiten.**

Man unterscheidet auch bei Gleichstrommotoren zwischen

*Gleichstromreihenschlußmotor*

und

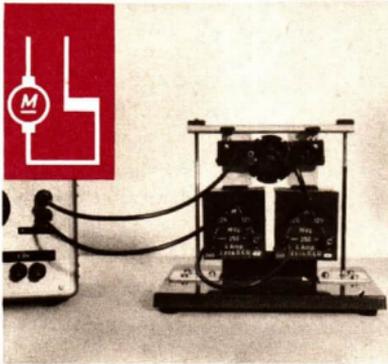
*Gleichstromnebenschlußmotor.*

Beim Gleichstromreihenschlußmotor werden die Spannungsquelle, die Ankerwicklung und die Feldwicklung in Reihe geschaltet.

Die Anker- und die Feldwicklung des Reihenschlußmotors bestehen aus wenigen Windungen. Sie sind aus dickem Draht hergestellt, da bei starker Belastung und beim Anlaufen des Motors erhebliche Stromstärken auftreten. Nimmt die Drehzahl des Motors zu, dann wird eine größere Gegenspannung induziert und die Stromstärke wird geringer.

Da der Reihenschlußmotor beim Anlaufen unter Last ein großes Anzugsvermögen entwickelt, ist er für den Antrieb elektrischer Bahnen, Hebezeuge, Walzstraßen, Fördermaschinen usw. mit ihrem stoßartigen Antrieb besonders geeignet. Ein Nachteil des Reihenschlußmotors besteht darin, daß er bei Unterlast oder Leerlauf sehr hohe Drehzahlen erreicht. Die Maschine kann dabei auf Grund der auftretenden Fliehkräfte beschädigt oder sogar zerstört werden.

Bild 92/1 Gleichstromreihenschlußmotor aus Aufbauteilen; Schaltzeichen



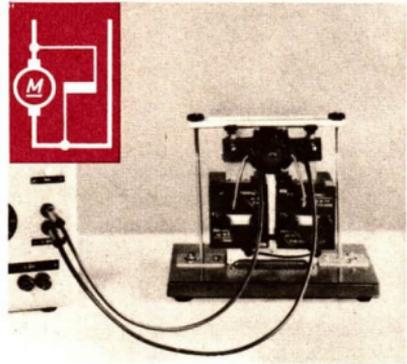
Beim Gleichstromnebenschlußmotor werden die Spannungsquelle, die Ankerwicklung und die Feldwicklung parallel geschaltet.

Beim Nebenschlußmotor ist die Ankerwicklung aus wenigen Windungen dicken Drahtes hergestellt, die Feldwicklung besteht aus vielen Windungen dünnen Drahtes. Bei unterschiedlicher Belastung des Motors ändert sich nur der Ankerstrom, die Stromstärke in der Feldwicklung bleibt konstant. Die Drehzahl ist von der Belastung nahezu unabhängig.

Das Anzugsvermögen des Nebenschlußmotors ist verhältnismäßig gering.

Wegen der bequemen Drehzahlregulierung durch einen Schiebewiderstand vor der Feldwicklung (Feldsteller, oft fälschlich Feldregler genannt) und der geringen Drehzahländerung bei Belastung ist der Nebenschlußmotor besonders zum Antrieb solcher Arbeitsmaschinen geeignet, die konstante Drehzahlen erfordern. So werden Werkzeugmaschinen oft mit Gleichstromnebenschlußmotoren angetrieben.

Bild 92/2 Gleichstromnebenschlußmotor aus Aufbauteilen; Schaltzeichen



- *Bauen Sie aus Aufbauteilen einen Gleichstromreihenschlußmotor zusammen und fertigen Sie die entsprechende Schaltskizze an! Wiederholen Sie die Aufgabe für einen Gleichstromnebenschlußmotor!*

*Ordnen Sie den Aufbauteilen der Gleichstrommotoren die entsprechenden standardisierten Schaltzeichen zu! Beachten Sie die Darstellung der Schaltzeichen gegenüber den Aufbauteilen! Messen Sie die Anlaufstromstärke eines Gleichstrommotors und vergleichen Sie die Anlaufstromstärke mit der Betriebsstromstärke!*

Da beim Einschalten von Gleichstrommotoren erhebliche Stromstärken auftreten, müssen die Maschinen durch Anlaßwiderstände vor Beschädigungen geschützt werden (Bild 93/1).

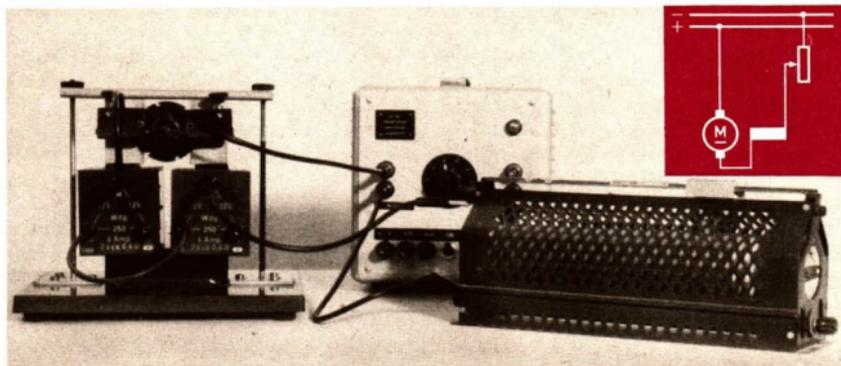


Bild 93/1 Gleichstromreihenschlußmotor mit Anlaßwiderstand. Die Anlaßwiderstände begrenzen die Stromstärke in der Maschine und werden beim Inbetriebsetzen der Motoren in dem Maße verkleinert, wie deren Drehzahl wächst

Ist der Motor angelaufen, so wirkt die Maschine infolge der Ankerdrehung im Magnetfeld gleichzeitig als Gleichstromgenerator und erzeugt eine Spannung  $U_G$ , die der Netzspannung  $U_N$  entgegenwirkt (vgl. Seite 53). Die wirksame Spannung ist also gleich der Differenz von Netzspannung und Gegenspannung. Dabei gilt die Beziehung:

$$\text{Motorstrom} = \frac{\text{Netzspannung minus Gegenspannung}}{\text{Ohmscher Widerstand des Motors}}$$

$$I = \frac{U_N - U_G}{R}$$

- *Zeichnen Sie ähnlich wie in Bild 93/1 die Schaltung für einen Gleichstromnebenschlußmotor mit Anlasser!*

- Diskutieren Sie die Formel  $I = \frac{U_N - U_G}{R}$  für den Augenblick des Anlassens, bei mittlerer Belastung und für Leerlauf!

Will man die Drehrichtung des rotierenden Ankers in einem Reihenschlußmotor umkehren, so müssen die beiden Anschlüsse des Ankers oder die beiden Anschlüsse der Feldwicklung untereinander vertauscht werden. Ändert man dagegen die Stromrichtung im Anker und in den Feldwicklungen durch Umpolen der Spannungsquelle, dann bleibt die Drehrichtung des Ankers erhalten.

- Geben Sie hierfür eine Erklärung!

Da die Drehrichtung eines Reihenschlußmotors von der Polarität der Gleichstromquelle unabhängig ist, liegt die Folgerung nahe, daß ein Reihenschlußmotor auch mit Wechselstrom betrieben werden kann.

- Überprüfen Sie die Folgerung, indem Sie aus RFT-Aufbauteilen einen Reihenschlußmotor mit Trommelanker zusammensetzen und den Motor einmal mit Gleichstrom und einmal mit Wechselstrom speisen! Beachten Sie dabei, daß bei angelegter Wechselspannung neben dem Ohmschen Widerstand zusätzlich ein induktiver Widerstand auftritt! Welche Folgerungen ergeben sich daraus für die Höhe der benötigten Wechselspannung, wenn die Drehzahl des Motors in beiden Fällen gleich groß bleiben soll?

Motoren, die mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom angetrieben werden können, bezeichnet man als *Universalmotoren*. Sie sind im allgemeinen nur für kleine Leistungen ausgelegt. Elektrische Haushaltsgeräte besitzen meist Universalmotoren.

## ZUSAMMENFASSUNG

**Die Stromabnahme beim Gleichstromgenerator und die Stromzuführung beim Gleichstrommotor erfolgen über den Kollektor.**

Vergleichen Sie den Kollektor einer Gleichstrommaschine mit den entsprechenden Teilen einer Wechselstrommaschine!

**Beim Gleichstromgenerator nimmt die Höhe der induzierten Gleichspannung mit der Zahl der Ankerwicklungen zu. Die Schwankungen des pulsierenden Gleichstroms werden um so kleiner, je größer die Zahl der Ankerwicklungen ist.**

Zeichnen Sie das Spannungs-Zeit-Diagramm eines Gleichstromgenerators mit vier Ankerwicklungen!

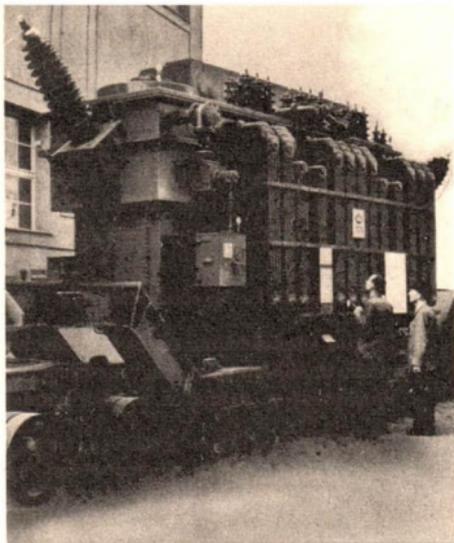
**Gleichstrommaschinen können als Reihenschluß- oder als Nebenschlußmaschinen betrieben werden.**

Wodurch unterscheiden sich Reihenschluß- und Nebenschlußmaschinen?

# Transformator

Wandertransformatoren werden auf Tiefladewagen der Reichsbahn oder auf besonderen Straßenfahrzeugen betriebsfertig vom Herstellerwerk zum Aufstellungsort transportiert. Derartige Großtransformatoren haben oft einen trapezförmig nach oben verjüngten Grundkörper.

Können Sie sich erklären, warum man in der Praxis gerade diese Form wählen muß?



## 1. Grundlagen

Wenn man Wechselstrom durch eine Spule schickt und in unmittelbarer Nähe eine zweite Spule so aufstellt, daß das Magnetfeld der stromdurchflossenen Spule die Windungsflächen der zweiten Spule durchsetzt, dann wird in der zweiten Spule infolge der Induktion eine meßbare Wechselspannung induziert. Die Spannung in der zweiten Spule läßt sich erhöhen, wenn man beide Spulen auf einen geschlossenen Eisenkern setzt. Eine solche Vorrichtung bezeichnet man als *Transformator* oder als *Umspanner* (Schaltzeichen Bild 95/2). Jeder Transformator hat eine Eingangsseite und eine Ausgangsseite. Die Spule auf der Eingangsseite bezeichnet man als *Primärspule*, die Spule auf der Ausgangsseite als *Sekundärspule*. Beide Spulen sind induktiv<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Neben der bisher behandelten Möglichkeit, Stromkreise durch stromführende Drähte, Kabel usw. zu verbinden (auch galvanische Verbindung genannt), können Stromkreise auch durch Spulen (induktive Kopplung) oder Kondensatoren (kapazitive Kopplung) verbunden werden. Näheres darüber in Klasse 10.

	<i>Transformator allgemein</i>
	<i>Transformator mit Eisenkern</i>
	<i>Transformator mit Luftspalt im Eisenkern</i>
	<i>Transformator ohne Kern</i>

Bild 95/2 Schaltzeichen des Transformators

gekoppelt, wobei der Eisenkern der Träger des magnetischen Wechselfeldes ist. Eine galvanische Verbindung zwischen den Spulen besteht nicht. Die Frequenz der Sekundärspannung stimmt mit der Frequenz der Primärspannung überein.

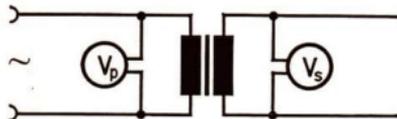
## 2. Der ideale Transformator

### 2.1. Spannungsübersetzung

Bei einem Transformator hat die Ausgangsspannung (Sekundärspannung) meist einen anderen Wert als die Eingangsspannung (Primärspannung). Ist die Windungszahl der Sekundärspule größer als die Windungszahl der Primärspule, so ist auch die Sekundärspannung höher als die Primärspannung. Mit der Versuchsanordnung nach Bild 96/1 kann der gesetzmäßige Zusammenhang bei der Spannungserhöhung leicht ermittelt werden.

24

**V** Bauen Sie aus einem geblätternen U-Kern, einem I-Kern und zwei Spulen mit 125 Windungen bzw. 250 Windungen einen Transformator zusammen! Legen Sie die im Meßprotokoll angegebenen Spannungen an die Primärspule des Transformators!



Messen Sie die dazugehörigen Sekundärspannungen! Wechseln Sie die Spulen gegen Spulen mit anderen Windungszahlen aus und vervollständigen Sie das Meßprotokoll an Hand ihrer Meßwerte!

Meßprotokoll

$N_p$	$N_s$	$\frac{N_p}{N_s}$	$U_p$ in V	$U_s$ in V	$\frac{U_p}{U_s}$	$N_p$	$N_s$	$\frac{N_p}{N_s}$	$U_p$ in V	$U_s$ m V	$\frac{U_p}{U_s}$
125	250	0,50	1	...	...	750	1500	0,50	1	...	...
125	250	0,50	2	...	...	750	1500	0,50	2	...	...
125	250	0,50	3	...	...	750	1500	0,50	3	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
250	500	0,50	1	...	...	500	1500	0,33	1	...	...
250	500	0,50	2	...	...	...	...	...	...	...	...
250	500	0,50	3	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	125	500	0,25	1	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Die Versuchsdurchführung ergibt, daß die Spannungserhöhung vom Verhältnis der Windungszahlen beider Spulen abhängt. Die Absolutwerte der Spannungen haben keinen Einfluß auf das Spannungsverhältnis.

Der Quotient aus  $U_p$  und  $U_s$  wird als *Spannungsübersetzung* bezeichnet.

Wählt man die Windungszahl der Sekundärspule  $N_s$  kleiner als die Windungszahl der Primärspule  $N_p$ , so wird auch die Sekundärspannung im Vergleich zur angelegten Primärspannung niedriger.

- Führen Sie hierzu entsprechende Versuche durch! Tragen Sie Ihre Meßwerte in ein Meßprotokoll ähnlich wie auf Seite 96 unten ein!

*Verallgemeinern Sie das Versuchsergebnis! Beachten Sie hierbei, daß die Spannungsübersetzung durch das Zusammenwirken verschiedener Gesetzmäßigkeiten gestört wird und niemals in völlig reiner Form in Erscheinung tritt. Die idealen Verhältnisse, die sich auf den verlustlos arbeitenden Transformator (idealer Transformator) beziehen, können in der Praxis nur annähernd erreicht werden. Solche Überlegungen sind bei der Formulierung physikalischer Gesetze immer anzustellen.*

*Wie hoch ist die Sekundärspannung im Vergleich zur Primärspannung, wenn die Primärspule und die Sekundärspule gleiche Windungszahlen haben?*

Bei einem idealen Transformator verhält sich die Primärspannung zur Sekundärspannung wie die Windungszahl der Primärspule zur Windungszahl der Sekundärspule.

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

- Die Primärspule eines Klingeltransformators für 220-V-Netzspannung hat 1650 Windungen. Wieviel Windungen besitzt die Sekundärspule, wenn sie eine Spannung von 6 V abgibt?

## 2.2. Stromstärkeübersetzung

Da sich die Spannungen durch Transformatoren herauf- und heruntersetzen lassen, ist auf Grund des Energieerhaltungssatzes anzunehmen, daß sich mit den Spannungen auch die Stromstärken ändern. Diese Vermutung kann mit der Versuchsanordnung nach Bild 97/1 experimentell überprüft werden.

25

**V** Die Sekundärspule ist hierbei mit einem Strommesser kurzzuschließen. Mit Hilfe eines Schiebewiderstands wird immer ein bestimmter Primärstrom eingestellt. Die dazugehörigen Stromstärken im Sekundärkreis des Transformators werden am Strommesser  $A_s$  abgelesen.

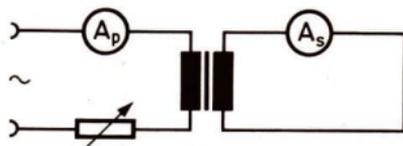


Bild 97/1 Stromstärkemessungen an einem Transformator

- Vervollständigen Sie das nachstehende Meßprotokoll, indem Sie die entsprechenden Messungen durchführen!

#### Meßprotokoll

$N_p$	$N_s$	$\frac{N_p}{N_s}$	$I_p$ in A	$I_s$ in A	...	$N_p$	$N_s$	$\frac{N_p}{N_s}$	$I_p$ in A	$I_s$ in A	...
250	500	0,5	0,5	...	...	250	250	1,0	1,5	...	...
250	500	0,5	1,0	...	...	250	250	1,0	2,0	...	...
250	500	0,5	1,5	...	...	250	125	2,0	0,5	...	...
250	500	0,5	2,0	...	...	250	125	2,0	1,0	...	...
250	250	1,0	0,5	...	...	250	125	2,0	1,5	...	...
250	250	1,0	1,0	...	...	250	125	2,0	2,0	...	...

Bei einem idealen Transformator verhält sich die Stromstärke in der Primärspule zur Stromstärke in der Sekundärspule wie die Windungszahl der Sekundärspule zur Windungszahl der Primärspule.

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Der Quotient aus  $I_p$  und  $I_s$  wird als *Stromstärkeübersetzung* bezeichnet.

- Durch die Primärspule eines Experimentiertransformators mit 1500 Windungen fließt ein Strom mit einer Stromstärke von 0,9 A. Wie groß ist die Stromstärke in der Sekundärspule mit 10 Windungen?

### 2.3. Transformatorgleichung

Für die Stromstärke- und Spannungsänderungen am idealen Transformator gilt die Transformatorgleichung.

Bei einem idealen Transformator ist das Produkt aus Primärstromstärke und Primärspannung gleich dem Produkt aus Sekundärstromstärke und Sekundärspannung.

$$I_p \cdot U_p = I_s \cdot U_s$$

Wird durch einen Transformator die Spannung erhöht, so verringert sich gleichzeitig die Stromstärke. Setzt man umgekehrt die Spannung herab, dann erhöht sich die Stromstärke.

- Der Transformator für den Betrieb einer Kohlebogenlampe gibt sekundärseitig eine Spannung von 44 V ab. Bei einer Netzspannung von 220 V fließt ein Sekundärstrom mit einer Stromstärke von 10 A. Für welche Stromstärke muß der Draht der Primärspule ausgelegt sein?

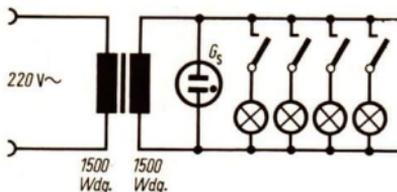
### 3. Der technische Transformator

Die Transformatorgleichung  $I_p \cdot U_p = I_s \cdot U_s$  gilt nur für den idealen Transformator und läßt sich in der Praxis nicht realisieren. In Wirklichkeit zeigt jeder Transformator bestimmte „Energieverluste“, die sich auf die Stromstärke- und Spannungsübersetzung auswirken. Man unterscheidet hierbei *Kupferverluste* und *Eisenverluste*. Als Kupferverluste bezeichnet man die Verluste, die durch Erwärmung der Wicklungsdrähte des Transformators hervorgerufen werden. Unter dem Begriff Eisenverlust faßt man die Verluste zusammen, die infolge der Wirbelstrombildung und der Ummagnetisierung in den Eisenkernen auftreten. Durch geeignete Wahl der Werkstoffe können die „Energieverluste“ in bestimmten Grenzen gehalten werden. So verwendet man anstelle voller Eisenkerne geblätterte Kerne aus Dynamoblechen.

Dynamobleche sind Eisenbleche mit hoher Magnetisierbarkeit und geringen Ummagnetisierungsverlusten im magnetischen Wechselfeld. Das Eisen der Bleche enthält außerdem einen bestimmten Siliziumzusatz, um die elektrische Leitfähigkeit der Bleche herabzusetzen und somit die Ausbildung der Wirbelströme zu verringern. Auch der Zuschnitt der Eisenbleche, die Stoßfugen der Blechpakete, die Wicklungsart der Spulen und vieles mehr üben einen Einfluß auf die Elektroenergieverluste des Transformators aus.

Für den Techniker und den Betriebsökonom sind die Spannungs Konstanz bei zunehmender Belastung und der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Belastung von größter Bedeutung. Belastet man einen Transformator, so fällt die Sekundärspannung mehr oder weniger ab. Mit der Versuchsanordnung nach Bild 99/1 läßt sich diese Erscheinung demonstrieren.

Bild 99/1 Der Einfachheit halber ist für die Windungszahlen das Übersetzungsverhältnis 1:1 gewählt worden. Die Glühlampe  $G_S$  dient der Spannungsanzeige. Die Glühlampe kann auch durch einen Spannungsmesser ersetzt werden. Schaltet man nacheinander die einzelnen Glühlampen in den Sekundärkreis, so erlischt die Glühlampe.

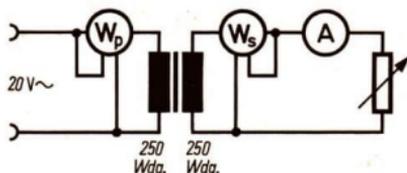


26

**V** Ändern Sie die Versuchsanordnung nach Bild 99/1 so ab, daß Sie den Versuch mit Niederspannung durchführen können! Hierbei muß die Glühlampe durch einen geeigneten Spannungsmesser ersetzt werden, um das Absinken der Spannung festzustellen.

Das Absinken der Sekundärspannung bei zunehmender Belastung wirkt sich auch auf den Wirkungsgrad des Transformators aus. Der Wirkungsgrad eines Kleintransformators kann durch direkte Leistungsmessungen ermittelt werden (Bild 100/1). Die Sekundärstromstärke ist ein Maß für die Belastung. Der Quotient aus Sekundärleistung und Primärleistung ergibt den Wirkungsgrad.

Bild 100/1 Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wirkungsgrades. Die Stromstärke im Sekundärkreis wird mit Hilfe eines Schiebewiderstands eingestellt



Meßprotokoll

$I_s$ in A	$P_p$ in W	$P_s$ in W	$\eta = \frac{P_s}{P_p}$
0,25	6,0	4,0	0,67
0,50	10,8	8,0	0,76
0,75	...	...	...
1,00	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
2,00	...	...	...

- Vervollständigen Sie an Hand Ihrer Messungen das vorstehende Meßprotokoll! Tragen Sie in einem Koordinatensystem den Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Sekundärstromstärke auf!

Aus der Meßreihe folgt, daß der Wirkungsgrad bei einer bestimmten Sekundärstromstärke ein Maximum annimmt.

Belastung und technische Daten eines Transformators müssen also aufeinander abgestimmt sein, wenn ein optimaler Wirkungsgrad erreicht werden soll. Der Wirkungsgrad der technischen Großtransformatoren liegt wesentlich höher als der von Kleintransformatoren. Die großen Transformatoren in den Umspannwerken haben teilweise einen Wirkungsgrad von 99,5%. Die Großtransformatoren konnten somit im Laufe der Entwicklung zu den wirtschaftlichsten Gliedern der Energieversorgung entwickelt werden.

#### 4. Technische Ausführung der Transformatoren

Im Transformatorenbau unterscheidet man *Kerntransformatoren* und *Manteltransformatoren*.

Bei einem Kerntransformator befindet sich auf jedem Eisenschenkel eine Spule (Bild 101/1 a). Die Primär- und die Sekundärspule stehen verhältnismäßig weit auseinander und sind durch Joche magnetisch verbunden. Diese Transformatorform wird wegen der starken Streuverluste des Magnetfeldes nur für kleine Leistungen hergestellt.

Beim Manteltransformator liegen die Primärspule und die Sekundärspule auf nur einem Eisenschenkel unmittelbar nebeneinander oder übereinander (Bild 101/1 b). Für den Bau von Manteltransformatoren wird mehr Eisen benötigt als für Kerntransformatoren, dafür liegt der Wirkungsgrad höher als bei den Kerntransformatoren.

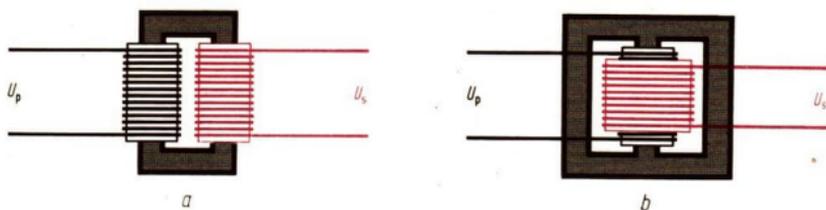


Bild 101/1a) Kerntransformator; b) Manteltransformator

Transformatoren werden in vielen Bereichen der Technik eingesetzt.

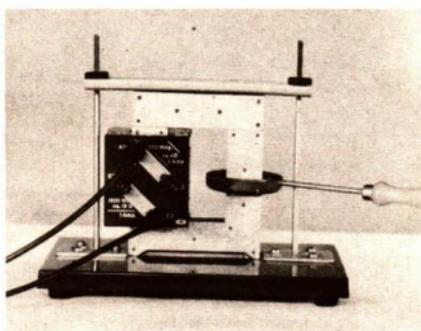
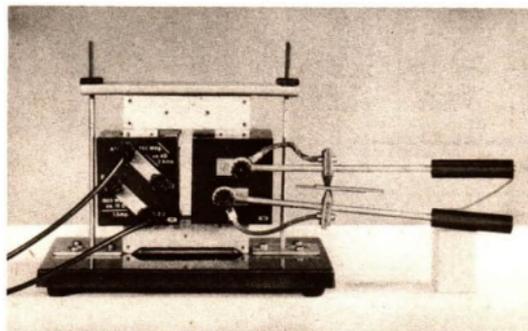
Das Transformatorprinzip wird auch in *Schweißmaschinen* und *Schmelzöfen* angewendet. Die Modelle eines Schweißtransformators und eines Induktionsschmelzofens sind in dem Bild 101/2 wiedergegeben. In beiden Fällen werden mit Hilfe eines Transformators hohe Stromstärken erzeugt und damit starke Erwärmungen hervorgerufen.

Oftmals beeinflussen äußere Gegebenheiten die Konstruktion der Transformatoren. So müssen Großtransformatoren, die auf dem Schienenwege transportiert werden, in ihrer Formgebung dem Eisenbahnprofil angepaßt sein (vgl. Bild auf Seite 95).

Damit an einem Transformator verschiedene Spannungen abgegriffen werden können, sind die Sekundärspulen an mehreren Stellen angezapft. Durch entsprechendes Umklemmen läßt sich das Übersetzungsverhältnis des Transformators ändern. Von der Möglichkeit des Umklemmens macht man zum Ausgleich von Netzspannungen oftmals Gebrauch. Dazu muß der Transformator völlig abgeschaltet werden. Um Spannungsschwankungen im Netz ohne das störende Abschalten des Transformators

Bild 101/2 links. Modell eines Schweißtransformators für Widerstandsschweißung. Beim Schweißtransformator werden zwei Stahlblechstreifen zwischen den Elektroden der Schweißzange zunächst lose zusammengedrückt. Infolge der großen Stromstärke und des hohen Übergangswiderstandes beginnen die Bleche an den Berührungsstellen zu glühen. Durch einen kurzen, kräftigen Druck mit der Zange werden die beiden Bleche schließlich punktförmig verschweißt.

Rechts: Modell eines Induktionsschmelzofens. In einem technischen Induktionsschmelzofen bildet das Schmelzgut in der Schmelzrinne die Sekundärwicklung des Transformators. Einige Anlagen liefern sekundärseitig Stromstärken von 100000 A



ausgleichen zu können, wurden auch Transformatoren mit *Handsteuerung* oder *Regeleinrichtungen* konstruiert. Ein Regler betätigt bei Spannungsänderungen selbstständig einen Stellmotor, durch den der Stufenschalter des Transformators geschaltet wird. In den sogenannten *Drehtransformatoren* kann die Spannung innerhalb gewisser Grenzen durch bewegliche Wicklungen auch *stetig* geregelt werden.

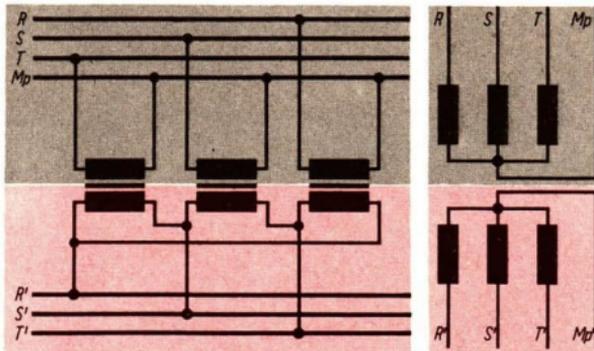
Die Verwendungsmöglichkeit reicht vom Miniaturtransformator in Transistorschaltungen über viele technische Varianten in den verschiedenartigsten Geräten bis zum Großtransformator in den Umspannwerken. Trotz der starken Unterschiede in Aufbau und Leistung unterliegen alle Transformatoren denselben physikalischen Gesetzen.

## 5. Drehstromtransformator

In den Generatoren der Großkraftwerke wird fast ausschließlich Dreiphasenwechselstrom erzeugt. Zur Fortleitung des Dreiphasenwechselstroms in einem Dreileiter- bzw. Vierleitersystem muß wie bei einphasigem Wechselstrom die Spannung durch Transformation den Betriebsbedingungen angepaßt werden. Eine solche Spannungsänderung kann mit drei getrennten *Einphasenwechselstromtransformatoren* oder mit einem einzigen *Dreiphasenwechselstromtransformator* vorgenommen werden. Beim Einsatz getrennter Einphasenwechselstromtransformatoren werden die drei Primärspulen unter sich stern- oder dreieckförmig zusammengeschaltet und die drei Sekundärspulen der drei Transformatoren ebenfalls stern- oder dreieckförmig verbunden. In der Schaltung nach Bild 102/1 (links) liegt eine sogenannte *Stern-Dreieck-Schaltung* vor. Hier sind die Primärspulen sternförmig und die Sekundärspulen dreieckförmig geschaltet.

- Ändern Sie die Schaltung nach Bild 102/1 in eine Stern-Stern-Schaltung um! Geben Sie das Schaltbild für eine Dreieck-Dreieck-Schaltung an!

Bild 102/1 Drei Einphasenwechselstromtransformatoren in einem Vierleitersystem in Stern-Dreieck-Schaltung. Die Primärseite des Transformators ist durch eine schwarze, die Sekundärseite durch eine rote Tonfläche im Bild hervorgehoben. Im Bild rechts ist das Schaltzeichen eines Dreiphasenwechselstromtransformators in Stern-Stern-Schaltung abgebildet.



## Fragen und Aufgaben

1. Welche technischen Geräte kennen Sie, in denen Transformatoren eingebaut sind?
2. Was wissen Sie über die Transformatorenwerke in der DDR? Informieren Sie sich in der einschlägigen Literatur und berichten Sie darüber!
3. Welche Schaltzeichen für Transformatoren gibt es?
4. Wozu wird Transformatoröl verwendet?
5. Geben Sie die Ursachen für die Elektroenergieverluste bei Transformatoren an!
6. Die Primärleistung eines Transformators beträgt 12500 kVA. Wie groß ist die Sekundärleistung bei einem Wirkungsgrad von 98,5%?
7. Die Strangspannung an den Primärspulen eines Dreiphasenwechselstromtransformators in Stern-Stern-Schaltung beträgt 6000 V. Die Primärspulen haben jeweils 300 Windungen; jede Sekundärspule besitzt 11 Windungen. Wie hoch ist die sekundärseitig abgegebene Leiterspannung (idealer Transformator)?

## Versuche

- V** 1. Setzen Sie aus zwei Spulen und einem geblättern Eisenkern einen Transformator zusammen und überprüfen Sie die Gesetze des Transformators! Wiederholen Sie die Messungen mit einem Vollkern!
- !** 2. Bauen Sie einen Transformator aus Aufbauteilen zusammen, so daß mit angelegter Niederspannung eine 220-Volt-Glimmlampe betrieben werden kann!
3. Messen Sie an einem Dreiphasenwechselstromtransformator in Stern-Stern-Schaltung bei verschiedenen Übersetzungsverhältnissen die Leiterspannung auf der Sekundärseite und vergleichen Sie die gemessene Spannung mit der Leiterspannung auf der Primärseite! Geben Sie die Spannungsverluste in Prozenten an!

## ZUSAMMENFASSUNG

**Der Transformator spannt Wechselstrom in Wechselstrom gleicher Frequenz um.**

Kann ein Transformator auch mit Gleichstrom betrieben werden?

**Bei einem sekundärseitig offenen Transformator ist das Übersetzungsverhältnis der Spannungen dem Verhältnis der Windungszahlen gleich.**

Was versteht man unter dem Übersetzungsverhältnis der Spannungen?

Erklären Sie den Ausdruck *sekundärseitig offener Transformator*!

**Bei einem sekundärseitig kurzgeschlossenen Transformator ist das Übersetzungsverhältnis der Stromstärken dem umgekehrten Verhältnis der Windungszahlen gleich.**

Was versteht man unter dem Übersetzungsverhältnis der Stromstärken?

Erklären Sie den Ausdruck *sekundärseitig kurzgeschlossener Transformator*!

**Die Transformatorgleichung lautet:  $I_p \cdot U_p = I_s \cdot U_s$**

Welche Voraussetzungen müssen angenommen werden, damit die Transformatorgleichung gilt?

## Energieversorgung



Die Förderung von Kohle, die Nutzung der Wasserkraft, die Versorgung mit Erdöl und Erdgas sind entscheidende Voraussetzungen für die Energieversorgung unserer Industrie.

Auf dem nebenstehenden Bild sehen Sie ein Fahrzeug des Berliner VEB Energieversorgung. Es trägt die Aufschrift

**Energie verwenden –  
nicht verschwenden!**

Wie ist dieser wichtige Hinweis zu verstehen?



### 1. Bedeutung der Energieversorgung

In allen hochindustrialisierten Ländern werden an die Versorgung der Industrie und Landwirtschaft mit elektrischer Energie hohe Anforderungen gestellt. Die Produktion und der Bedarf von Elektroenergie sind ein Gradmesser für das technische und ökonomische Niveau eines Landes. Die Leistungen der Energiewirtschaft bestimmen weitgehend das Entwicklungstempo der gesamten Volkswirtschaft. Aus diesem Grunde hat die Regierung der Deutschen Demokratischen Republik dem Neubau und der Rekonstruktion der Kraftwerke und dem Ausbau des Versorgungsnetzes die allergrößte Aufmerksamkeit gewidmet.

In der DDR wurde 1963 etwa dreimal so viel Elektroenergie gewonnen wie auf dem gleichen Territorium im Jahre 1936. Die Leistung der Kraftwerke in der DDR wuchs in den Jahren zwischen 1958 und 1963 von 6687 MW auf 8630 MW. Das entspricht einer Steigerung auf 129%. Unsere Republik zählt in der Pro-Kopf-Erzeugung an elektrischer Energie zu den führenden Staaten der Welt und liegt in dieser Rangliste vor Frankreich, Westdeutschland, Polen, der ČSSR und Österreich.

Während 1958/59 das Kraftwerk „ARTUR BECKER“ Trattendorf mit 450 MW noch der größte Neubau eines Kraftwerkes der Republik war, erreichte das Kraftwerk Lübbenau im Jahre 1964 bereits eine Leistung von 1300 MW. Es gehört damit zu den größten Kraftwerken der Welt auf Braunkohlenbasis.

Hauptabnehmer der Elektroenergie sind die chemische Industrie, der Bergbau und die metallverarbeitende Industrie.

Wie hoch der Energiebedarf ist, zeigt sich an folgenden Beispielen: Für die Herstellung einer Tonne Elektro Stahl sind etwa 1000 kWh, für eine Tonne Kalziumkarbid rund 3400 kWh und für eine Tonne Aluminium sogar 20 000 kWh erforderlich.

Etwa 7% bis 8% der erzeugten Elektroenergie werden in den Haushaltungen benötigt. Zimmerleuchten, Rundfunk- und Fernsehgeräte, Kühlschränke und Waschmaschinen, Bügeleisen, Kocher, Tauchsieder, Backöfen, Staubsauger, Küchenmaschinen, Rasierapparate usw. sind nicht mehr wegzudenkende Geräte des täglichen Lebens. Ihre Zahl steigt in den Haushalten von Jahr zu Jahr, so daß immer mehr elektrische Energie erforderlich ist.

Der Bedarf an elektrischer Energie steigt im Weltmaßstab infolge der zunehmenden Technisierung in jedem Jahr um etwa 7%. Neben der laufenden Rekonstruktion veralteter Werke muß also in jeweils 10 Jahren die Gesamtleistung aller Elektrizitätswerke verdoppelt werden. Das erfordert riesige Investitionsmittel und erfordert große Anstrengungen der Maschinenbauindustrie und des Anlagenbaus.

## 2. Kraftwerke

Die elektrische Energie wird überwiegend in Großkraftwerken gewonnen. Hierbei unterscheidet man *Dampfkraftwerke*, *Wasserkraftwerke*, *Atomkraftwerke*, *Dieselmotorkraftwerke*, *Windkraftwerke*, *Sonnenkraftwerke*, *Gezeitenkraftwerke* usw. (Bilder 106/1 bis 3). Der Bau von Kraftwerken hängt von den geographischen Gegebenheiten und den zur Verfügung stehenden Energiequellen ab. In der Deutschen Demokratischen Republik z. B. wird die elektrische Energie zum größten Teil in Dampfkraftwerken erzeugt, wobei überwiegend Rohbraunkohle, Braunkohlenbriketts und Braunkohlenschwelkoks als Brennstoff dienen. In Norwegen z. B. werden dagegen ausschließlich Wasserkraftwerke zur Energieerzeugung eingesetzt. Atomkraftwerke stehen zur Zeit am Anfang ihrer technischen und ökonomischen Einsatzfähigkeit. Die in den Atomkraftwerken gewonnene Energie ist augenblicklich noch teurer als die sonst erzeugte Elektroenergie. Wenn es gelingt, die Anlage- und Betriebskosten der Atomkraftwerke mit fortschreitender Erkenntnis und zunehmender technischer Reife wesentlich zu senken, so wird sich auch ihre Elektroenergieerzeugung wirtschaftlich lohnen. Die Forschungen zur Verbesserung der Atomkraftwerke werden in vielen Ländern intensiv betrieben. Solche vorwärtsweisenden Untersuchungen sind unbedingt notwendig, weil die Kohlevorräte in einigen Ländern stark abnehmen und man notgedrungen nach neuen Energiequellen suchen muß. Für den Betrieb von Atomkraftwerken stehen nahezu unerschöpfliche Energiemengen zur Verfügung.

## 3. Energiefortleitung

In den sehr langen Leitungen zwischen den Kraftwerken und den Energieabnehmern treten Spannungsabfälle bzw. Elektroenergieverluste auf. Wie aus dem Satz über die Summe der Teilspannungen in einem Leiterkreis und aus dem Ohmschen Gesetz abzuleiten ist, hängen die Elektroenergieverluste vom Quadrat der Stromstärke und

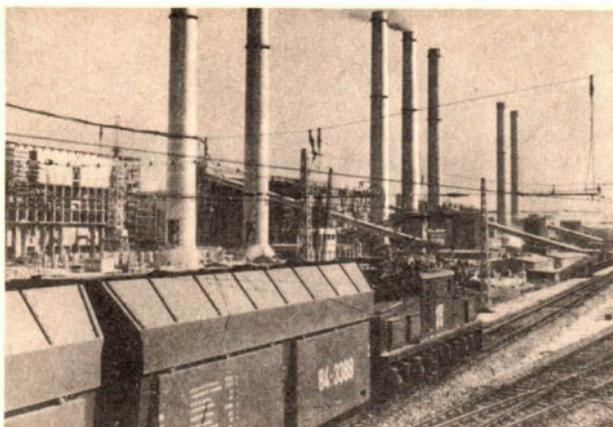


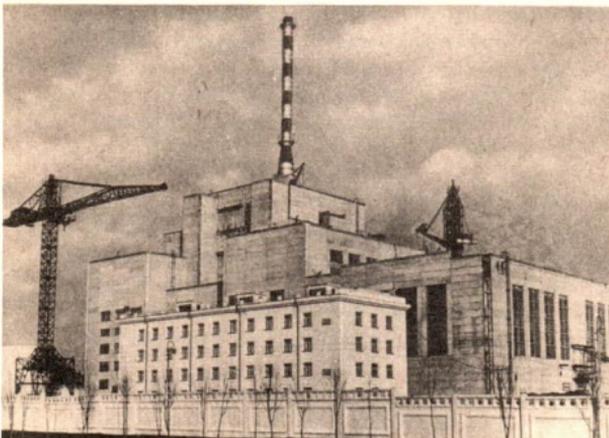
Bild 106/1 Dampfkraftwerk  
Lübbenau im Bezirk Cottbus

Bild 106/2 Wasserkraftwerk  
„W. I. LENIN“ bei Kuibyschew.

Bild 106/3 Atomkraftwerk  
von Nowo-Woronesch vor der  
Inbetriebnahme



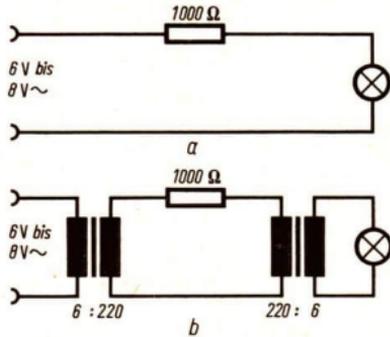
Dem energetischen Wirkungsgrad ist beim Neubau und beim Ausbau bestehender Kraftwerke große Beachtung zu schenken. Je größer ein Kraftwerk ist, desto günstiger liegt im allgemeinen der Wirkungsgrad. Bei den größten Kraftwerken erreicht man einen Wirkungsgrad von etwa 40%. Darum ist es günstiger, ein großes Kraftwerk anstelle mehrerer kleiner Kraftwerke zu bauen. Die Großkraftwerke der DDR werden meist in unmittelbarer Nähe der Braunkohlevorkommen angelegt, um hohe Transportkosten zu vermeiden. Nach der Energieumwandlung wird die elektrische Energie über weite Strecken dem Abnehmer zugeführt. Spitzenkraftwerke, die nur kurzzeitig in Betrieb sind, werden zweckmäßigerweise in Nähe der Elektroenergieabnehmer errichtet.



dem Ohmschen Widerstand der Leitungsdrähte ab. Daraus folgt, daß man u. a. die Stromstärke möglichst gering halten muß. Das ist bei einer bestimmten Leistung nur möglich, wenn man die im Generator erzeugte Spannung mit Hilfe von Transformatoren erhöht. Die Spannung wird in den großen Fernleitungen aus diesem Grunde auf 220 000 V und mehr heraufgesetzt.

27

**V** Die Wirkungsweise einer elektrischen Energieübertragungsleitung können Sie sich an Hand eines Modells verdeutlichen. Wird an einem Stromversorgungsgerät eine Spannung von 6 V bis 8 V abgegriffen und der Strom über einen 1000-Ohm-Widerstand zur Glühlampe als Energieabnehmer geleitet (Bild 107/1a), so kommt die Glühlampe auf Grund der sehr geringen Stromstärke nicht zum Leuchten. Der Widerstand ersetzt hierbei die sehr langen Leitungen. Transformiert man jedoch die Spannung hinter dem Stromversorgungsgerät hoch, leitet diesen hochgespannten Strom durch den 1000-Ohm-Widerstand und transformiert die Spannung am Energieabnehmer wieder entsprechend herunter, so kann der Spannungsabfall stark herabgesetzt werden (Bild 107/1b). Bei diesem zweiten Versuch leuchtet die Glühlampe hell auf.



An einem Rechenbeispiel kann man den vorteilhaften Einsatz hochgespannter Wechselströme noch besser überblicken als in einem Versuch.

### Beispiel

- Ein 157,5-kW-Wechselstromlieferant gibt eine Klemmenspannung  $U_G$  von 3150 V ab. Über eine Doppelleitung mit einem Gesamtwiderstand  $R_L$  von 45  $\Omega$  ist ein Energieabnehmer mit dem Innenwiderstand  $R_E$  angeschlossen (Bild 107/2). Unter der Voraussetzung, daß zwischen Stromstärke und Spannung keine Phasendifferenz besteht, errechnet sich die Stromstärke  $I$  im Gesamtkreis nach der Gleichung

$$I = \frac{P}{U_G}$$

$$I = \frac{157,5 \text{ kW}}{3150 \text{ V}}$$

$$I = 50 \text{ A}$$

Der Spannungsabfall  $U_L$  in der Leitung ist

$$U_L = I \cdot R_L$$

$$U_L = 50 \text{ A} \cdot 45 \Omega$$

$$U_L = 2250 \text{ V}$$

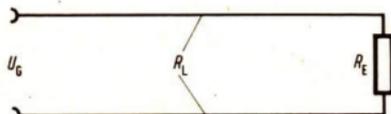


Bild 107/2 Schaltskizze

Die Betriebsspannung des Energieabnehmers ist

$$\begin{aligned}U_E &= U_G - U_L \\U_E &= 3150 \text{ V} - 2250 \text{ V} \\ \underline{\underline{U_E &= 900 \text{ V}}}\end{aligned}$$

Der Energieabnehmer hat den Innenwiderstand

$$\begin{aligned}R_E &= \frac{U_E}{I} \\R_E &= \frac{900 \text{ V}}{50 \text{ A}} \\ \underline{\underline{R_E &= 18 \Omega}}\end{aligned}$$

Der Wirkungsgrad  $\eta$  des Gesamtsystems beträgt

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{I \cdot U_E}{I \cdot U_G} \\ \eta &= \frac{50 \text{ A} \cdot 900 \text{ V}}{157,5 \text{ kW}} \\ \underline{\underline{\eta &= 0,26}}\end{aligned}$$

- In die Doppelleitung ( $R_L = 45 \Omega$ ) werden entsprechend der Abbildung 107/1b zwei ideale Transformatoren mit dem Übersetzungsverhältnis 1 : 10 bzw. 10 : 1 geschaltet. Welche Leistung muß der Energielieferant jetzt aufbringen, wenn derselbe Energieabnehmer verwendet wird? Wie groß ist der Wirkungsgrad des Gesamtsystems?

Gegenwärtig wird daran gearbeitet, Elektroenergie in Form von Wechselstrom zu erzeugen und abzugeben, die Fernübertragung aber mit Gleichstrom durchzuführen, da bei einer Übertragung hochgespannter Gleichströme die Energieverluste geringer sind als bei der Übertragung hochgespannter Wechselströme. Die bedeutendste Gleichstromfernleitung verbindet gegenwärtig das Wasserkraftwerk Wolgograd und den Donbass. Die 350 km lange Hochspannungsleitung ist für 800 kV ausgelegt und überträgt eine Leistung von 750 kW.

Um die Elektroenergieversorgung eines Landes vor Störungen zu schützen, werden die Versorgungsnetze der einzelnen Kraftwerke zu einem sogenannten *Verbundnetz* vereinigt. Fällt ein Kraftwerk oder ein Leitungsabschnitt für die Elektroenergieversorgung aus, dann können die anderen Kraftwerke die Elektroenergieversorgung mit übernehmen, oder der Strom wird über andere Leitungsabschnitte dem Energieabnehmer zugeführt. Neben derart technischen Erwägungen spielen auch ökonomische Belange beim Ausbau des Verbundnetzes eine große Rolle. Durch das Zusammenschalten zu einem einheitlichen Versorgungsnetz werden die einzelnen Kraftwerke wirtschaftlicher ausgenutzt. Im Bedarfsfall — z. B. während der Spitzenbelastungszeiten — können weitentlegene Kraftwerke zur Energiedeckung beitragen. So wurde in der Deutschen Demokratischen Republik ein leistungsfähiges 220-kV-Verbundnetz aufgebaut und zwischen Ragow und Lauchstädt sogar eine 380-kV-Leitung in Betrieb genommen (Bild 109/1).

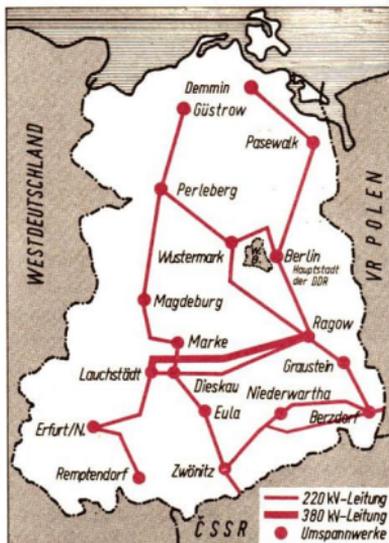


Bild 109/1 Verbundnetz der Deutschen Demokratischen Republik

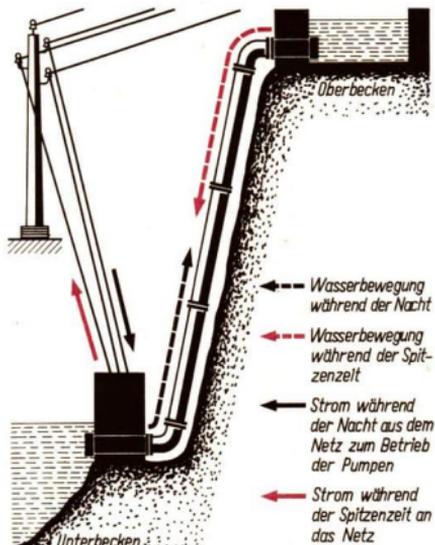


Bild 109/2 Pumpspeicherwerk Hohenwarte an der Saale

Dieses Netz ermöglichte die Aufnahme des internationalen Verbundbetriebes zwischen sozialistischen Ländern wie der ČSSR, der Volksrepublik Polen, der Volksrepublik Ungarn, zwischen der Westukraine und der Belorussischen Sozialistischen Sowjetrepublik. Der Vorteil eines solchen Verbundnetzes wird augenfällig, wenn man bedenkt, daß die Spitzenbelastungszeit zwischen einigen Partnerländern zum Teil um Stunden verschoben ist.

Die fortwährende Anpassung der Energieversorgung an die dauernd schwankende Energienachfrage ist ein technisch und ökonomisch schwieriges Problem. Der Energiebedarf ändert sich innerhalb eines Tages außerordentlich stark und zeigt außerdem zwischen Sommer- und Wintermonaten große Unterschiede (Bild 110/1a und b). Da sich elektrische Energie bisher kaum speichern läßt, muß die Erzeugung im Generator immer so groß sein wie der Bedarf. Daraus ergibt sich, daß der Generator sehr unterschiedlich belastet wird. Nur einige Stunden des Tages läuft er unter Vollast, für einige Zeit wird er vielleicht überlastet, und dann wiederum wird er für längere Zeit nur unter Teillast gefahren. Je größer die Differenz zwischen Vollast und Teillast wird, um so unrentabler arbeitet die Anlage.

Um die Kraftwerke möglichst ökonomisch auszunutzen, läßt man einige Kraftwerke als *Grundkraftwerke* zur Deckung eines mittleren Energiebedarfs unter Vollast laufen und liefert den Restbedarf durch *Spitzenkraftwerke*. Eine besondere Art der Spitzen-

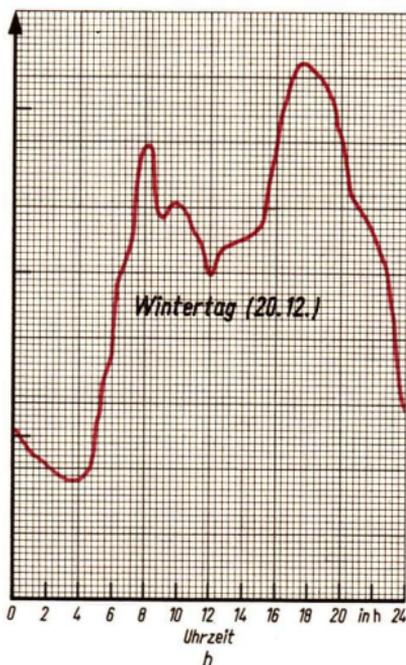
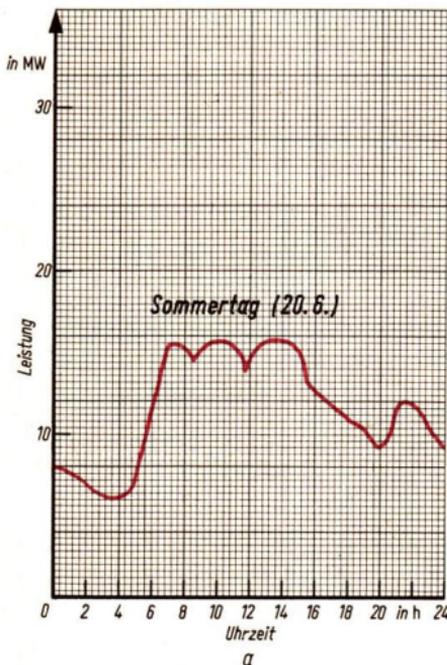
kraftwerke stellen die *Pumpspeicherwerke* dar. In den Pumpspeicherwerken entzieht man dem Netz zur Zeit des geringsten Energiebedarfs — meist nachts — überschüssige Energie, indem man durch elektrisch angetriebene Pumpen Wasser in einen höher gelegenen Wasserspeicher fördert. Während der Spitzenbelastungszeit läßt man das Wasser wieder abfließen, treibt damit Turbogeneratoren an und liefert somit elektrische Energie in das Netz zurück (Bild 109/2).

- *Welches Naturgesetz nutzt man bei Pumpspeicherwerken aus?*

Um das Energieversorgungsnetz während der Spitzenzeit nicht übermäßig zu belasten, muß in jedem Haushalt während der Hauptbelastungszeit die Energieentnahme möglichst eingeschränkt werden. Der verantwortungsbewußte Bürger benutzt darum seine energieintensiven Haushaltsgeräte zu anderen Tageszeiten. In der Tagespresse werden die Hauptbelastungszeiten bekanntgegeben.

### Fragen und Aufgaben

- 1. Lesen Sie in einem Geographielehrbuch nach, wo sich in der DDR die Hauptvorkommen an Braunkohle befinden! Wie hoch schätzt man die Vorkommen an Braunkohle? Wie lange reichen die Vorkommen, wenn jährlich weiterhin rund 250 Mill. t abgebaut werden?
- \*2. Betrachten Sie die nachstehenden Belastungskurven eines Kraftwerks! Bestimmen Sie, um wieviel Prozent der Maximalwert am 20. 12. über dem Maximalwert vom 20. 6. liegt!



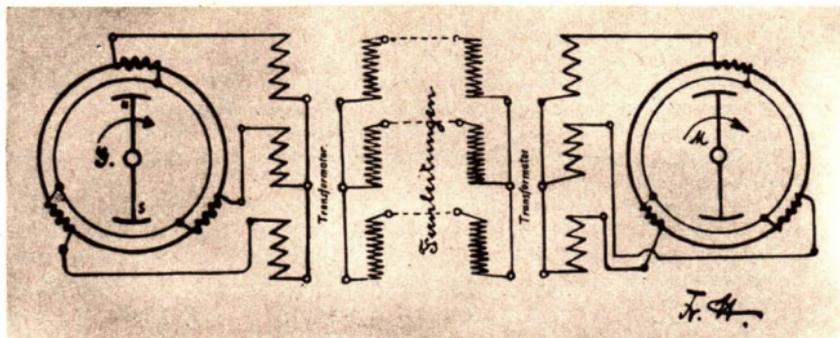


Bild 111/1 Drehstromübertragungssystem nach F. A. HASELWANDER

3. Ermitteln Sie auf experimentellem Wege die Leistung eines Tauchsieders, eines Bügel-eisens und eines Heizapparates!
4. Fertigen Sie einen Schaltplanausschnitt Ihres Schulgebäudes, Ihres Patenbetriebes, einer benachbarten LPG usw. an!
- \*5. In einem Haushalt wird während der Spitzenbelastungszeit durch Abschalten eines elek-trischen Heizgeräts 1 kWh eingespart. Wieviel Bauplatten von 0,5 Mp Gewicht können dadurch von einem Baukran 20 m hoch gehoben werden, wenn der Wirkungsgrad von nutzbarer mechanischer Energie zu aufgewandter elektrischer Energie 25% beträgt? ( $1 \text{ Ws} = 0,102 \text{ kpm}$ ).
6. In Bild 111/1 sehen Sie in einer Originalzeichnung F. A. HASELWANDERS ein Drehstrom-übertragungssystem. Stellen Sie das gleiche Leitungssystem mit Hilfe standardisierter Schaltzeichen dar!

## ZUR WIEDERHOLUNG, ÜBUNG UND ERGÄNZUNG

Im bisherigen Physikunterricht und im Grundlehrgang Elektrotechnik haben Sie bereits wichtige Erscheinungen des Gleichstroms, Wechselstroms und Drehstroms kennengelernt. Diese Stromarten rufen zum Teil recht unterschiedliche Wirkungen hervor. So muß man bei der Inbetriebnahme von Geräten und Einrichtungen streng darauf achten, ob sie für Gleichstrom- oder Wechselstromanschluß vorgesehen sind. Es gibt Geräte, die ausschließlich mit Gleichstrom betrieben werden; andere Geräte dagegen dürfen nur mit Wechselstrom gespeist werden; manche Geräte wiederum sind für Gleichstrom- und Wechselstromanschluß vorgesehen. Darum ist es wichtig, noch einmal den Gleichstrom mit dem Wechselstrom und dem Drehstrom zu vergleichen.

- *Wodurch unterscheidet sich der Gleichstrom vom Wechselstrom und welcher Zusammenhang besteht zwischen Wechselstrom und Drehstrom? Stellen Sie die entsprechenden Strom-Zeit-Kurven grafisch dar!*

*Welche Wirkungen des elektrischen Stromes kennen Sie? Macht es sich bei den verschiedenen Wirkungen bemerkbar, wenn Gleichstrom bzw. Wechselstrom verwendet wird?*

*Beschreiben Sie das Verhalten einer Magnetnadel im Magnetfeld einer Spule, die einmal von einem Gleichstrom und einmal von einem Wechselstrom durchflossen wird! Wie verhält sich die Nadel im Magnetfeld bei Stern- und Dreieckschaltung?*

*Wie bestimmt man die elektrische Leistung in einem Gleichstromkreis und in einem Wechselstromkreis? Suchen Sie einen Weg, wie man die elektrische Gesamtleistung in einem Dreiphasenwechselstromsystem bei symmetrischer Belastung ermitteln kann! Vergleichen Sie dabei die Leistungsaufnahme dreier Schaltelemente in Sternschaltung mit der Leistungsaufnahme in Dreieckschaltung!*

Energieumwandlungsprozesse und die Bestimmung von Wirkungsgraden spielen in der Physik und Technik oftmals eine wichtige Rolle. In der folgenden Übersicht sind einige Beispiele für die Energieumwandlung in elektro-mechanischen Hebezeugen, elektro-thermischen Geräten und elektrischen Maschinen angegeben.

Beispiel	Energieaufnahme	Energieabgabe	Wirkungsgrad
Kran	$W_1 = I \cdot U \cdot t$ (Gleichstrommotor)	$W_2 = F \cdot s$ (Flaschenzug)	$\eta = \frac{F \cdot s}{I \cdot U \cdot t}$ (1 Ws = 0,102 kpm)
elektrischer Kochtopf	$W_1 = I \cdot U \cdot t$ (Heizwendel)	$W_2 = c \cdot m \cdot \Delta T$ (Flüssigkeitsmenge)	$\eta = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{I \cdot U \cdot t}$ (1 Ws = 0,239 cal)
Umformer	$W_1 = I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi \cdot t$ (Wechselstrommotor)	$W_2 = I_2 \cdot U_2 \cdot t$ (Gleichstromgenerator)	$\eta = \frac{I_2 \cdot U_2 \cdot t}{I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi \cdot t}$
Spannungsstabilisator für Fernsehgerät (Transformator)	$W_1 = I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot t$ (Primärseite)	$W_2 = I_2 \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot t$ (Sekundärseite)	$\eta = \frac{I_2 \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot t}{I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot t}$

- *Bauen Sie die entsprechenden Versuchseinrichtungen (aus Experimentiergeräten) auf! Führen Sie die Messungen im physikalischen Praktikum selbst durch und bestimmen Sie die Wirkungsgrade Ihrer Versuchsaufbauten! Vergleichen Sie die Wirkungsgrade der einzelnen Versuchsanordnungen miteinander!*



## Mechanik

Am 12. April 1961 ging ein uralter Traum der Menschheit in Erfüllung. Ein Mensch verließ die Erde und stieß in den Weltenraum vor. Der sowjetische Major GAGARIN umrundete in seinem Raumschiff in etwa 200 km Abstand die Erde. Seiner kühnen Tat folgten immer längere und schwierigere Flüge. Bald wird der Mensch den Mond erreicht haben. Diese Erfolge waren möglich, weil die Menschen gelernt haben, die Natur immer besser zu erforschen, ihre Gesetze zu erkunden und diese zu ihrem Nutzen anzuwenden. Sie erkannten, daß sich alle Körper in der Natur ständig in Bewegung befinden. Auch der Stuhl, auf dem wir sitzen, bewegt sich: Alle Gegenstände auf der Erdoberfläche bewegen sich mit ihr innerhalb eines Tages einmal um die Erdachse. Die Erde selbst bewegt sich um die Sonne. Das gesamte Sonnensystem bewegt sich; auch die Bewegung der Sterne kann nachgewiesen werden. Die Bewegung ist etwas, was allen Körpern eigen ist. Friedrich Engels nennt die Bewegung die Daseinsweise der Materie.

Obwohl sich alle Körper ständig bewegen, gibt es bestimmte Verhältnisse, bei denen wir von einem besonderen Bewegungszustand, dem Zustand der Ruhe, sprechen. Ein auf einer Straße liegender Stein befindet sich zum Beispiel in Ruhe gegenüber dieser Straße und damit natürlich auch gegenüber der Erde. Will man diesen Bewegungszustand ändern, kann man zum Beispiel den Stein mit dem Fuß kräftig anstoßen. Die Ursache für Änderungen des Bewegungszustandes eines Körpers braucht nicht die menschliche Muskelkraft zu sein. So ändert sich zum Beispiel bei einem los gewordenen Dachziegel unter bestimmten Umständen sein Bewegungszustand, er fällt herab. Wie man festgestellt hat, besteht die Ursache für dieses Verhalten des Dachziegels in einer Wechselbeziehung zwischen diesem und der Erde. Die Ursache der Änderung eines Bewegungszustandes wird in der Physik durch den Begriff **Kraft** bezeichnet. Wenn in diesem Buch von Bewegung gesprochen wird, so soll darunter eine besondere Form der Bewegung, nämlich die sogenannte *mechanische Bewegung* (oder auch mechanische Ortsveränderung) verstanden werden.

**Die Lehre von den Zusammenhängen zwischen den Kräften und den von ihnen verursachten Änderungen des Bewegungszustandes von Körpern heißt Dynamik.**

Eine Kraft kann nicht nur die Änderung eines Bewegungszustandes bewirken. So wird zum Beispiel beim Ausziehen eines Expanders die Form der Federn verändert. Der Muskelkraft des Menschen wirkt die Kraft der Federn entgegen. Beim Ausziehen vergrößert sich die Kraft der Federn so lange, bis sie so groß ist wie die Muskelkraft. In diesem Falle spricht man vom Gleichgewicht der Kräfte.

**Die Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte heißt Statik.**

Die Dynamik und die Statik sind Teilgebiete der Mechanik.

## Die Kraft



Schuß aufs Tor! Durch das Einwirken einer Kraft (Muskelkraft) auf einen Körper (Fußball) wird dessen *Bewegungszustand* verändert. Auseinanderziehen eines Expanders. Durch das Einwirken einer Kraft (Muskelkraft) wird die *Form* eines Körpers (Expander) verändert. Kräfte können demnach verschiedene Wirkungen hervorrufen.



### 1. Kraft und Kraftwirkung

Wenn wir zum Beispiel einen Handwagen ziehen, unsere Schultasche hochheben, mit einem Beil Holz hacken oder mit einer Zange Draht biegen, so muß man Kraft aufwenden. Es muß immer eine Kraft (zum Beispiel die Muskelkraft des Menschen) vorhanden sein, die auf einen Körper (den Handwagen, die Schultasche, das Holzstück, den Draht) einwirkt.

Unsere Muskelkraft zum Beispiel ist die Ursache für diese verschiedenartigen Wirkungen: Fortbewegen, Hochheben, Spalten, Umformen. Solche Wirkungen können auch von anderen Kräften verursacht werden.

#### Beispiele

- Seit langer Zeit setzt der Mensch die Muskelkraft der Tiere ein. Die Turbine wird durch Wasser oder durch Dampf angetrieben. Die Windmühle dreht sich durch die Einwirkung der bewegten Luft. Ein trockener, geriebener und dadurch elektrisch geladener Plaststab zieht Papierkügelchen an. Beim Volleyballspiel ändert der Ball durch das Schlagen mit den Händen ständig seine Bewegungsrichtung.



Bild 115/2 Dynamische Kraftwirkung eines Magneten. Nähert man einen Magneten sehr langsam einem stählernen Körper, zum Beispiel einem Wagen, so stellt man fest, daß sich der Wagen auf den Magneten zu bewegt

Das Einwirken einer Kraft auf einen Körper kann den *Bewegungszustand* eines Körpers verändern, das heißt durch eine Kraft

- kann ein Körper in seiner Bewegung beschleunigt<sup>1</sup>,
- kann ein Körper in seiner Bewegung verzögert,
- kann die Richtung der Bewegung eines Körpers verändert werden.

Alle diese Wirkungen faßt man als **Änderung des Bewegungszustandes** eines Körpers auf. Man spricht in diesem Falle von einer **dynamischen Kraftwirkung**.

Eine Beschleunigung eines Körpers liegt auch dann vor, wenn er aus dem Zustand der relativen Ruhe (das heißt Ruhe in bezug auf einen anderen Körper) gegenüber einem anderen Körper in Bewegung gerät, zum Beispiel beim Anfahren eines Fahrzeugs.

- *Warum befand sich das Fahrzeug vor dem Anfahren nicht im Zustand der absoluten Ruhe?*

Bei der Verzögerung gibt es auch Fälle, in denen ein Körper gegenüber einem anderen in einen (relativen) Ruhezustand gerät.

- *Geben Sie Beispiele dafür an! Warum sind auch diese Körper nicht absolut in Ruhe?*

In anderen Fällen führt das Einwirken einer Kraft auf einen Körper nicht zu einer Änderung seines Bewegungszustandes.

#### Beispiele

- Durch die Anziehungskraft eines Magneten ändert eine einseitig eingespannte Blattfeder ihre Form (Bild 116/1). Durch eine Strohpresse wird das Stroh zusammengedrückt. Beim Spannen eines Luftgewehrs wird eine Feder zusammengedrückt. Beim Walzen werden aus glühenden Metallblöcken zum Beispiel Träger und Schienen hergestellt.



Bild 116/1 Statische Kraftwirkung eines Magneten

Das Einwirken einer Kraft auf einen Körper kann eine **Änderung der Form** des Körpers hervorrufen. Man spricht in diesem Falle von einer **statischen Kraftwirkung**.

#### Mechanische Kraftwirkungen

**Dynamische Kraftwirkung:** Durch die Einwirkung der Kraft wird der Bewegungszustand eines Körpers verändert.

**Statische Kraftwirkung:** Durch die Einwirkung der Kraft wird die Form eines Körpers verändert.

<sup>1</sup>Näheres s. S. 146, Abschnitt 3

## 2. Das Messen von Kräften

Kräfte sind nichts Geheimnisvolles, sondern verursachen immer ganz bestimmte Wirkungen. Auf Grund dieser Wirkungen können Kräfte verglichen werden: Man kann Kräfte messen. Dazu kann man eine der beiden mechanischen Kraftwirkungen heranziehen. Am einfachsten geht man von der statischen Kraftwirkung aus. Die Wirkungsweise eines Kraftmessers, der auf dieser Kraftwirkung beruht, zeigt das Bild 117/1.

- In welchem Verhältnis stehen im Bild 117/1 die jeweils aufgewendeten Kräfte?

Eine Einheit der Kraft ist das Kilopond (kp). Vom Kilopond gebildete dezimale Vielfache und Teile sind das Megapond (Mp), das Pond (p) und das Millipond (mp). Über die Krafteinheit Newton siehe Seite 171!

## 3. Die Kraft als vektorielle Größe

### Beispiele

- Rollt man eine Kugel, so bewegt sie sich in der Richtung, die ihr durch die Muskelkraft gegeben wurde. Die Bewegungsrichtung wird durch die Richtung der angreifenden Kraft bestimmt.

Setzt man sich auf einen langen Balken, der an seinen Enden unterstützt ist, so biegt er sich verschieden durch, je nachdem, wohin man sich setzt. Die einwirkende Kraft ist unser Gewicht, es ist zum Erdinnern gerichtet.

Aus diesen Beispielen ist zu erkennen: Zum Kennzeichnen einer Kraft sind ihr *Betrag*, ihre *Richtung* und ihr *Angriffspunkt* erforderlich. Außerdem gibt man die Linie an, in der die Kraft wirkt, man bezeichnet sie als *Wirkungslinie* (Bild 117/2).

Bild 117/2 Die zeichnerische Darstellung einer Kraft erfolgt durch einen Pfeil. Dabei wird der Betrag der Kraft durch die Länge des Pfeils in Verbindung mit einem Maßstab ausgedrückt, die Richtung der Kraft wird durch die Spitze des Pfeils angegeben

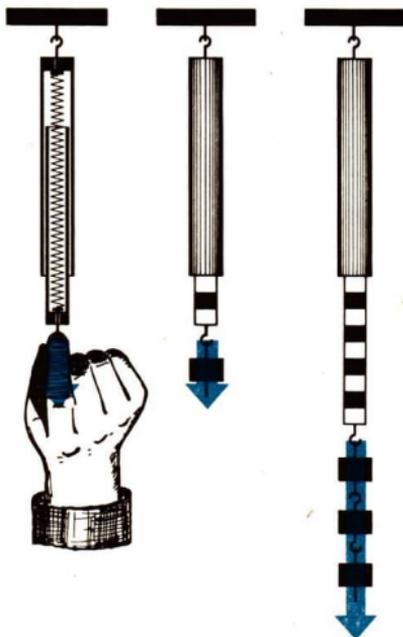
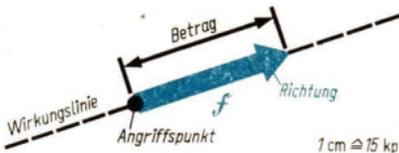


Bild 117/1 Kraftmessung durch Verlangung einer Schraubenfeder. Da die Verlangung einer Schraubenfeder der wirkenden Kraft in einem bestimmten Bereich proportional ist, werden oft Schraubenfedern zur Kraftmessung benutzt



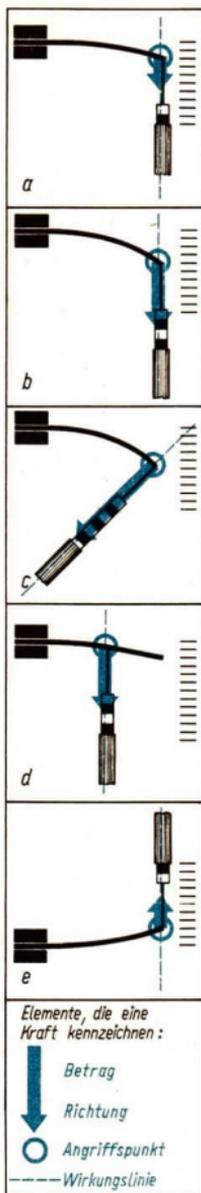


Bild 118/1 (links) Vergleichen Sie Beträge, Richtungen, Angriffspunkte und Wirkungslinien der Kräfte in den Bildern a bis e!

Physikalische Größen, die durch Betrag, Richtung und Wirkungslinie gekennzeichnet sind, heißen *vektorielle Größen*. Sie werden mit deutschen Buchstaben bezeichnet (Tabelle 2). Will man nur den *Betrag*, zum Beispiel der Kraft, angeben, so benutzt man lateinische Buchstaben, zum Beispiel  $F$ .

### Die Kraft ist eine vektorielle Größe.

Eine weitere vektorielle Größe ist die Geschwindigkeit (s. S. 142). Genügt zur Festlegung einer physikalischen Größe die Angabe ihres Betrages, so wird sie als *skalare Größe* bezeichnet. Die Zeit, die Temperatur, die Arbeit, die elektrische Leistung u. a. sind skalare Größen.

Das Bild 118/2 gibt einige wichtige Fälle an, die bei der Darstellung zweier Kräfte  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  auftreten können.

Bild 118/2 (rechts) Betrachten Sie die Bilder a bis f und vergleichen Sie jeweils die Richtungen, Beträge, Angriffspunkte und Wirkungslinien der Kräfte und formulieren Sie das Ergebnis! Benutzen Sie dabei je nach Sachverhalt u. a. die Begriffe: gleiche Richtung, entgegengesetzte Richtung, unterschiedliche Richtung! Zum Beispiel Bild b:  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  haben entgegengesetzte Richtung, unterschiedliche Beträge, verschiedene Angriffspunkte, gleiche Wirkungslinie

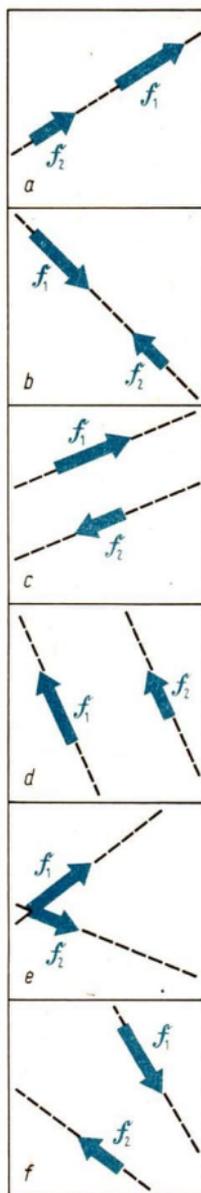


Tabelle 2: Buchstaben zur Bezeichnung von Vektoren und ihren Beträgen

Lateinischer Buchstabe (für Beträge)	A a F G g K L R r S s T v W Z
Deutscher Druckbuchstabe (für Vektoren)	A a F G g K L R r S s T v W Z
Deutscher Schreibbuchstabe (für Vektoren)	<i>A a F G g K L R r S s T v W Z</i>

### Fragen und Aufgaben

- 1. Was versteht man unter einer Kraft? Welches sind ihre mechanischen Wirkungen?
- 2. Wie mißt man den Betrag einer Kraft?
- 3. Beschreiben Sie die Bauart und die Wirkungsweise eines Kraftmessers! Fertigen Sie eine Zeichnung an!

### Versuche

- V** 1. Bauen Sie aus einer Schraubenfeder, einer Spiralfeder, einer Blattfeder oder einem Gummischlauch einen Kraftmesser! Bringen Sie an einer Skale Markierungen für bestimmte Kräfte (z. B. für 10 p, 20 p, 30 p oder für 1 kp, 2 kp, usw.) an!
- \*2. Der am unteren Ende einer Schraubenfeder befindliche Haken ist mit einem Zeiger versehen (Bild 119/1). Beim Angreifen einer Kraft von 20 p zeigt der Zeiger an einer Skale 17,5 cm an, bei einer Belastung von 85 p werden 24,0 cm angezeigt. An welchen Stellen der Skale müssen Sie die Markierung für a) 50 p, b) 100 p, c) 150 p anbringen?

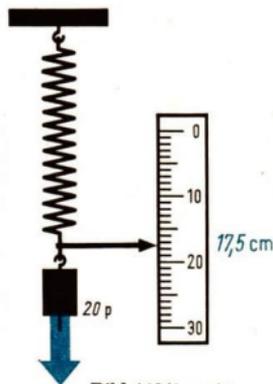


Bild 119/1 zu \*2.

### ZUSAMMENFASSUNG

**Kräfte können den Bewegungszustand eines Körpers verändern, Kräfte können die Form eines Körpers verändern.**

Nennen Sie Beispiele für beide mechanische Kraftwirkungen!

**Die Kraft ist eine vektorielle Größe.**

Wie wird die Kraft zeichnerisch dargestellt?

**Das Kilopond ist eine Einheit der Kraft.**

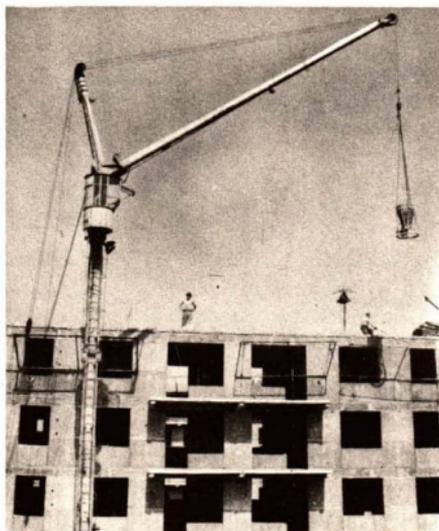
Erklären Sie, warum das Gewicht eine Kraft ist!

## Das Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften



Die Last und das Gegengewicht sind Kräfte, die zusammen auf die Stützfläche des Turmdrehkranes wirken. Die Last drückt auf den Ausleger des Kranes und zieht am Seil.

Will man in diesem Falle die Wirkung des Gegewichts der Last auf den Ausleger und auf das Seil ermitteln, muß man besondere Verfahren anwenden, die im folgenden erläutert werden.



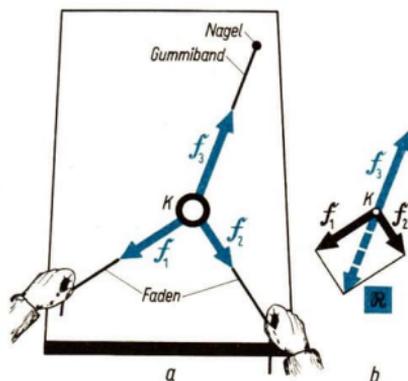
### 1. Kräfte im Gleichgewicht — die resultierende Kraft

In fast allen Fällen unterliegt ein Körper mehreren Krafteinwirkungen.

28

**V** Durch Ziehen an den beiden Fäden können Sie an dem Körper  $K$  (Metallring) zwei Kräfte  $\vec{f}_1$  und  $\vec{f}_2$  angreifen lassen. Aus der Verlängerung und der Lage des Gummibandes lassen sich der Betrag und die Richtung der Kraft  $\vec{f}_3$  abschätzen.

- Verändern Sie den Betrag und die Richtung der beiden Kräfte  $\vec{f}_1$  und  $\vec{f}_2$  so, daß der Körper  $K$  in Ruhe bleibt!
- Ersetzen Sie die Kräfte  $\vec{f}_1$  und  $\vec{f}_2$  durch nur eine Kraft  $\mathfrak{R}$ , ohne daß sich  $\vec{f}_3$  ändert! Welche Wirkungslinie und welche Richtung hat diese Kraft  $\mathfrak{R}$ ?



An einem Körper können zwei oder auch mehr Kräfte so angreifen, daß dieser in Ruhe<sup>1</sup> bleibt. Die Wirkungen der angreifenden Kräfte heben sich dann auf.

<sup>1</sup> Der Körper ist dabei in Ruhe gegenüber der Erde. Wenn im folgenden der Begriff Ruhe gebraucht ist, so ist — wenn nichts anderes angeführt ist — Ruhe in Bezug auf die Erde gemeint

Man sagt, die am Körper angreifenden Kräfte befinden sich im **Gleichgewicht**. Können zwei Kräfte  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  in ihrer Wirkung durch eine Kraft ersetzt werden, so wird sie die **resultierende Kraft** genannt. Eine der Grundaufgaben der Statik besteht darin, für mehrere gegebene Kräfte die resultierende Kraft zu bestimmen. Das Verfahren, durch welches mehrere Kräfte durch eine einzige Kraft — die resultierende Kraft — ersetzt werden können, bezeichnet man als *Zusammensetzen von Kräften*.

Die Kraft, die mehrere Kräfte ersetzt, heißt **resultierende Kraft**.

## 2. Das Zusammensetzen von Kräften mit gleicher Wirkungslinie

Das Zusammensetzen von Kräften ist besonders einfach, wenn sie die gleiche Wirkungslinie haben. Es können dabei zwei Möglichkeiten auftreten.

### 2.1. Die Kräfte haben die gleiche Richtung

29

Ein an die Federwaage gehängtes Wägestück wirkt mit einer Kraft  $\vec{F}_1$  senkrecht nach unten. Hängt man ein weiteres Wägestück an die Federwaage, so wirkt dieses mit der Kraft  $\vec{F}_2$  in der gleichen Richtung wie die Kraft  $\vec{F}_1$ . Die resultierende Kraft  $\vec{F}$  ist die Summe der beiden Einzelkräfte  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$ .

Man kann den *Betrag* der resultierenden Kraft rechnerisch ermitteln, indem man die Beträge der Teilkräfte addiert.

#### Beispiel

- Eine Lokomotive vom Typ E 42 hat eine Zugkraft, deren Betrag 14200 kp ist. Vor einem Güterzug befinden sich zwei Lokomotiven dieses Typs. Wie groß ist der Betrag der resultierenden Kraft?

Gegeben: Lösung:

$$F_1 = 14200 \text{ kp} \quad F = F_1 + F_2$$

$$F_2 = 14200 \text{ kp} \quad F = 14200 \text{ kp} + 14200 \text{ kp}$$

Gesucht:  $F = 28400 \text{ kp}$

$$F \text{ (in kp)}$$

Der Betrag  $F$  der resultierenden Kraft ist 28400 kp.

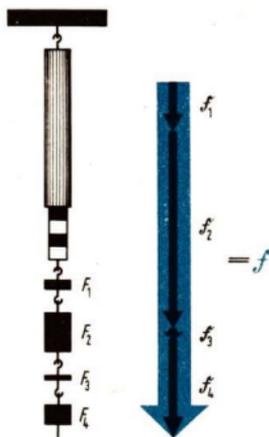


Bild 121/1 Zeichnerische Ermittlung der resultierenden Kraft  $\vec{F}$ . Man trägt an das Ende des Kraftvektors  $\vec{F}_1$  den Kraftvektor  $\vec{F}_2$  an, an dessen Ende den Kraftvektor  $\vec{F}_3$  usw. Die resultierende Kraft  $\vec{F}$  wird durch den farbig eingezeichneten Vektor, der vom Angriffspunkt der ersten Kraft bis zum Endpunkt der letzten Kraft geht, dargestellt

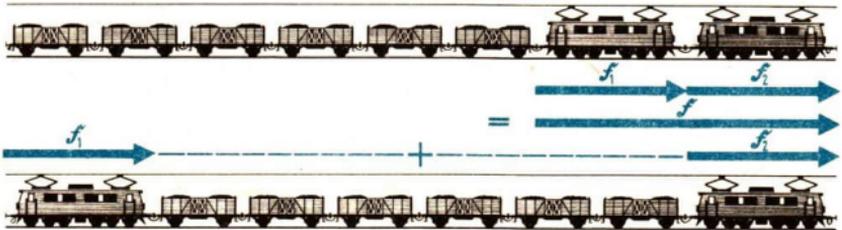
Das Bild 121/1 macht deutlich, wie man *zeichnerisch* Kräfte mit gleicher Wirkungslinie und gleicher Richtung zu der resultierenden Kraft zusammensetzen kann.



Kräfte können auf ihrer Wirkungslinie verschoben werden, ohne daß sich die Kraftwirkung ändert.

Bild 122/1 Werden die einzelnen Wägestücke durch längere Fäden miteinander verbunden oder auch untereinander vertauscht, so bleibt die Wirkung der Kräfte an der Federwaage unverändert. Die Teilkräfte können auf ihrer Wirkungslinie verschoben und auch in ihrer Reihenfolge verändert werden

Bild 122/2 Bei sehr langen Güterzügen reicht oftmals die Zugkraft einer Lokomotive nicht aus. Wie ist eine zweite Lokomotive einzusetzen? Soll sie den Zug schieben oder ihn gemeinsam mit der ersten Lokomotive ziehen?

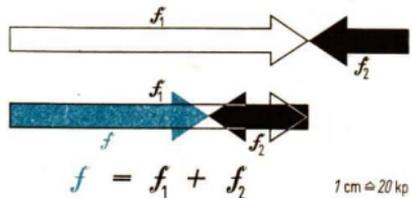


## 2.2. Die Kräfte haben entgegengesetzte Richtung

Auch beim Zusammensetzen von zwei Kräften, die eine gemeinsame Wirkungslinie, aber entgegengesetzte Richtung haben, kann die resultierende Kraft zeichnerisch (Bild 122/3) und rechnerisch ermittelt werden.

Sind die Beträge von Kräften, die entgegengesetzt wirken, bekannt, so kann man den Betrag der resultierenden Kraft auch rechnerisch ermitteln. Hat zum Beispiel

Bild 122/3 Zusammensetzen von Kräften mit entgegengesetzter Richtung. Durch Verschieben von  $f_1$  und  $f_2$  erhält man die resultierende Kraft  $f$  und somit auch ihre Richtung. Die beiden Kräfte wirken gegeneinander und heben dadurch einander zum Teil in ihrer Wirkung auf



die Kraft  $\mathfrak{F}_1$  den Betrag  $F_1$  von 120 kp, die Kraft  $\mathfrak{F}_2$  den Betrag  $F_2$  von 40 kp, so gilt für den Betrag  $F$  der resultierenden Kraft  $\mathfrak{F}$ :

$$F_2 - F_1 = F$$

$$120 \text{ kp} - 40 \text{ kp} = 80 \text{ kp}$$

Man erhält den Betrag  $F$  der resultierenden Kraft  $\mathfrak{F}$  aus der Differenz der Beträge  $F_1$  und  $F_2$  der Teilkräfte  $\mathfrak{F}_1$  und  $\mathfrak{F}_2$ .

### Beispiel

- Eine Rakete entfernt sich von der Erdoberfläche, wenn die Wirkung der senkrecht nach oben gerichteten Schubkraft  $\mathfrak{F}$  größer als das Gewicht  $\mathcal{G}$  der Rakete ist, das senkrecht nach unten gerichtet ist (Bild 123/1). Wie groß ist der Betrag der resultierenden Kraft?

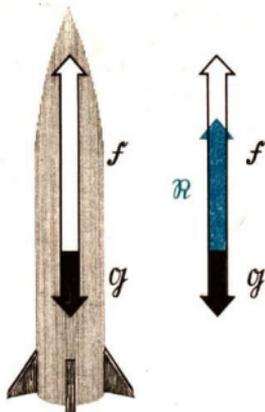


Bild 123/1 Die resultierende Kraft  $R$  bewirkt den Start der Rakete

Gegeben:

Betrag der Schubkraft der Rakete

$$F = 100 \text{ Mp}$$

Betrag des Gewichts der Rakete

$$G = 20 \text{ Mp}$$

Gesucht:

Betrag  $R$  der resultierenden Kraft (in Mp)

Lösung:

$$R = F - G$$

$$R = 100 \text{ Mp} - 20 \text{ Mp}$$

$$R = 80 \text{ Mp}$$

Die resultierende Kraft hat den Betrag von 80 Mp.

- Was geschieht, wenn die Beträge der Schubkraft und des Gewichts gleich sind? Wie groß ist in diesem Falle der Betrag der resultierenden Kraft?

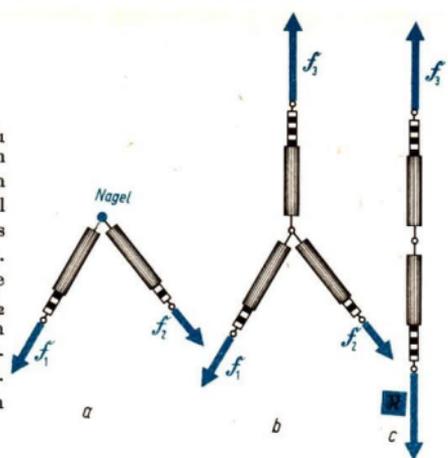
Das Zusammensetzen von Kräften mit gemeinsamer Wirkungslinie ist rechnerisch durch Addition (bei gleicher Richtung) bzw. Subtraktion (bei entgegengesetzter Richtung) der Beträge, zeichnerisch durch Aneinandersetzen der Kraftvektoren möglich.

### 3. Das Zusammensetzen von nichtparallelen Kräften

Ein Zusammensetzen von Kräften, deren Wirkungslinien nicht parallel sind (Bild 128/5), ist rechnerisch meist nur mit besonderen Hilfsmitteln möglich.

Eine experimentelle Lösung solcher Aufgaben, aus der sich ein zeichnerisches Verfahren ableitet, ist leichter durchführbar. Zunächst soll die Lösung durch ein Experiment gefunden werden.

**V** An einem Nagel greifen zwei Kräfte  $\mathfrak{F}_1$  und  $\mathfrak{F}_2$  an (Bild 124/1 a). Durch Probieren mit einer dritten Federwaage kann man eine Kraft  $\mathfrak{F}_3$  finden, die so auf den Nagel einwirkt, daß auch nach dem Lockern des Nagels Gleichgewicht herrscht (Bild 124/1 b). Somit hält die experimentell gefundene Kraft  $\mathfrak{F}_3$  den beiden Kräften  $\mathfrak{F}_1$  und  $\mathfrak{F}_2$  das Gleichgewicht. Die Kraft  $\mathfrak{F}_3$  ist auch mit einer Kraft  $\mathfrak{R}$ , die die gleiche Wirkungslinie und den gleichen Betrag, aber entgegengesetzte Richtung wie  $\mathfrak{F}_3$  hat, im Gleichgewicht (Bild 124/1 c).



Daraus folgt, daß die Kräfte  $\mathfrak{F}_1$  und  $\mathfrak{F}_2$  durch die Kraft  $\mathfrak{R}$  ersetzt werden können. Die Kraft  $\mathfrak{R}$  ist die resultierende Kraft der beiden Einzelkräfte  $\mathfrak{F}_1$  und  $\mathfrak{F}_2$ . Auf zeichnerischem Wege kommt man folgendermaßen zu einer Lösung der gleichen Aufgabe (Bild 124/2).

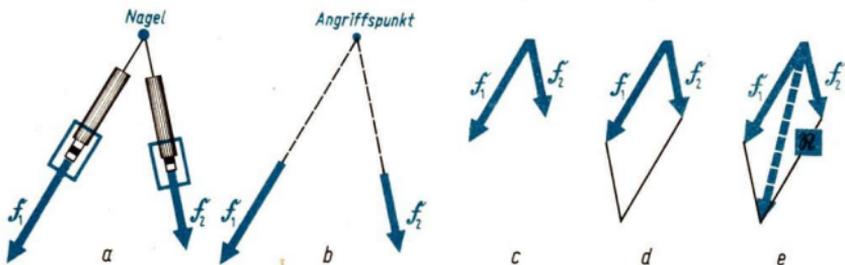
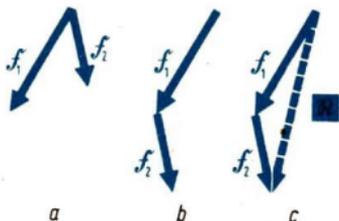


Bild 124/2 Entwicklung des Kräfteparallelogramms. Man verschiebt die beiden Kraftvektoren entlang ihrer Wirkungslinie, bis ihre Angriffspunkte zusammenfallen (Bild a bis c). Dann zieht man parallel zu den Kraftvektoren  $\mathfrak{F}_1$  und  $\mathfrak{F}_2$  zwei Hilfslinien so, daß sie zusammen mit den Kraftvektoren ein Parallelogramm ergeben (Bild d). Die Diagonale des so erhaltenen Kräfteparallelogramms ergibt die Richtung und den Betrag (Maßstab beachten!) der resultierenden Kraft  $\mathfrak{R}$  (Bild e)

In der Technik ist das Ermitteln der resultierenden Kraft mit Hilfe eines weiteren Verfahrens, mit dem *Kräftedreieck* üblich (Bild 125/1).

Das Kräfteparallelogramm oder das Kräftedreieck sind auch für das Zusammensetzen von mehr als zwei Kräften geeignet.

Bild 125/1 Konstruktion eines Kräfte dreiecks. Vom Angriffspunkt einer Kraft ausgehend zeichnet man zuerst den einen Kraftvektor (zum Beispiel  $\vec{f}_1$ ) ein und an dessen Spitze setzt man den zweiten Kraftvektor ( $\vec{f}_2$ ) an. Die Verbindung zwischen dem Angriffspunkt und der Spitze des zweiten Kraftvektors stellt die resultierende Kraft  $\vec{R}$  dar.



Mit Hilfe eines Kräfteparallelogramms faßt man jeweils zwei Kräfte zu einer resultierenden Kraft zusammen. Dies wiederholt man so lange, bis nur noch zwei Resultierende zusammengefaßt werden müssen (Bild 125/2a).

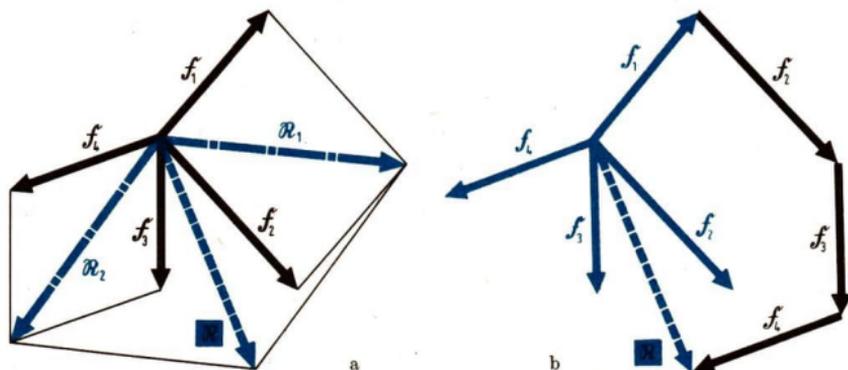
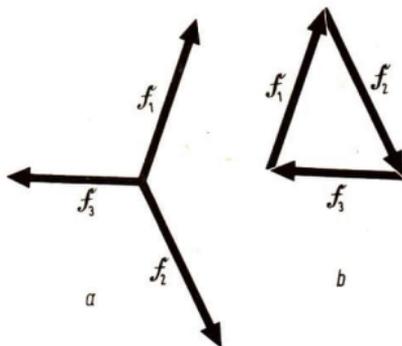


Bild 125/2 Zusammensetzen von mehreren Kräften  
a) mittels Kräfteparallelogrammen, b) mittels eines Kräftepolygons

Setzt man alle Kraftvektoren in gleicher Weise wie beim Kräfte dreieck aneinander, so ergibt sich die Konstruktion eines sogenannten Kräftepolygons (Bild 125/2b).

Bild 125/3 Ermittelt man mit Hilfe des Kräftepolygons die resultierende Kraft von drei gespannten Federn, die an einem Ende verbunden sind, so ergibt es sich, daß im Gleichgewichtsfall der Betrag der resultierenden Kraft Null ist. Das bedeutet, daß die Wirkungen aller drei Kräfte einander aufheben. Der Polygonzug ist geschlossen.

Auch bei mehr als drei Kräften ist für den Gleichgewichtsfall der Betrag der resultierenden Kraft Null. Der Polygonzug ist ebenfalls geschlossen



Bei einem Körper, der sich im Gleichgewicht befindet, ist der Betrag der resultierenden Kraft aller an ihm angreifenden Kräfte gleich Null.

### Beispiel

- Am Seil eines Aufzugs hängt ein Eimer mit einem Gewicht von 8 kp. Er wird durch eine waagrecht angreifende Kraft mit einem Betrag von 6 kp zur Seite gezogen (Bild 126/1). Wie groß ist der Betrag der Zugkraft, die auf die Befestigung des Seils wirkt? Die zeichnerische Lösung ergibt für die Zugkraft einen Betrag, der nur angenähert (je nach Genauigkeit der Zeichnung) richtig ist. Will man einen sicheren Wert für den Betrag der Zugkraft ermitteln, so kann man, wenn das Kräfte-dreieck rechtwinklig ist, folgendes Verfahren anwenden: Da die Längen der Seiten des Dreiecks den Beträgen der Kräfte entsprechen, kann man an Stelle der Längen der Dreiecksseiten die entsprechenden Beträge der Kräfte einsetzen.

<i>Gegeben:</i>	<i>Lösung:</i>
$G = 8 \text{ kp}$	Das Kräfte-dreieck ist rechtwinklig.
$F = 6 \text{ kp}$	
<i>Gesucht:</i>	$Z^2 = G^2 + F^2$
$Z \text{ (in kp)}$	$Z^2 = 8^2 \text{ kp}^2 + 6^2 \text{ kp}^2$
	$Z^2 = 64 \text{ kp}^2 + 36 \text{ kp}^2$
	$Z^2 = 100 \text{ kp}^2$
	<u><u><math>Z = 10 \text{ kp}</math></u></u>

Der Betrag der Zugkraft ist 10 kp.

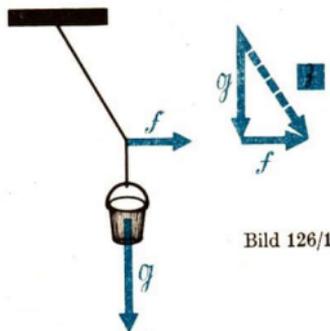


Bild 126/1

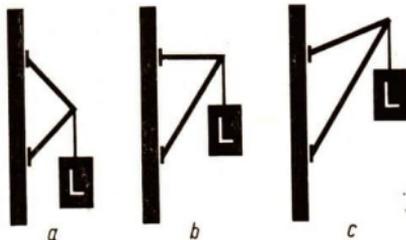
## 4. Das Zerlegen einer Kraft in zwei Komponenten

Manche Probleme der Statik lassen sich dadurch lösen, daß man eine einwirkende Kraft in zwei Teilkräfte bestimmter Richtung zerlegt. Das heißt, man sucht zwei Kräfte von vorgegebener Richtung, die die einwirkende Kraft ersetzen können. Die beiden Teilkräfte werden *Kraftkomponenten*, kurz *Komponenten*, genannt. Das Lösungsverfahren geht den umgekehrten Weg wie beim Zusammensetzen von Kräften.

### 1. Beispiel

- Das Bild 126/2 stellt stark vereinfacht verschiedene Formen eines Wandkrans dar.
- Welcher Teil des Auslegers wird auf Zug, welcher auf Druck beansprucht? Überlegen Sie, welchen Teil man durch ein Seil ersetzen könnte!

Bild 126/2 Ausleger eines Wandkrans



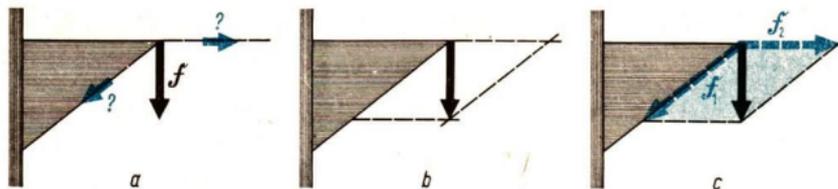


Bild 127/1

Für den Konstrukteur ist es von großer Bedeutung zu wissen, welche Kräfte  $\tilde{F}_1$  und  $\tilde{F}_2$  auf die einzelnen Teile des Auslegers wirken, wenn  $\tilde{F}$  die Kraft ist, die auf den Ausleger maximal wirken soll. Die Konstruktion des dazugehörigen Parallelogramms der Kräfte geht aus dem Bild 127/1 hervor.

## 2. Beispiel

- Das Gewicht eines Lastkraftwagens, der sich auf einer Straße mit großer Steigung befindet, kann zum Beispiel in folgende Kraftkomponenten zerlegt werden: 1. in die Komponente, die senkrecht zur Straßenoberfläche wirkt (*Normalkraft*) und 2. in die Komponente, die parallel zur Straße wirkt (*Hangabtriebskraft*) (Bild 127/2). Wie groß muß die Motorkraft des LKW sein?

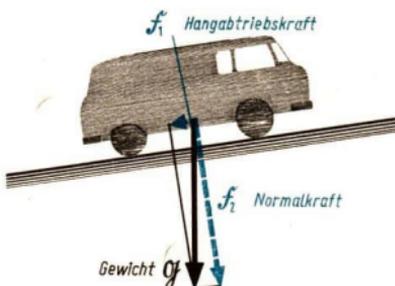


Bild 127/2 Lastkraftwagen auf einer Straße großer Steigung

## Fragen und Aufgaben

- 1. Ein Traktor ist mit einem Grubber, einer Schleppe und einer schweren Egge gekoppelt. Berechnen Sie die Zugkraft, die der Traktor zum Ziehen der Geräte aufbringen muß! Benutzen Sie die Tabelle 3!

Tabelle 3: Zugkraftbedarf landwirtschaftlicher Geräte auf mittleren Böden

Gerät	erforderliche Zugkraft (in kp)	Gerät	erforderliche Zugkraft (in kp)
Zweischarflug	380	Grubber	370
Dreischarflug	630 bis 1000	Cambridgewalze	150
Krümelwalzenegge	100	Holzwalze	100
Schleppe	250	Drillmaschine	120
schwere Egge	150	Mähbinder	500
Scheibenegge	500	Kopplungsbalken	30

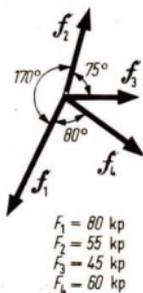


Bild 128/1 zu 2. Bild 128/2 zu 4.

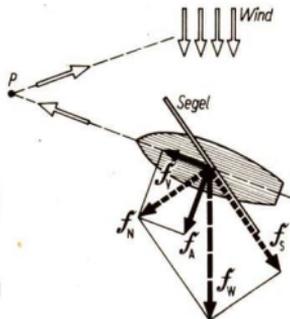


Bild 128/3 zu 8.



Bild 128/4 zu 7.

- Bestimmen Sie durch Zeichnung die resultierende Kraft (Bild 128/1)!
- Bei Erdarbeiten werden Feldbahnloren auf kurzen Strecken durch die Kraft des Menschen bewegt. Welche Kraftkomponente der Kraft des Arbeiters wird für das Fortbewegen der Last ausgenutzt? Fertigen Sie eine Skizze an!
- Sie tragen mit einem anderen Schüler einen Kartoffelkorb (Bild 128/2). Welche Kraft müssen Sie aufwenden, wenn der Korb 30 kp wiegt? Entnehmen Sie die Winkel dem Bild 128/2!
- An beiden Ufern eines Kanals fahren in gleicher Höhe zwei Zugmaschinen, die einen beladenen Lastkahn schleppen. Die beiden Abstände der Zugmaschinen vom Lastkahn sind gleich. Die beiden Schleppseile schließen einen Winkel von  $60^\circ$  ein. Die Beträge der auf sie einwirkenden Zugkräfte betragen je 115 kp. Wie groß ist die Kraft, mit der der Kahn gezogen wird?
- Eine Kugel hat ein Gewicht von 75 p. Wie groß ist die Hangabtriebskraft, wenn die Kugel eine geneigte Ebene mit einem Neigungswinkel von a)  $3^\circ$ , b)  $10^\circ$  und c)  $30^\circ$  hinabrollt?
- Das Bild 128/4 zeigt die Wirkungsweise eines Keils. Bestimmen Sie zeichnerisch die Kräfte, die senkrecht zu den Backen des Keils das Holz spalten! Vergleichen Sie diese Kräfte mit der Kraft, die durch Hammerschlag auf den Keil einwirkt! Welche Schlüsse ziehen Sie daraus für die Form des Keils?
- Beim „Ankreuzen gegen den Wind“ wird ein Segelschiff in eine Fahrtrichtung schräg gegen die Windrichtung gebracht (Bild 128/3). Durch günstige Stellung des Segels erreicht man dabei, daß die Kraft  $\vec{F}_W$ , die

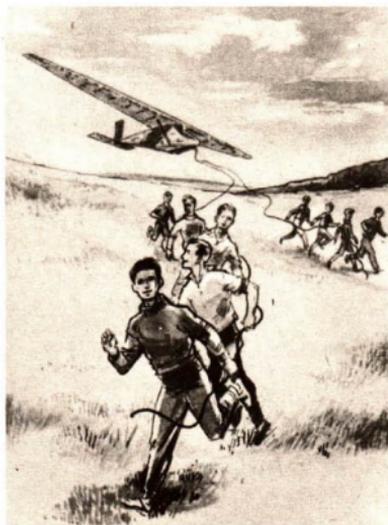


Bild 128/5 Gummiseilstart

der Fortbewegung des Segelschiffes dient, möglichst groß ist. Erläutern Sie, warum die Kraftkomponente  $\mathfrak{F}_s$  der Windkraft  $\mathfrak{F}_W$  für die Fortbewegung bedeutungslos ist! Welche Wirkung hat die Kraft  $\mathfrak{F}_A$ ?

Im Punkte P wird das Schiff durch schnelles Umlegen des Steuers in die neue Fahrtrichtung gebracht. Fertigen Sie eine Zeichnung an, aus der die neue Segelstellung und die Zerlegung der Windkraft hervorgeht!



Bild 129/1 zu 1

## Versuche

- V** 1. Bei einer Belastung von 1 kp wird eine Schraubenfeder um 5 cm gedehnt. Eine zweite, gleichartige Schraubenfeder wird mit der ersten verbunden (Bild 129/1). Wie groß ist die Gesamtausdehnung beider Schraubenfedern bei gleicher Belastung? (Das Gewicht der unteren Schraubenfeder soll nicht berücksichtigt werden!) Begründen Sie das Ergebnis!
2. An einem Körper greifen unter einem Winkel von jeweils  $120^\circ$  drei gleich große Kräfte an. Bestimmen Sie zeichnerisch die resultierende Kraft!

## ZUSAMMENFASSUNG

**Mehrere auf einen Körper einwirkende Kräfte können zu einer resultierenden Kraft zusammengesetzt werden. Nichtparallele Kräfte werden nach dem Kräfteparallelogramm zusammengesetzt.**

Wie wird die resultierende Kraft zeichnerisch ermittelt?

**Eine Kraft kann in Teilkräfte zerlegt werden.**

Wie werden die Teilkräfte genannt? Wie werden die Teilkräfte zeichnerisch ermittelt?

**Das Zusammensetzen und das Zerlegen von Kräften sind Grundlagen für technische Berechnungen.**

Nennen Sie Beispiele!

## Das Gleichgewicht der festen Körper



Ob es sich um den Bau eines Hauses oder eines Fernsehturmes, um die Konstruktion einer Brücke oder einer Maschine handelt, immer müssen die Gesetze der Statik beachtet werden. Zum Beispiel muß ein Lader so gebaut sein, daß er nicht umkippt, wenn er eine bestimmte Last anhebt. Auf welche Weise wird das beim abgebildeten Lader T 170 verwirklicht?



### 1. Der Schwerpunkt

Die Untersuchungen in diesem Kapitel beschränken sich auf feste Körper. Wenn dabei von Körpern gesprochen wird, sind stets feste Körper gemeint.

Ein Körper, der sich im Gleichgewicht befindet, ändert seinen Bewegungszustand nicht. Der Betrag der resultierenden Kraft ist Null.

Alle Körper auf der Erdoberfläche unterliegen dem Einfluß der Schwerkraft. Sind sie frei beweglich, so ändern sie ihren Bewegungszustand und nähern sich der Erdoberfläche mit wachsender Geschwindigkeit. Diese Wirkung der Schwerkraft kann durch eine einzige entgegengesetzt gerichtete Kraft aufgehoben und damit das Gleichgewicht hergestellt werden. Diese Kraft wird im folgenden Gleichgewichtskraft genannt. Man kann einen Körper zum Beispiel aufhängen. Mit einer Federwaage kann der Betrag der Gleichgewichtskraft gemessen werden (Bild 130/2). Es zeigt sich, daß auch bei verschiedenen gewählten Aufhängepunkten der Betrag der Gleichgewichtskraft in diesem Fall immer gleich groß ist.

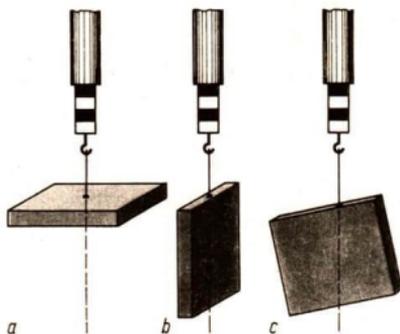


Bild 130/2 Je nach der Art der Aufhängung nimmt der Körper eine bestimmte räumliche Lage ein. Die Wirkungslinie der Kraft geht dabei immer durch einen Punkt, den Schwerpunkt  $S$

Eine genauere Untersuchung zeigt, daß sich alle Wirkungslinien — wie man den Körper auch aufhängt — in einem einzigen Punkt schneiden. Dieser Punkt, den man auch für andere Körper angeben kann, heißt *Schwerpunkt*. Er ist für statische Berechnungen von großer Bedeutung. In vielen Fällen ist es möglich, die Untersuchungen dadurch zu vereinfachen, daß man von der Einwirkung der Schwerkraft auf jedes einzelne Teilchen eines Körpers absieht. Die Schwerkraft wird dabei als eine Kraft dargestellt, die in einem einzigen Punkt des Körpers, dem Schwerpunkt, angreift. Die äußere Form des Körpers braucht dann nicht berücksichtigt zu werden, nur das *Gewicht* und der *Schwerpunkt* als Angriffspunkt des Gewichts sind zu betrachten.

**Für jeden festen Körper existiert ein Punkt, an dem eine zur Schwerkraft entgegengesetzt gerichtete Kraft angreifen muß, um der Schwerkraft das Gleichgewicht zu halten. Dieser Punkt heißt Schwerpunkt.**

Das Bestimmen des Schwerpunkts ist zum Beispiel für regelmäßig geformte Körper, die einen Symmetriepunkt haben, einfach. Besteht der Körper überall aus dem gleichen Material, so fällt der Schwerpunkt mit dem Symmetriepunkt des Körpers zusammen. Der Mittelpunkt einer homogenen Kugel ist gleichzeitig auch ihr Schwerpunkt (Bild 131/1).

Ist der Körper unregelmäßig geformt, so läßt sich der Schwerpunkt am einfachsten experimentell bestimmen.

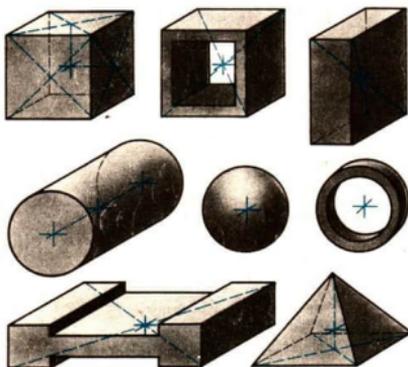


Bild 131/1 Geometrische Bestimmung des Schwerpunkts einiger Körper

- Wie würden Sie den Schwerpunkt einer unregelmäßig geformten Pappscheibe experimentell bestimmen?

Von technischer Bedeutung ist zum Beispiel die Kenntnis des Schwerpunkts bei Fahrzeugen aller Art. Das soll an einem Versuch deutlich gemacht werden.

31

**V** Ein Holzbrettchen liegt auf einer ebenen Unterlage (Bild 131/2). Über eine in *A* befestigte Schnur läßt man eine Kraft  $\vec{F}$  angreifen. Wie der Versuch zeigt, dreht sich das Brett um den Schwerpunkt *S*. Gleichzeitig vollführt dieser dabei eine fortschreitende Bewegung in Richtung der einwirkenden Kraft  $\vec{F}$ .

Eine Drehung ist nur dann nicht vorhanden, wenn die Wirkungslinie der Kraft  $\vec{F}$  durch den Schwerpunkt *S* geht.

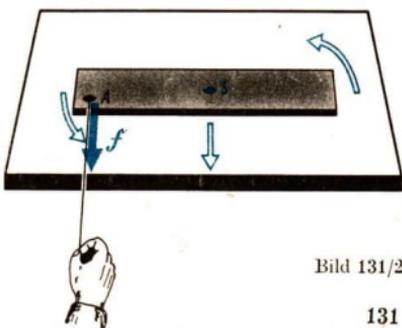


Bild 131/2

## Beispiel

- Fahrzeuge sollen meist eine fortschreitende Bewegung ausführen. Die Kraft des Fahrzeugmotors muß dann so wirken, daß ihre Wirkungslinie durch den Schwerpunkt des Fahrzeugs geht. Rutscht zum Beispiel bei einem Auto eines der beiden Antriebsräder, so gerät es leicht ins Schleudern.

## 2. Die Gleichgewichtsarten

Ein der Schwerkraft unterliegender Körper ist dann im Gleichgewicht, wenn die im Schwerpunkt  $S$  angreifende Gleichgewichtskraft  $\mathfrak{F}$  die Schwerkraft  $\mathcal{G}$  aufhebt (Bild 132/1).

Das gilt für jede Lage des Körpers. Voraussetzung ist nur, daß die Wirkungslinie der Kraft  $\mathfrak{F}$  durch den Schwerpunkt  $S$  des Körpers verläuft (Bild 132/2).

Je nach dem Verhalten der Körper bei einer kleinen Lageänderung unterscheidet man drei Gleichgewichtsarten:

*stabiles Gleichgewicht,  
labiles Gleichgewicht,  
indifferentes Gleichgewicht.*

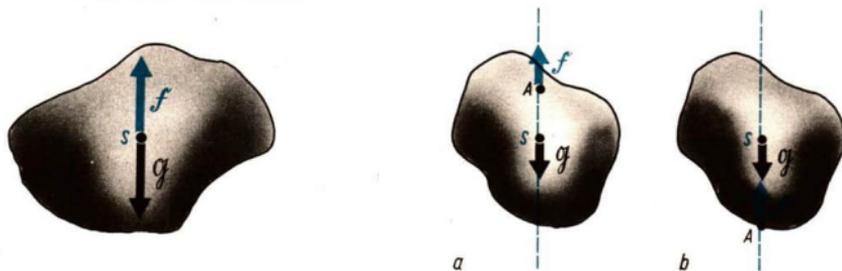


Bild 132/1 Der Körper befindet sich im Gleichgewicht, da die Wirkung der Schwerkraft  $\mathcal{G}$  durch die Kraft  $\mathfrak{F}$  aufgehoben wird

Bild 132/2 Der Körper befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Kraft  $\mathfrak{F}$  (Gleichgewichtskraft) und die Schwerkraft  $\mathcal{G}$  die gleiche Wirkungslinie haben und die Beträge der Gleichgewichtskraft und der Schwerkraft gleich sind

a) stabiles Gleichgewicht; b) labiles Gleichgewicht

**Stabiles Gleichgewicht.** Befindet sich der Schwerpunkt gegenüber seinem Unterstützungspunkt (Aufhängepunkt, Stützachse, Unterstützungsfläche) in der tiefstmöglichen Lage, so bezeichnet man diese Gleichgewichtsart als das **stabile Gleichgewicht** (Bild 132/2a). Der Schwerpunkt wird bei einer kleinen Lageänderung stets gehoben (Bilder 132/2a und 133/2).

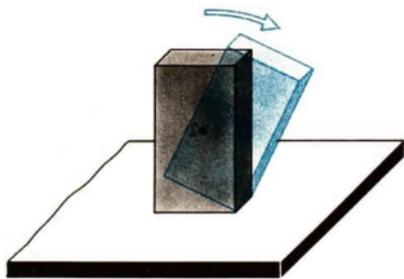


Bild 133/1 Wie ändert sich die Lage des Schwerpunkts gegenüber dem Unterstützungspunkt bei einer kleinen Drehung des Körpers?

Bild 133/2 Das Motorrad mit den Artisten befindet sich im stabilen Gleichgewicht. Da es ohne Reifen mit Spezialfelgen auf dem Hochseil fährt, besteht keine Absturzgefahr



**Labiles Gleichgewicht.** Befindet sich der Schwerpunkt gegenüber dem Unterstützungspunkt in der höchstmöglichen Lage, so bezeichnet man diese Gleichgewichtsart als das **labile Gleichgewicht** (Bild 133/3). Der Schwerpunkt wird bei einer kleinen Lageänderung stets gesenkt.

**Indifferentes Gleichgewicht.** Die Gleichgewichtsart, bei der Unterstützungspunkt und Schwerpunkt zusammenfallen oder der Schwerpunkt in der Stützachse liegt, wird als **indifferentes Gleichgewicht** bezeichnet (Bild 133/4). Der Schwerpunkt bleibt bei einer kleinen Lageänderung stets in der gleichen Höhe.

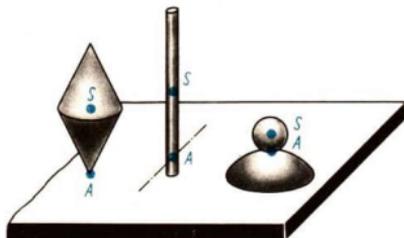


Bild 133/3 Labiles Gleichgewicht. Bei der geringsten Lageänderung kippt der Körper in eine stabile Gleichgewichtslage

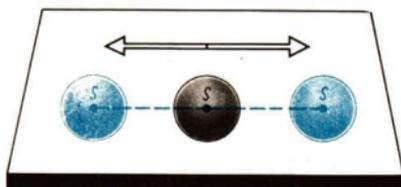


Bild 133/4 Indifferentes Gleichgewicht einer Kugel. Beim Rollen der Kugel auf einer waagerechten Ebene bleibt der Schwerpunkt in der gleichen Höhe

## Beispiel

- Die Räder eines Motorrads sind so gebaut, daß ihr Schwerpunkt in der Drehachse liegt. Wird das Rad gedreht, so befindet es sich auch in jeder neuen Lage wieder im Gleichgewicht. Das ist für den ruhigen Lauf zum Beispiel eines Kraftfahrzeugs oder einer schnell umlaufenden Maschine von großer Bedeutung. Räder, die diese Bedingung nicht genau erfüllen, werden *ausgewuchtet*, indem durch eine geeignete Bearbeitung oder durch Ausgleichsstücke der Schwerpunkt des Rades genau in die Drehachse gelegt wird (Bild 134/1).

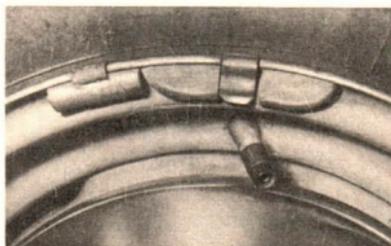


Bild 134/1 Durch Verschieben der Ausgleichsstücke kann das Rad ausgewuchtet werden

## 3. Die Standfestigkeit

Wie das Bild 134/2 zeigt, ist eine besondere Geschicklichkeit notwendig, um das labile Gleichgewicht zu erhalten. Man versuche einmal, ein auf der Spitze stehendes Ei zu balancieren.

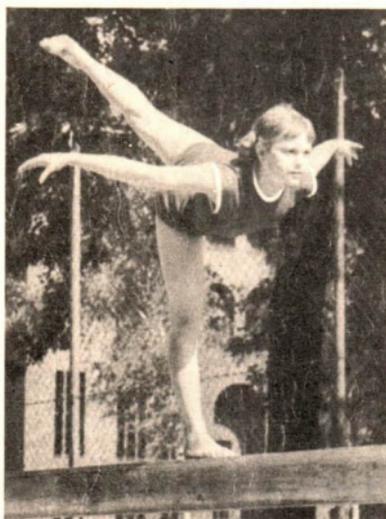


Bild 134/2 Balanceakt einer Turnerin. Wie heißt die Gleichgewichtsart, in der die Turnerin sich befindet?

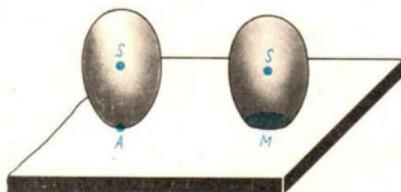


Bild 134/3 Das „Ei des KOLUMBUS“

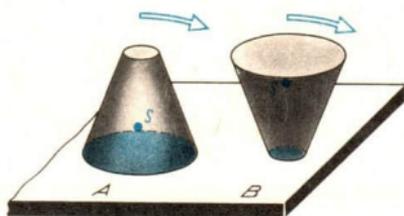


Bild 134/4 Der Körper A mit der größeren Unterstützungsfläche steht sicherer als der Körper B

Nach einer Überlieferung hat KOLUMBUS, der Entdecker Amerikas, dieses Problem sehr einfach „gelöst“, indem er statt des Unterstützungspunkts A durch Aufschlagen des gekochten Eies auf dem Tisch eine Unterstützungsfläche M schuf (Bild 134/3).

● In welcher Gleichgewichtslage befindet sich das „Ei des KOLUMBUS“?

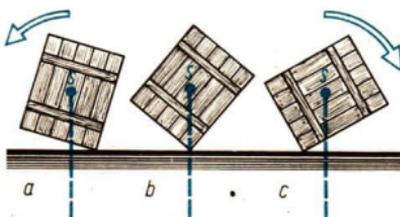
Die Unterstützungsfläche des Körpers, auf der dieser steht, ist für seine stabile Gleichgewichtslage wichtig. Ein Körper mit einer sehr großen Unterstützungsfläche läßt sich nicht so leicht umkippen wie ein solcher mit einer kleinen Unterstützungsfläche (Bild 134/4).

Verkleinert man die Unterstützungsfläche so sehr, daß der Körper nur noch auf einer Spitze steht, so befindet er sich in der labilen Gleichgewichtslage. Das heißt, der Körper muß so ausbalanciert werden, daß sich sein Schwerpunkt genau über dem Unterstützungspunkt befindet. Anderenfalls kippt der Körper sofort in eine stabile Gleichgewichtslage; der Schwerpunkt nimmt dabei eine möglichst tiefe Lage ein.

Beim Ankippen einer Kiste über eine Kante kippt diese nach dem Loslassen in eine stabile Gleichgewichtslage (Bild 135/1).

Bild 135/1

- Die Kiste kippt nach links
- Der Schwerpunkt befindet sich genau über der Kippkante. Die Kiste befindet sich in einer labilen Gleichgewichtslage
- Die Kiste kippt nach rechts in eine stabile Gleichgewichtslage

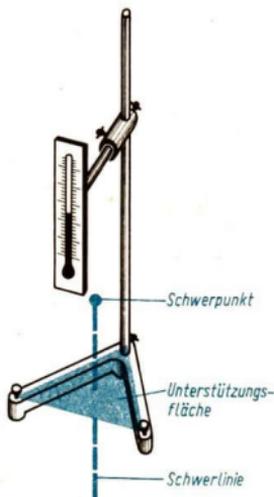


Aus diesem Beispiel ersieht man auch, daß ein auf einer Unterstützungsfläche stehender Körper dann umkippt, wenn das vom Schwerpunkt gefällte Lot, die *Schwerlinie*, nicht mehr durch seine Unterstützungsfläche läuft (Bild 135/2).



Bild 135/2 Ein Körper kippt um, wenn die Schwerlinie nicht mehr durch die Unterstützungsfläche geht

Bild 135/3 Das Stativ befindet sich im stabilen Gleichgewicht. Die Schwerlinie verläuft durch die Unterstützungsfläche



Die Eigenschaft eines im stabilen Gleichgewicht befindlichen Körpers bei einer zusätzlichen Krafteinwirkung im stabilen Gleichgewicht zu verbleiben, wird als **Standfestigkeit** des Körpers bezeichnet. Um die Standfestigkeit verschiedener Körper miteinander vergleichen zu können, muß man die Kraft, die den Körper zum Kippen bringt, immer in gleicher Weise angreifen lassen. Eine solche Kippkraft kann dann als Maß der Standfestigkeit verwendet werden. Es ist üblich, als Angriffspunkt der Kippkraft den Schwerpunkt des Körpers zu wählen und die Kippkraft senkrecht zur Schwerlinie und zur Kippkante wirken zu lassen.

32

**V** Zum Untersuchen der Standfestigkeit wird bei einem Quader der Betrag der Kippkraft durch Anbringen einer Federwaage in Höhe des Schwerpunkts  $S$  bestimmt (Bild 136/1).

Versuche mit verschiedenen Quadern zeigen, daß die Kippkraft von dem Gewicht des Körpers, von der Lage seines Schwerpunkts und von dem Abstand der Kippkante von der Schwerlinie abhängig ist.

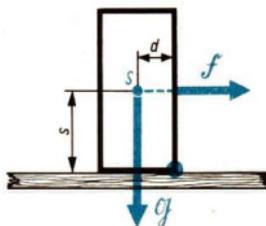


Bild 136/1 Untersuchung der Standfestigkeit an einem Quader

- Welche Bedeutung haben die Größen  $G$ ,  $d$  und  $s$ ? Wie beeinflussen sie die Standfestigkeit?

Die Standfestigkeit eines Körpers ist um so größer, je größer sein Gewicht und der Abstand der Kippkante von der Schwerlinie sind und je tiefer sein Schwerpunkt liegt.

Die Standfestigkeit ist für viele Gegenstände, die wir kennen, von großer Bedeutung.

#### Beispiel

- Besonders wichtig ist die Standfestigkeit bei Hebezeugen (Bild 136/2). Bei Kränen werden die schweren Maschinenteile im Unterteil des Kranes auf der Gegenseite der Last angeordnet. Welche Größen werden dadurch verändert? Begründen Sie, warum eine Vergrößerung der Standfestigkeit eintritt!

Bild 136/2 Dieser moderne Baukran dient zum Heben von Fertigteilen. Wodurch ergibt sich seine große Standfestigkeit?



## Fragen und Aufgaben

1. Was versteht man unter dem Schwerpunkt eines Körpers?
2. Das Bild 137/1 zeigt das Treibrad einer Lokomotive. Welche Bedeutung hat die Ausgleichsmasse?
3. Was kann man tun, um das Balancieren einer langen Bambusstange zu erleichtern?
- ! 4. Was stellen Sie bei näherer Untersuchung der Füße von Stehleuchten fest, besonders, wenn diese nur eine kleine Unterstützungsfläche haben? (Achtung! Vorher Netzstecker herausziehen!)
5. Warum befindet sich ein an einem Haken aufgehängter Spazierstock nicht in lot-rechter Lage?



Bild 137/1 zu 2.

6. Warum werden beim Beladen eines Wagens möglichst alle Gegenstände mit großem Gewicht auf den Wagenboden gepackt?

## Versuche

- V 1. Schneiden Sie aus Pappe einen unregelmäßig geformten Körper aus und bestimmen Sie den Schwerpunkt durch Unterstützung mit einem Finger! Kontrollieren Sie das Ergebnis mit Hilfe der Schwerlinien!
2. Warum ist das Gehen auf einem Seil viel schwerer, wenn keine Balancierstange verwendet wird? Spannen Sie einen Draht, und „balancieren“ Sie auf diesem einen Flaschenkorken, in welchen Sie zwei Eßgabeln gesteckt haben! Um welche Gleichgewichtslage handelt es sich hier?
3. Stellen Sie mit Hilfe eines leergeblasenen Eies ein „Stehaufmännchen“ her und begründen Sie das „Aufstehen“!
4. Stellen Sie sich einen „Zauberwürfel“ her, mit dem die Augenzahl sechs häufiger zu erreichen ist als mit einem gewöhnlichen Würfel.
5. Nehmen Sie an einer Wand folgende Stellung ein: der rechte Fuß und die rechte Schulter berühren die Wand. Heben Sie nun das linke Bein! Wie können Sie Ihre Feststellungen erklären?
6. Warum können Sie sich von einem Stuhl erheben, ohne den Oberkörper vorzubeugen? Warum gelingt Ihnen das nicht, wenn Sie von einer gleich hohen Kiste aufstehen?

## ZUSAMMENFASSUNG

Bei jedem festen Körper kann man einen Punkt bestimmen, der als Angriffspunkt der Schwerkraft angesehen werden kann. Dieser Punkt wird als Schwerpunkt bezeichnet.

Kann der Schwerpunkt auch außerhalb eines Körpers liegen? Nennen Sie gegebenenfalls Beispiele!

**Ein Körper befindet sich im Gleichgewicht, wenn die auf ihn einwirkende Schwerkraft durch eine entgegengesetzt zur Schwerkraft gerichtete Kraft (Gleichgewichtskraft) in ihrer Wirkung aufgehoben wird.**

Welche Wirkung hat die Schwerkraft, wenn der Körper nicht unterstützt wird, sondern frei beweglich ist?

**Je nach Lage des Unterstützungspunktes oder Aufhängepunktes zum Schwerpunkt unterscheidet man das indifferente, das labile und das stabile Gleichgewicht.**

Nennen Sie die Unterscheidungsmerkmale für die drei Gleichgewichtsarten!

**Ein durch eine Fläche unterstützter Körper befindet sich in einer stabilen Gleichgewichtslage, wenn die Schwerlinie durch die Unterstützungsfläche verläuft.**

Wie muß ein Baukran gebaut sein, damit seine Standfestigkeit möglichst groß ist?

#### 4. Die Entwicklung der Statik

Seit 5000 Jahren kennen die Menschen bereits kraftumformende Einrichtungen. Der Hebel und die geneigte Ebene wurden schon von den Ägyptern bei ihren großen Tempel- und Pyramidenbauten eingesetzt (Bild 138/1).

Griechische Gelehrte des Altertums dachten darüber nach, woraus die Welt besteht und wie man ihre Erscheinungen erklären kann. ARISTOTELES (384 bis 322 v. u. Z.) zum Beispiel schreibt über den Hebel: „Eine in größerer Entfernung vom Unterstützungspunkt angreifende Kraft bewegt einen Körper leichter, weil sie einen größeren Kreis beschreibt.“ Zu den bedeutsamsten physikalischen Ergebnissen jener Zeit kam der griechische Denker ARCHIMEDES (287 bis 212 v. u. Z.).<sup>1</sup> Er gilt als der Begründer der Statik. Sehr exakt wurden von ihm die Bedingungen angegeben, die eingehalten werden müssen, damit sich Kräfte das Gleichgewicht halten. Zur Erkenntnisgewinnung benutzte er bereits mechanische Modelle; physikalische Experimente erlangten ihre große Bedeutung erst später (vgl. Seite 155).

Nach ARCHIMEDES ruhte die Weiterentwicklung der Statik über tausend Jahre. Die Feudalgesellschaft war auf Grund ihrer ökonomischen Widersprüche und der wissenschaftsfeindlichen Einstellung der Kirche nicht in der Lage, zu wesentlichen Erkenntnissen in der Statik vorzudringen. Erst ökonomische Veränderungen führten

<sup>1</sup> Lies dazu Karl Rezac, Abenteuer mit Archimedes, Der Kinderbuchverlag, Seiten 67 bis 100

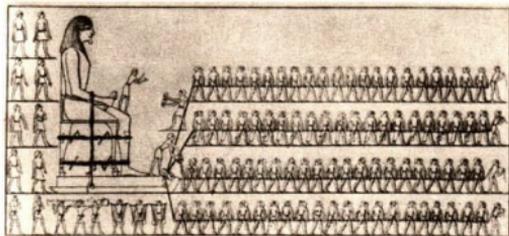


Bild 138/1 Relief aus der Zeit um 3000 v. u. Z. Zahllose Sklavenheere wurden in Ägypten eingesetzt, um die großen Bau- denkmäler jener Zeit, die Tempel und Pyramiden, zu schaffen

zu einer Belebung der Naturwissenschaften. In der Zeit des Übergangs vom Feudalismus zum Kapitalismus war die Entwicklung der Wissenschaften besonders stürmisch. Sie führte zu der größten Umwälzung, die die Menschheit bis dahin erlebt hatte.

Eine der genialsten Persönlichkeiten war der Künstler, Architekt und Ingenieur LEONARDO DA VINCI (1452 bis 1519). Von der mechanischen Flugmaschine bis zum Walzwerk erfand er sehr viele Apparate und Maschinen. Er fertigte von ihnen auch außerordentlich gute Zeichnungen an. Doch ist kaum eine seiner Maschinen zu seinen Lebzeiten gebaut worden. Er war seiner Zeit zu weit voraus (Bild 139/1).

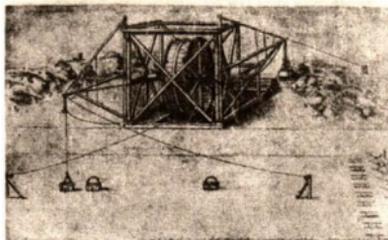


Bild 139/1 Skizze eines Grabenbaggers von LEONARDO DA VINCI

Neben Italien und Frankreich waren auch die Niederlande ein Zentrum der wissenschaftlichen Tätigkeit. Der Bau von Deichen, Kanälen und Schleusen führte zu neuen Erkenntnissen, besonders in der Statik der Flüssigkeiten. Berühmt wurde der „Gedankenversuch“ des holländischen Wasserbauingenieurs SIMON STEVIN (1548 bis 1620) über das Gleichgewicht einer Kette auf der geneigten Ebene (Bild 139/2).

Er kam zu dem Ergebnis, daß die Kettenteile auf den beiden geneigten Seiten des Dreiecks dann im Gleichgewicht sind, wenn sich ihre Gewichte wie die Seitenlängen des Dreiecks verhalten. Dies ist ein Beweis der Gültigkeit des Kräfteparallelogramms.

Der Professor für Physik und Ingenieurwesen zu Padua, GALILEO GALILEI (1564 bis 1642), formulierte diese Erkenntnisse allgemeingültig. Durch die Forschungen GALILEIS wurden besonders zwei Wissenszweige der Öffentlichkeit bekannt gemacht: die *Statik* und die *Dynamik*.

Am Ende des 18. Jahrhunderts war die Entwicklung der Statik im wesentlichen abgeschlossen. Die Statik bildet heute eine der Grundlagen der Technik und ihr Anwendungsgebiet wird in enger Verbindung zur Produktion ständig erweitert.

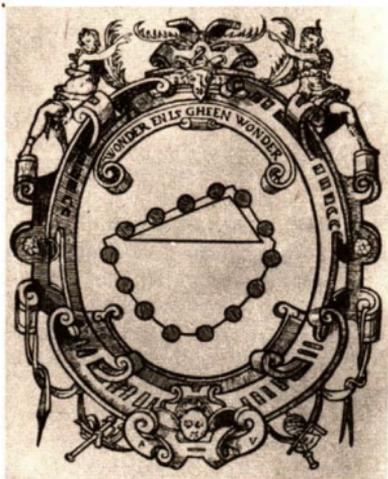


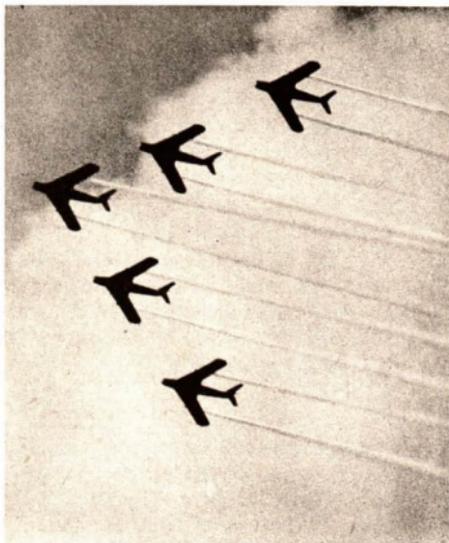
Bild 139/2 Titelbild einer Schrift STEVINS. Die Inschrift lautet: „Wunder und ist doch kein Wunder“. Die Kette muß im Gleichgewicht sein, anderenfalls würde sich die schwerere Seite nach unten bewegen. Der durchhängende Teil der Kette ist für sich im Gleichgewicht. Wird dieser weggelassen, so befinden sich die beiden Kettenteile auf der geneigten Ebene nach wie vor im Gleichgewicht

## Die gleichförmige Bewegung



Düsenjäger vom Typ MIG 19 beim Flug. Schnelle Jagdflugzeuge schützen unsere Heimat vor Angriffen. — Bei Kunstflugvorführungen kann man die Flugbahnen auf Grund der Rauchstreifen (Bild) beobachten.

Die Bahn eines Körpers reicht jedoch noch nicht aus, seine Bewegung zu bestimmen. Welche Größen müssen noch bekannt sein?



### 1. Ruhe und Bewegung

Die Entscheidung, wie sich ein Körper bewegt, scheint sehr einfach zu sein. Ein Radfahrer, der auf einer Landstraße fährt, bewegt sich in bezug auf die Landstraße. Die Telegrafmasten, die Bäume und die Kilometersteine an den Rändern der Straße sind in bezug auf die Landstraße in Ruhe. Durch einfache Beobachtungen können wir solche und ähnliche Feststellungen treffen.

Doch nicht immer stimmen die Aussagen verschiedener Beobachter überein. Zum Beispiel hat jemand, der am Fenster eines fahrenden Eisenbahnzuges sitzt, den Eindruck, daß er sich in Ruhe befindet, während die Landschaft an ihm vorbeizieht. Ein Schrankenwärter beobachtet, wie der Reisende im Zug an ihm vorbeifährt. Schwierig wird die Beurteilung der Bewegungsverhältnisse, wenn man auf einem Bahnhof in einem Zug sitzt und auf dem Nachbargleis ebenfalls ein Zug steht. Fährt dann einer der beiden Züge langsam und ruhig an, so kann man oft nicht sofort entscheiden, welcher Zug fährt. Man muß sich erst am Bahnhofsgebäude orientieren, um festzustellen, welcher Zug sich in bezug auf dieses bewegt.

Besonders das letzte Beispiel zeigt, daß Aussagen über den Bewegungszustand eines Körpers erst dann sinnvoll sind, wenn man den Bewegungszustand auf ein bestimmtes *Bezugssystem* bezieht. In den meisten Fällen bezieht man die mechanische Bewegung auf die Erdoberfläche. Die Erde ist dann der Bezugskörper oder das Bezugssystem. Es wird meist nicht besonders erwähnt. Man bezeichnet daher einen Körper als in Ruhe befindlich, wenn er sich relativ zur Erdoberfläche nicht bewegt.

## Beispiel

- Der Koffer im fahrenden Zug ist, wenn man die Erdoberfläche als Bezugssystem wählt, in Bewegung. Wird jedoch der Zug als Bezugssystem festgelegt, so befindet sich der Koffer in Ruhe. Sehen wir die Sonne als Bezugssystem an, so stellen wir fest, daß sich die Erde nicht nur um ihre Achse dreht, sondern auch noch eine Bahn um die Sonne beschreibt. Alle Erdenbewohner leben auf einem riesigen Karussell!

Für jeden Körper kann ein Bezugssystem angegeben werden, gegenüber dem er in Ruhe ist, während er sich gegenüber anderen Bezugssystemen bewegt.

## 2. Bestimmungsstücke einer Bewegung

Um die Bewegung eines Körpers beschreiben zu können, muß man die Bahn des Körpers ermitteln. Ist diese eine gerade Linie, so spricht man von einer *geradlinigen Bewegung*. Entsprechend wird eine Bewegung, die auf einer krummen Linie erfolgt, als *krummlinige Bewegung* bezeichnet.

Ein Motorradfahrer zum Beispiel überwindet in einer bestimmten Zeit eine viel größere Entfernung als ein Radfahrer. Von dem Motorradfahrer wird ein bestimmter Weg in einer kürzeren Zeit zurückgelegt als von dem Radfahrer. Folglich muß man zur genauen Bestimmung einer Bewegung außer der Bahn des Körpers auch die Länge des zurückgelegten Weges und die Zeitdauer der Bewegung kennen.

Die **Bahn**, der **Weg** und die **Zeit** stellen die Bestimmungsstücke einer Bewegung dar.

### Beispiel

- Das Bild 141/1 zeigt zwei verschiedene Möglichkeiten, die Bewegung eines Körpers auf einer vorgegebenen Bahn von A nach B zu bestimmen. Nach Bild 141/1a werden die Zeit und der Weg direkt gemessen. Im anderen Falle (Bild 141/1b) geht der Körper in einem bestimmten Zeitpunkt  $t_1$  durch den Punkt A und etwas später, zum Zeitpunkt  $t_2$ , erreicht er den Punkt B. Die Zeit für diese Bewegung ergibt sich somit als die dazwischenliegende Zeitspanne. Es gilt:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

und für den Weg

$$\Delta s = s_2 - s_1.$$

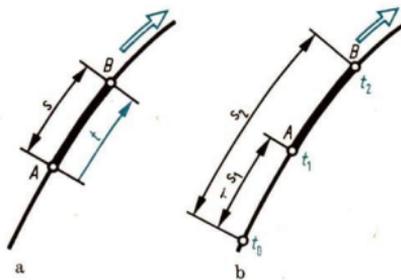


Bild 141/1 Bestimmungsstücke der Bewegung eines Körpers

a) Bahn  $\overline{AB}$

Weg  $s$

Zeit  $t$

b) Bahn  $\overline{AB}$

Weg  $s_2 - s_1 = \Delta s$

Zeit  $t_2 - t_1 = \Delta t$

### 3. Die Geschwindigkeit

Beobachtet man den Straßenverkehr in einer Großstadt, so kann man feststellen, wie sich die einzelnen Fahrzeuge in ihrem Bewegungszustand unterscheiden. An Kreuzungen wird langsamer, auf geraden Straßen schneller gefahren, das heißt, der Bewegungszustand der einzelnen Fahrzeuge ändert sich ständig. Die Fahrer passen ihre Geschwindigkeit den gegebenen Straßen- und Verkehrsverhältnissen an. Die **Geschwindigkeit** gibt den jeweiligen Bewegungszustand eines Körpers, nämlich die *Richtung* und den *Betrag* der Bewegung, an.

- *Auf welches Bezugssystem werden alle Fahrzeugbewegungen bezogen?*

Die Geschwindigkeit ist durch einen *Vektor* darstellbar. Als vektorielle Größe wird sie ebenso wie die Kraft durch eine gerichtete Strecke veranschaulicht (s. S. 117).

Wenn im weiteren Teil des Buches von Geschwindigkeit gesprochen wird, so ist, wenn nicht ausdrücklich von Betrag und Richtung der Geschwindigkeit gesprochen wird, stets der Betrag der Geschwindigkeit gemeint.

Für alle Bewegungen, bei denen sich die Richtung nicht ändert und der Körper in gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt, ist die Angabe der Geschwindigkeit am einfachsten. Ein solcher Körper führt eine *geradlinig gleichförmige Bewegung* aus.

<b>Die Geschwindigkeit einer geradlinig gleichförmigen Bewegung ist gleich dem Quotienten aus dem Weg und der Zeit.</b>
---

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

Die Maßeinheit der Geschwindigkeit erhält man als Quotient aus einer Längeneinheit und einer Zeiteinheit. Die gebräuchlichsten Maßeinheiten der Geschwindigkeit sind: m/s, km/h, km/s, m/min.

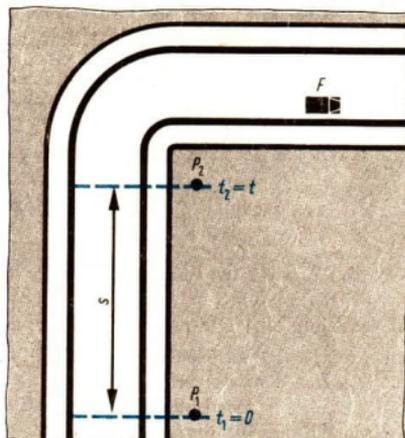
In der Seefahrt ist als Geschwindigkeit noch der Knoten (kn) zulässig. Er beruht auf der Seemeile (sm) als Einheit für die Länge.  $1 \text{ kn} = 1 \text{ sm/h} = 1852 \text{ m/h}$ .

- *Geben Sie die Geschwindigkeit eines Ozeandampfers (siehe Tabelle 4, Seite 143) in Knoten an!*

In der Praxis sind Bewegungen, die völlig gleichförmig ablaufen, praktisch nicht anzutreffen. Meist schwankt die Geschwindigkeit um einen Mittelwert. In vielen Fällen gibt man daher die *mittlere Geschwindigkeit* an. Man sieht von den einzelnen Geschwindigkeitsänderungen des Körpers ab und berechnet die Geschwindigkeit, die der Körper bei gleichförmiger Bewegung haben würde. In der Physik wird eine solche Verfahrensweise häufig angewendet. Man abstrahiert von unwesentlichen Erscheinungen, um den zu untersuchenden Vorgang gesetzmäßig erfassen zu können.

## Beispiel

- Um die Zahl der Unfälle zu senken, führt die Verkehrspolizei Geschwindigkeitskontrollen durch. Dies geschieht zum Beispiel dadurch, daß der Kontrollposten  $P_1$  (Bild 143/1) mit dem Posten  $P_2$  telefonisch in Verbindung steht und diesem die Kennzeichen des zu überprüfenden Fahrzeugs mitteilt. Weiterhin gibt  $P_1$  ein Signal, sobald das Fahrzeug eine bestimmte Marke überfährt. Der Kontrollposten  $P_2$  kann somit die Zeit stoppen, die für die ausgemessene Strecke  $s$  benötigt wird und bei Geschwindigkeitsüberschreitung dem Funkstreifenwagen  $F$  Mitteilung über den Verkehrssünder machen.



Für eine Kontrolle wurde eine Strecke von 125 m abgemessen. Welche Zeit darf vom Kraftfahrzeug nicht unterschritten werden, wenn die Höchstgeschwindigkeit 50 km/h beträgt?

Gegeben:

$$v = 50 \text{ km/h} = \frac{50000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}$$

$$s = 125 \text{ m}$$

Gesucht:

$t$  (in s)

Lösung:

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

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

$$t = \frac{125 \text{ m} \cdot 3600 \text{ s}}{50000 \text{ m}}$$

$$t = 9 \text{ s}$$

Alle Fahrzeuge, die eine kürzere Zeit als 9 s benötigen, überschreiten die höchstzulässige Geschwindigkeit.

Tabelle 4: Mittlere Geschwindigkeiten

Beispiel	Geschwindigkeit	
	(in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )	(in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ )
Gletscher	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Leitungselektronen (Kupfer; 1 mm <sup>2</sup> ; 6 A)	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Fußgänger	1,4	5
Fallschirmspringer	3 bis 5	10,8 bis 18
Ozeanfrachtdampfer	7	25
100-m-Läufer (Weltrekord)	10,0	36
Kraftwagen (Trabant)	18 bis 25	65 bis 90

Beispiel	Geschwindigkeit	
	$\left(\text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$	$\left(\text{in } \frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$
Schnellzug	22 bis 25	80 bis 90
Düsenflugzeug (Tu 104)	236	850
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, 20 °C	1460	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	$32 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^5$
Licht im luftleeren Raum	$3 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^9$

Hinweis:  $6,4 \cdot 10^{-6} = \frac{6,4}{10^6} = \frac{6,4}{1\,000\,000} = 0,000\,0064$   
 $7,9 \cdot 10^3 = 7,9 \cdot 1000 = 7900$

### Fragen und Aufgaben

- 1. Bei welcher Geschwindigkeit  $\left(\text{in } \frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$  erreicht ein Düsenflugzeug die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft  $\left(340 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ ?
- 2. Die mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne beträgt  $30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ . Welchen Weg legt die Erde innerhalb 45 min zurück?
- \*3. Ein Schiff fährt 3 Stunden stromabwärts. Für die gleiche Strecke braucht es stromaufwärts 4 Stunden. Welche Zeit benötigt ein mit der Strömung schwimmender Baumstumpf?

### ZUSAMMENFASSUNG

**Zum Beschreiben mechanischer Bewegungen gibt man ein Bezugssystem an.**

Welche Bedeutung hat die Erde als Bezugssystem?

**Die Bewegung eines Körpers wird durch die Bahn, den Weg und die Zeit bestimmt.**

Welche physikalische Größe bezeichnet den Bewegungszustand eines Körpers?

**Die Geschwindigkeit ist eine vektorielle Größe.**

Wie kann man Geschwindigkeiten darstellen?

**Eine Bewegung ist geradlinig gleichförmig, wenn sich ihr Geschwindigkeitsvektor nicht ändert.**

Wie heißt die Gleichung für die Geschwindigkeit einer geradlinigen gleichförmigen Bewegung?

## Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Bereits nach einem Anlauf von 60 m kann der Skispringer eine Geschwindigkeit von  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  erreichen. Überlegen Sie, durch welche Kraft diese ständige Geschwindigkeitszunahme verursacht wird! Durch welche Maßnahmen kann die Geschwindigkeit, die der Springer am Schanzentisch erreicht, vergrößert werden?



### 1. Ungleichförmige Bewegungen

Wie man in der Natur immer wieder beobachten kann, läuft ein Vorgang praktisch nie gleichförmig ab. Vielmehr treten ständig Veränderungen auf, zum Beispiel bei der Bewegung von Körpern Änderungen des Bewegungszustandes.

Bei einer Stadtfahrt im Auto kann man folgende Änderungen des Bewegungszustandes beobachten: Beim Anfahren wird durch die Kraft des Motors der Wagen immer schneller. Man bezeichnet Bewegungen, bei denen die Geschwindigkeit ständig zunimmt, als **beschleunigte Bewegungen**. Beim Bremsen wird vom Fahrer auf das Bremspedal eine Kraft ausgeübt, die auf die Räder wirkt; der Wagen wird langsamer. Man bezeichnet Bewegungen, bei denen die Geschwindigkeit ständig abnimmt, als **verzögerte Bewegungen**. Auch ein Ball, der in die Luft geworfen wird, führt zunächst eine verzögerte Bewegung aus.

- *Welcher Bewegungszustand liegt vor, wenn der Ball seine größte Höhe erreicht hat? Was für eine Bewegung erfolgt, wenn der Ball wieder nach unten fällt?*

Bewegungen, bei denen sich der Betrag der Geschwindigkeit ändert, heißen **ungleichförmige Bewegungen**.

**Alle Änderungen des Bewegungszustandes (Beschleunigung, Verzögerung) werden durch das Einwirken von Kräften verursacht.**

## 2. Mittlere Geschwindigkeit und Momentangeschwindigkeit

Die mittlere Geschwindigkeit gibt für einen bestimmten Bewegungsabschnitt, also für einen mehr oder weniger großen Zeitraum, den Mittelwert der Geschwindigkeit an. Ein Motorrad, das einen 110 km langen Weg in zwei Stunden zurückgelegt hat, ist somit mit einer mittleren Geschwindigkeit von  $55 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  gefahren worden. Dabei können mehrere Teilwege zum Beispiel mit einer Geschwindigkeit von  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  durchfahren worden sein, während vor einer Bahnstranke die Geschwindigkeit des Motorrads einige Zeit gleich Null war. Will man eine genauere Kenntnis des Bewegungszustandes des Motorradfahrers haben, so muß man kürzere Wege herausgreifen oder kürzere Zeitabschnitte untersuchen. Sind die gewählten Zeitabschnitte über alle Maßen klein, so werden auch die entsprechenden Teilwege über alle Maßen klein. Der Quotient aus dem Teilweg und dem dazugehörigen Zeitabschnitt gibt die Geschwindigkeit in diesem herausgegriffenen Augenblick, die **Momentangeschwindigkeit** an.

Für bestimmte Bewegungen werden noch Verfahren gezeigt werden, die es ermöglichen, die jeweilige Momentangeschwindigkeit zu bestimmen (s. S. 147).

- Bei welcher Bewegung stimmen die mittlere Geschwindigkeit und die Momentangeschwindigkeit in jedem Zeitpunkt überein?

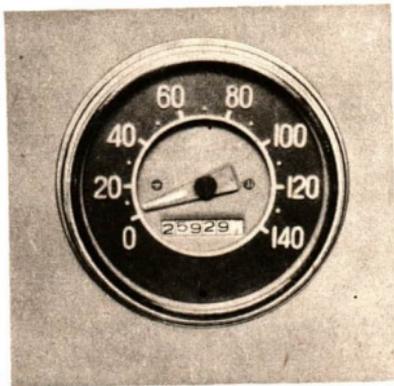


Bild 146/1 Tachometer. Sein Meßbereich umfaßt 0 bis 140 km/h. Ein Tachometer zeigt die Momentangeschwindigkeit an, wenn die Geschwindigkeitsänderungen nicht zu schnell erfolgen

## 3. Die Beschleunigung

Ist bei einer ungleichförmigen Bewegung die Geschwindigkeitsänderung von Zeiteinheit zu Zeiteinheit immer gleich, so wird diese Bewegung als *gleichmäßig* beschleunigt bezeichnet. Um die Änderung der Geschwindigkeit beschreiben zu können, hat man den Begriff **Beschleunigung  $a$**  eingeführt.

Unter Beschleunigung  $a$  versteht man den Quotienten aus der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  und der dazugehörigen Zeit  $\Delta t$

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

$\Delta v = v_2 - v_1$  (Geschwindigkeitsänderung in der Zeit  $\Delta t$ )

$\Delta t = t_2 - t_1$  (Zeitdauer der Geschwindigkeitsänderung)

Eine häufig benutzte Einheit der Beschleunigung ist  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  (sprich: Meter je Quadratsekunde oder Meter je Sekundenquadrat).

### Beispiel

- Ein Personenkraftwagen wird gleichmäßig beschleunigt und erreicht nach 11 s die für eine Schnellstraße zulässige Geschwindigkeit von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wie groß ist der Betrag der Beschleunigung des PKW?

Gegeben:

$$v_1 = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ (Start!)}$$

$$t_1 = 0 \text{ s}$$

$$v_2 = 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 16,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t_2 = 11 \text{ s}$$

Gesucht:

$$a \left( \text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Lösung:

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

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

$$a \approx \frac{16,7 \text{ m}}{11 \text{ s} \cdot \text{s}}$$

$$a \approx \underline{\underline{1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

Der Betrag der Beschleunigung des PKW beim Anfahren bis zum Erreichen einer Geschwindigkeit von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  beträgt  $1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .

Wie das Beispiel zeigt, sind die Größen  $t_1$  und  $v_1$  gleich Null, wenn die gleichmäßig beschleunigte Bewegung vom Beginn der Bewegung (Zeitpunkt 0) an betrachtet wird. Für die Beschleunigung<sup>1</sup> erhält man somit folgende Gleichung:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{v_2 - 0}{t_2 - 0} = \frac{v_2}{t_2}$$

Schreibt man für  $v_2$  und  $t_2$  einfach  $v$  und  $t$ , so erhält man für die Beschleunigung

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

Durch Umformen erhält man das **Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz** der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

Die Geschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus Beschleunigung und Zeit

$$v = a \cdot t$$

<sup>1</sup> Auch hier ist der Betrag der Beschleunigung gemeint.

Den Zusammenhang zwischen *Weg* und *Zeit* der gleichmäßig beschleunigten Bewegung zeigt folgender Versuch (Bild 148/1):

33

**V** Ein Wagen wird durch ein Gewichtsstück *G* gleichmäßig beschleunigt. Es wird der Weg *s* in Abhängigkeit von der Zeit *t* gemessen. Gleichzeitig ist eine Geschwindigkeitsmessung mittels eines Tachometers möglich.

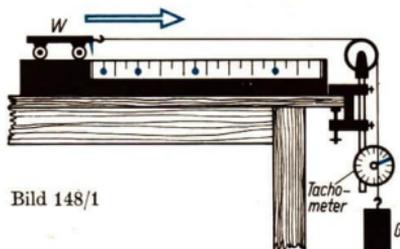


Bild 148/1

Folgende Werte wurden ermittelt (die Tabellenwerte sind die gerundeten Mittelwerte aus jeweils 5 Messungen):

Gemessene Werte			Errechnete Werte		
1	2	3	4	5	6
Zeit	Weg des Wagens	Geschwindigkeit	Beschleunigung	$t^2$	$\frac{s}{t^2} = k$
<i>t</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>a</i>		
in s	in m	in $\frac{m}{s}$	in $\frac{m}{s^2}$	in $s^2$	in $\frac{m}{s^2}$
0	0,0	0,0		0	—
1	0,1	0,2	0,2	1	0,1
2	0,4	0,4	0,2	4	0,1
3	0,9	0,6	0,2	9	0,1
4	1,6	0,8	0,2	16	0,1

Durch Vergleich der Spalten 2 und 5 erkennt man, daß der Weg proportional dem Quadrat der Zeit ist (Bild 149/1):

$$s \sim t^2.$$

Der Quotient  $\frac{s}{t^2}$  ergibt somit einen konstanten Wert *k* (Spalte 6):

$$\frac{s}{t^2} = k \quad \text{oder}$$

$$s = k \cdot t^2.$$

Da die untersuchte Bewegung gleichmäßig beschleunigt ist, hat die Beschleunigung während des Versuchsablaufs einen bestimmten Wert, nämlich

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{0,2 \text{ m}}{1 \text{ s} \cdot \text{s}} = 0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Ein Vergleich der Beschleunigung  $a$  mit dem Faktor  $k$  (Spalten 4 und 6) ergibt

$$k = \frac{a}{2}.$$

Somit erhält man das

**Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:**

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

- Welche Gleichung ergibt sich für die Beschleunigung  $a$ ?

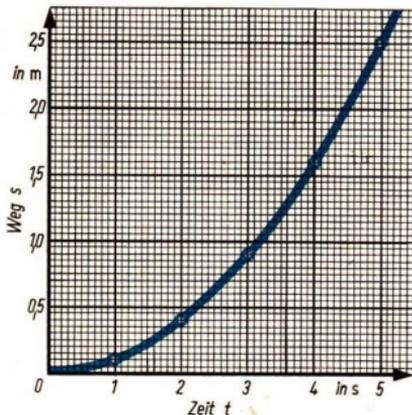


Bild 149/1 Weg-Zeit-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung

### Beispiel

- Der Anfang einer Rodelbahn ist auf einer Länge von 100 m geradlinig und gleichmäßig geneigt. Ein Schlitten durchfährt diesen geradlinigen Teil der Bahn in 10 s. Mit welcher Geschwindigkeit (in  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ) erreicht der Fahrer die erste Kurve, wenn es sich um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt?

*Gegeben:*

$$s = 100 \text{ m}$$

$$t = 10 \text{ s}$$

*Gesucht:*

$$v \left( \text{in } \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

*Lösung:*

$$v = a \cdot t$$

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

daraus folgt

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

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

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

$$v = a \cdot t$$

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

$$v = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

*Nebenrechnung:*

Umrechnung in  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ :

$$20 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{20 \cdot \frac{1}{1000} \text{ km}}{1 \cdot \frac{1}{3600} \text{ h}}$$

$$20 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Der Schlittenfahrer erreicht nach 10 s eine Geschwindigkeit von  $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .

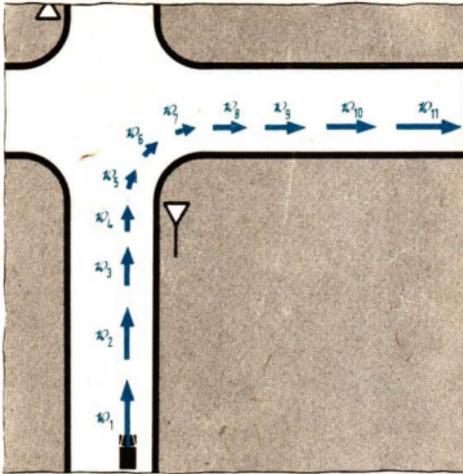


Bild 150/1

Die Beschleunigung als vektorielle Größe. Da die Geschwindigkeit ein Vektor ist, kann eine Geschwindigkeitsänderung nicht nur in der Zunahme oder Abnahme des Betrages der Geschwindigkeit bestehen, sondern auch eine Richtungsänderung bedeuten (Bild 150/1).

Die Beträge der Geschwindigkeitsvektoren  $v_1$  bis  $v_4$  werden kleiner; verzögerte Bewegung (Beschleunigung negativ); die Beträge der Geschwindigkeitsvektoren  $v_5$ ,  $v_6$ ,  $v_7$  bleiben konstant, jedoch die Richtung der Vektoren ändert sich; krummlinige Bewegung; die Beträge der Geschwindigkeitsvektoren  $v_8$  bis  $v_{11}$  nehmen zu; beschleunigte Bewegung (Beschleunigung positiv).

#### 4. Der freie Fall

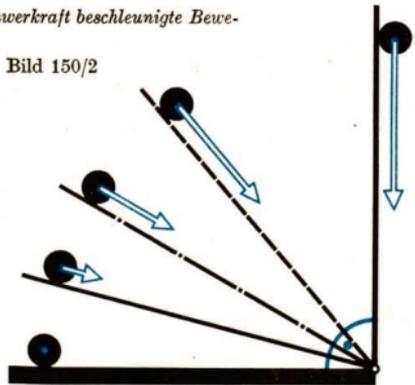
Alle Körper auf der Erde unterliegen dem Einfluß der Schwerkraft.

- Nennen Sie Beispiele, in denen durch die Schwerkraft beschleunigte Bewegungen auftreten!

34

**V** An einer geneigten Ebene, deren Neigungswinkel verstellbar ist, kann man die Abhängigkeit der Beschleunigung einer herabrollenden Kugel vom Neigungswinkel der Ebene studieren (Bild 150/2). Je größer der Neigungswinkel einer geneigten Ebene ist, um so größer ist auch die Beschleunigung eines auf ihr herabrollenden Körpers. In senkrechter Lage der Ebene ist die Beschleunigung der Kugel am größten. Diese führt eine Fallbewegung aus.

Bild 150/2



Erfolgt das Fallen völlig ungehindert, allein durch das Einwirken der Schwerkraft auf den Körper, so wird die Bewegung als **freier Fall** bezeichnet. Mit dem einfachen Versuch 35 kann bestätigt werden, daß der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist (Bild 151/1).

**V** Bei der abgebildeten *Fallschnur* geht man von dem Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung aus. Danach sind die einzelnen Fallwege dem Quadrat der jeweiligen Fallzeiten proportional:  $s \sim t^2$ . Verhalten sich die Abstände der Kugeln der Fallschnur vom Fußboden wie  $1^2:2^2:3^2:4^2:5^2$ , also wie  $1:4:9:16:25$ , so ist diese Bedingung erfüllt. Die Kugeln schlagen nach dem Loslassen der Fallschnur in gleichen Zeitabständen auf dem Boden auf.

Bei Fallversuchen, die nicht im luftleeren Raum durchgeführt werden können, verwendet man kugelförmige, möglichst schwere Körper, um den Luftwiderstand vernachlässigen zu können. Diese Körper fallen während der ersten Sekunden im luftgefüllten Raum fast ebenso schnell wie im luftleeren Raum. Durch Messungen kann nach dem Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung zum Beispiel auch die Beschleunigung eines fallenden Körpers bestimmt werden.

### Beispiel

■ Bei einem Fallversuch wurde festgestellt, daß ein Stein die Strecke von 9,6 m in 1,4 s durchfällt. Welche Beschleunigung erteilt die Schwerkraft dem Stein?

Gegeben:

$$s = 9,6 \text{ m}$$

$$t = 1,4 \text{ s}$$

Gesucht:

$$a \left( \text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Lösung:

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

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

$$a = \frac{2 \cdot 9,6 \text{ m}}{1,4^2 \text{ s}^2}$$

$$a \approx 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Der Stein fällt mit einer Beschleunigung von  $9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .

Wie genauere Messungen gezeigt haben, erhält man bei Fallversuchen am gleichen Ort immer den gleichen Betrag für die Beschleunigung des freien Falls. Alle Körper fallen gleich schnell. Ungefähr 2000 Jahre lang glaubte man an die Meinung des griechischen Philosophen ARISTOTELES, der behauptet hatte, daß schwere Körper immer schneller fallen als leichte. Um 1600 stellte GALILEO GALILEI durch Versuche fest:

**Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.**

Die Beobachtung, daß zum Beispiel ein Blatt Papier langsamer als eine Bleikugel zu Boden fällt, beweist nicht etwa die Ansicht des

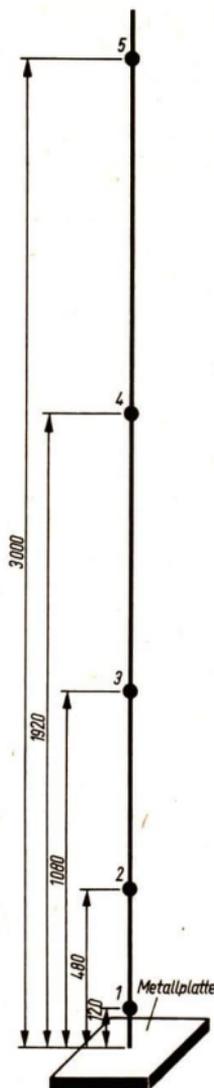


Bild 151/1

ARISTOTELES. Diese Beobachtungen sind dadurch zu erklären, daß es sich in den angegebenen Beispielen gar nicht um einen freien Fall der Körper handelt, weil neben der Schwerkraft noch andere Kräfte wirken, welche die Bewegung hemmen. Solche Kräfte sind zum Beispiel der Luftwiderstand oder der Auftrieb der Luft. Bevor man also die Gesetze des freien Falls anwenden will, muß untersucht werden, inwieweit zum Beispiel der bei der Bewegung auftretende Luftwiderstand vernachlässigbar ist.

- Das Bild 152/1 zeigt eine sogenannte Newtonsche Röhre. Was muß gemacht werden, wenn man zeigen will, daß alle in ihr befindlichen Körper gleich schnell fallen?

Da die Schwerkraft vom Ort abhängig ist, ist auch die beim freien Fall auftretende Beschleunigung vom Ort abhängig. So ist zum Beispiel wegen der Abplattung der Erde an den Polen die *Fallbeschleunigung* dort größer als am Äquator. In unseren Breitengraden wird mit einer mittleren Fallbeschleunigung

$$g = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

gerechnet. Für die meisten Rechnungen genügt der abgerundete Wert der Fallbeschleunigung  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  oder  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .

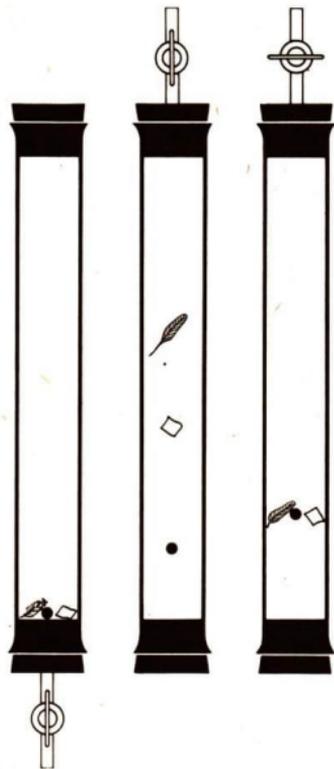


Bild 152/1 Newtonsche Fallröhre. Sie enthält zum Beispiel kleine Kugeln aus Blei, Eisen oder Aluminium und Papier- oder Korkstückchen und eine Feder

Tabelle 5: Abhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Ort

Höhe über NN in m	Ort	Fallbeschleunigung $g$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
0	Pol	9,83
0	Äquator	9,78
8840	Mount Everest	9,65
$300 \cdot 10^3$	von der Erde entfernt	8,96
$40000 \cdot 10^3$	von der Erde entfernt	0,19

Unter Verwendung der Fallbeschleunigung  $g$  lauten die Gesetze des freien Falls:

Weg-Zeit-Gesetz	$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz	$v = g \cdot t$
Geschwindigkeit-Weg-Gesetz	$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s}$

- Fertigen Sie zu den drei Fallgesetzen die entsprechenden Diagramme an! Leiten Sie das Geschwindigkeit-Weg-Gesetz aus dem Weg-Zeit- und dem Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz ab!

### Fragen und Aufgaben

- 1. Wodurch ist eine geradlinig gleichförmige Bewegung gekennzeichnet?
  2. Was verstehen Sie unter der Momentangeschwindigkeit? Wie ermitteln Sie die mittlere Geschwindigkeit einer Bewegung?
  3. Erklären Sie, was Sie unter Beschleunigung verstehen!
  4. Was für eine Bewegung ist der freie Fall? Erklären Sie, warum nicht alle Körper, die man am gleichen Ort im luftgefüllten Raum fallen läßt, die gleiche Beschleunigung haben!
  5. Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit bei folgenden sportlichen Leistungen (in  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ )?
    - a) Friedensfahrtstrecke Praha—Brno, 220 km in 5:28:48 h
    - b) 20 km-Langstreckenlauf in 59:51,8 min
    - c) 500 m-Eisschnellauf (Damen) in 45 s
    - d) 200 m-Brustschwimmen (Damen) in 2:48,0 min
    - e) 80 m-Hürdenlauf (Damen) in 10,5 s
  6. Ein Zug fährt aus einem Bahnhof gleichmäßig beschleunigt hinaus. Nach 3 min erreicht er eine Geschwindigkeit von  $68 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wie groß ist die Beschleunigung des Zuges? Wie weit ist der Zug nach 2 min vom Bahnhof entfernt?
  7. Welche Endgeschwindigkeit erreicht ein Springer bei einem Sprung ins Wasser aus 10 m, 5 m, 3 m und 1 m Höhe?
  8. Eine TU 104 setzt bei der Landung mit einer Geschwindigkeit von  $225 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  auf. Die Zeitdauer des Bremsens beträgt 48 s (ohne Bremsschirm) bzw. 35 s (mit Bremsschirm). Wie lang ist der Weg, den das Flugzeug jeweils auf der Landepiste rollt?
  - \*9. Ein Radfahrer (Anfangsgeschwindigkeit  $0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ) fährt eine bergab führende Straße von 120 m Länge in 13 s. Die Straße geht dann in einen waagerechten Teil über. Der Radfahrer läßt danach sein Rad ausrollen. Dazu benötigt er 22 s. Wie groß ist der zurückgelegte Weg auf der waagerechten Straße? Wie groß ist die negative Beschleunigung wegen der Reibungskräfte?
  10. Ein Zug legt die Entfernung zwischen zwei Stationen, die 10 km voneinander entfernt sind, auf folgende Weise zurück:  
Nach der Abfahrt nimmt die Geschwindigkeit des Zuges entlang einer Strecke von 0,6 km proportional mit der Zeit zu. Dann fährt der Zug mit einer Geschwindigkeit von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

In einer Entfernung von 400 m von der nächsten Station bremst der Zug gleichmäßig ab und kommt genau im Bahnhof zum Stehen. Wie lang war die Fahrzeit des Zuges? Zeichnen Sie das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm!

11. Ein Fallschirmspringer führt einen Sprung mit verzögerter Öffnung des Schirmes aus. Er öffnet erst nach 4 Sekunden den Fallschirm. Welchen Weg legt der Springer in den ersten drei Sekunden zurück, wenn der Luftwiderstand vernachlässigt wird? Wie groß ist der Fallweg in der 4. Sekunde?
12. In einen 170 m tiefen Schacht läßt man einen Stein fallen. Nach wieviel Sekunden hört man das Aufschlagen des Steines auf dem Boden? (Der Luftwiderstand wird vernachlässigt.)

## Versuche

- V** 1. Stellen Sie sich eine 3 m lange Fallschnur her, deren Kugeln jeweils den gleichen Abstand von 60 cm haben! Beschreiben Sie das Aufschlagen der Kugeln beim Fallversuch! Wie groß sind die Zeitdifferenzen zwischen den einzelnen Aufschlägen?
2. Führen Sie einen Fallversuch mit einem leichten Ball (z. B. Tischtennisball) und einer gleich großen, schweren Kugel (z. B. Metallkugel) durch! Vergleichen Sie die Fallzeiten, indem Sie beide Kugeln zur gleichen Zeit loslassen! Erklären Sie das Versuchsergebnis!

## ZUSAMMENFASSUNG

**Die Ursachen ungleichförmiger Bewegungen sind physikalische Kräfte.**

Beschreiben Sie den Verlauf einer ungleichförmigen Bewegung!

**Die Beschleunigung ist der Quotient aus Geschwindigkeitsänderung und der dazugehörigen Zeit.**

Wie lautet das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung?

**Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.**

Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Fallgesetze angewendet werden können?

## 5. Die Entdeckung der Fallgesetze

Im 16. und im 17. Jahrhundert brach sich ein neues, wissenschaftliches Denken Bahn. Die Ursache bildeten die Veränderungen der gesellschaftlichen Verhältnisse.

Die sich herausbildenden neuen Produktionsverhältnisse führten zu einem verstärkten Interesse für die „Mathematik und Ingenieurwissenschaften“.

Im Kampf gegen die veralteten Ansichten des ARISTOTELES trat GALILEO GALILEI besonders hervor. Er forderte Selbständigkeit für die Wissenschaft, die damals ein Zweig der Theologie war. Nicht nur in Religionsfragen, sondern auch bei allen wissenschaftlichen Festlegungen kam der Kirche als geistlicher Obrigkeit das letzte Wort zu. Die meisten Zeitgenossen GALILEIS standen gegen ihn und waren gegen die Ergebnisse seiner Arbeiten. Er selbst sagte, daß diese Gattung Leute glaubt, „man müsse die Wahrheit nicht im Weltraume, nicht in der Natur suchen, sondern (ich gebrauche

ihre eigenen Worte) in der Vergleichung der Texte“! GALILEI hatte große Zweifel an den bestehenden Theorien, die Beantwortung seiner Fragen suchte er nicht in den überlieferten Büchern, sondern direkt in der Natur; das heißt er führte zur Bestätigung von Hypothesen *Versuche* durch. Als glänzender Experimentator bewies er, daß alle Körper unabhängig von ihrem Gewicht gleich schnell fallen.

ARISTOTELES hatte behauptet, daß ein Eisenstab, der hundertmal soviel wie ein anderer, beim Fallen in der gleichen Zeit eine hundertmal so große Strecke zurücklegt. GALILEI stellte Versuche an und erkannte, daß die Fallbewegung eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ist. Damit hatte er das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz  $v = g \cdot t$  gefunden. Mathematische Überlegungen führten ihn auf das Weg-

Zeit-Gesetz  $s = \frac{g}{2} \cdot t^2$ , welches von ihm auch experimentell bestätigt wurde. Er

vermutete, daß bei einer Bewegung auf einer geneigten Ebene ähnliche Verhältnisse gelten müssen und experimentierte daher mit einer „Fallrinne“. Die von ihm dazu beschriebenen Versuche stellen noch heute eine Glanzleistung der Experimentierkunst dar. Man muß bedenken, daß ihm keine Uhren oder gar Stoppuhren zur Verfügung standen!

GALILEI beschreibt seine Versuche folgendermaßen:

Auf einem Holzbrett von 12 Ellen Länge . . . war eine Rinne von etwas mehr als einem Zoll Breite eingegraben. Dieselbe war sehr gerade gezogen, und um die Fläche recht glatt zu haben, war inwendig ein sehr glattes und reines Pergament aufgeklebt, in dieser Rinne ließ man eine sehr harte, völlig runde und glattpolierte Messingkugel laufen. Nach Aufstellung des Brettes wurde dasselbe einerseits angehoben, dann ließ man die Kugel durch den Kanal fallen und verzeichnete in so-gleich zu beschreibender Weise die Fallzeit für die ganze *Strecke*: häufig wiederholten wir den einzelnen Versuch, zur genaueren Ermittlung der Zeit, und fanden gar keine Unterschiede, auch nicht einmal von einem Zehntteil eines Pulsschlages. Darauf ließen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strecken . . . und fanden stets, daß die *Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten*; und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene, in der die Kugel lief.

Zur Ausmessung der *Zeit* stellten wir einen Eimer voll Wasser auf, in dessen Boden ein enger Kanal angebracht war, durch den sich ein feiner Wasserstrahl ergoß, der mit einem kleinen Becher aufgefangen wurde während einer jeden beobachteten Fallzeit: das dieser Art aufgesammelte Wasser wurde auf einer sehr genauen Waage gewogen; aus den Differenzen der Wägemengen erhielten wir die Verhältnisse der Gewichte und der Zeiten, und zwar mit solcher Genauigkeit, daß die zahlreichen Beobachtungen niemals merklich voneinander abwichen.



Bild 155/1 GALILEO GALILEI (1564 bis 1642)

## Die zusammengesetzte Bewegung



Der Überseehafen Rostock ist bekannt als ein schneller Umschlaghafen. Das Be- und Entladen der Schiffe erfolgt zum Beispiel mit modernen Krananlagen, die die Lasten gleichzeitig heben und schwenken können.

In der Technik gibt es nur wenige Beispiele, bei denen ein Körper eine einfache Bewegung ausführt. Meist erfolgen mehrere Bewegungen gleichzeitig. Das Anheben der Last, das Schwenken und die Bewegung entlang der Kaimauer können einander überlagert werden.



### 1. Der Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen

Der Transport eines Werkstückes mit einem Laufkran in einer Werkhalle ist ein weiteres Beispiel für die Zusammensetzung von Teilbewegungen (Bild 156/2).

- *Beschreiben Sie die beiden Teilbewegungen, wenn sich das Werkstück von A nach D gleichförmig bewegt!*

Bild 156/2 Laufkran in einer Werkhalle (Blick von oben). Die Laufkatze und die Kranbrücke können unabhängig voneinander Teilbewegungen ausführen. Um das zu bearbeitende Werkstück von der Fräsmaschine nach dem Bohrwerk zu bewegen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Man kann zum Beispiel das Werkstück mit der Laufkatze erst nach B befördern und dann mit der Kranbrücke nach D transportieren. Doch spart man Zeit, wenn die beiden Teilbewegungen gleichzeitig erfolgen. Im günstigsten Falle wird der Transport diagonal von A nach D durchgeführt. Dies ist der kürzeste Weg

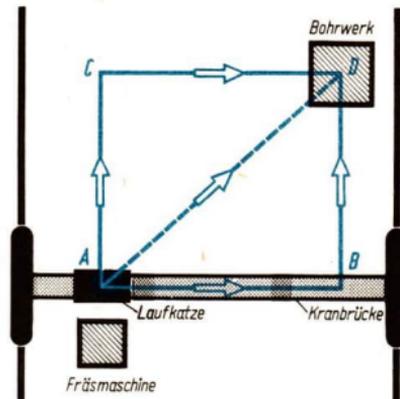
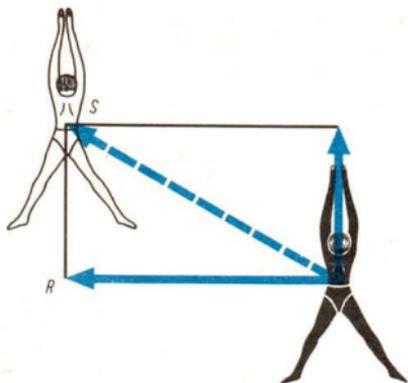


Bild 157/1 Überlagerung der beiden Teilbewegungen bei einem Schwimmer, der einen Fluß durchquert. Wäre die Strömung nicht vorhanden, so käme der Schwimmer an den gleichen Ort, wenn er zum Beispiel erst nach R und dann nach S schwimmen würde



Ein Schwimmer, der einen Fluß überquert, führt ebenfalls eine zusammengesetzte Bewegung aus. Die beiden Teilbewegungen sind durch die Strömung des Flusses und durch die Bewegung, die der Schwimmer in einem ruhenden Gewässer ausführen würde, gegeben (Bild 157/1).

Für alle zusammengesetzten Bewegungen gilt der Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen:

Führt ein Körper mehrere Bewegungen gleichzeitig aus, so überlagern sich die Teilbewegungen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

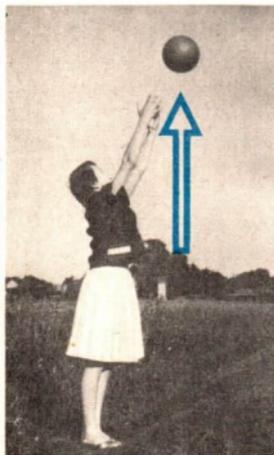
## 2. Der Wurf

Je nachdem ob die Anfangsrichtung einer Wurfbahn *waagrecht*, *lotrecht* (nach oben oder nach unten) oder *schräg* ist, unterscheidet man:

waagerechter Wurf

lotrechter Wurf

schräger Wurf

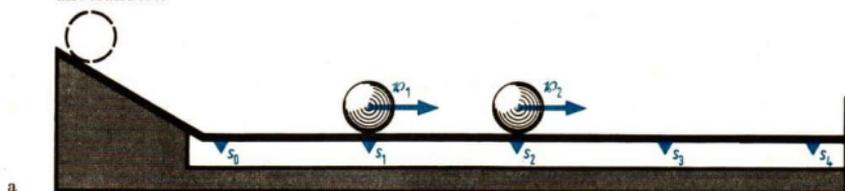


## 2.1. Der waagrechte Wurf

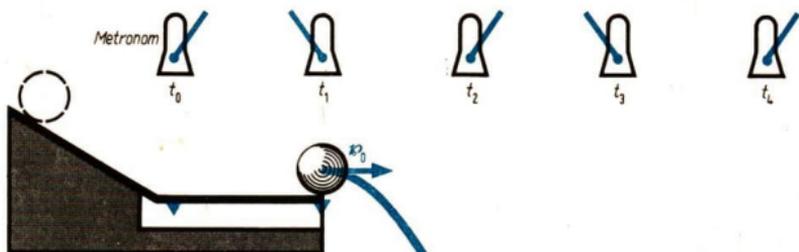
Bei den folgenden Bewegungen werden nur die Beträge der Geschwindigkeit betrachtet.

36

**V** Verleiht man einer Kugel mittels einer geneigten Ebene eine Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ , so behält sie diese bei, sofern sie auf einer waagerechten Ebene ungehindert geradlinig weiterrollen kann (Bild 158/1 a). Die Kugel bewegt sich geradlinig gleichförmig, das heißt, die Geschwindigkeit  $v_0$  bleibt unverändert.



a



b

Bild 158/1 a Kugel in geradlinig gleichförmiger Bewegung

$$v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_0$$

Bild 158/1 b Geradlinig gleichförmige Bewegung und Fallbewegung der Kugel

Verläßt die Kugel die waagerechte Ebene, so führt sie einen waagerechten Wurf aus (Bild 158/1 b).

- Welche Kraft verändert jetzt den Bewegungszustand der Kugel?

Ein waagerechter Wurf setzt sich somit aus einer geradlinig gleichförmigen Bewegung in waagerechter Richtung und der lotrecht erfolgenden Fallbewegung eines Körpers zusammen. Dies soll durch zwei Versuche nachgeprüft werden.

**V** Nach Bild 159/1 werden zwei Kugeln gleichzeitig auf einer geneigten Ebene gleichartig beschleunigt. Die erste Kugel rollt auf einer waagerechten Ebene geradlinig gleichförmig mit der Geschwindigkeit  $v_0$  weiter, während die zweite Kugel eine waagerechte Wurfbewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  ausführt. Es zeigt sich, daß sich in jedem Zeitabschnitt die fallende Kugel senkrecht unter der weiterrollenden Kugel befindet. Beide Kugeln treffen gleichzeitig auf die senkrechte Wand.

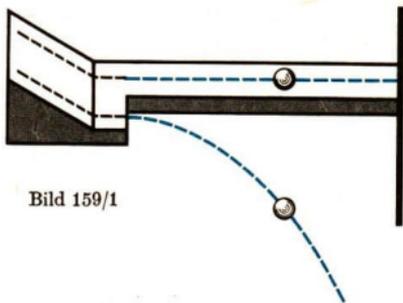


Bild 159/1

Der Versuch nach Bild 159/1 bestätigt, daß die Wege bei der geradlinig gleichförmigen Bewegung und die Wurfweiten beim waagerechten Wurf in gleichen Zeiten gleich groß sind.

Der Versuch nach Bild 159/2 bestätigt, daß die Fallstrecken beim freien Fall und beim waagerechten Wurf in gleichen Zeiten gleich groß sind. Für beide Teilbewegungen, für die geradlinig gleichförmige Bewegung wie für den freien Fall, sind die Bewegungsgesetze bekannt. Somit können beim waagerechten Wurf zu jedem Zeitabschnitt der resultierende Weg und die resultierende Geschwindigkeit des Körpers angegeben werden.

Bei der grafischen Lösung (Bild 159/3) kann man wegen der Unabhängigkeit der Bewegungen den resultierenden Weg aus den beiden Teilwegen zusammensetzen.

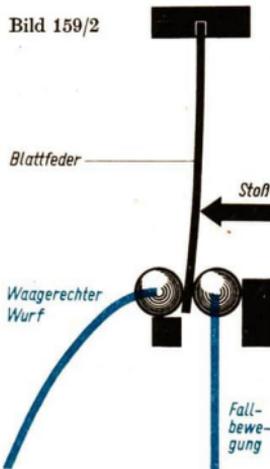
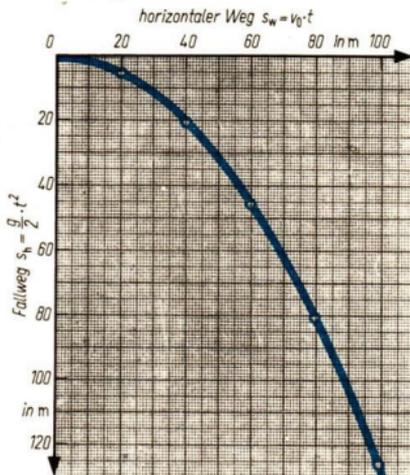


Bild 159/2

Bild 159/3



**Bild 159/2** Der waagerechte Wurf und der freie Fall wurden durch einen Wurfapparat zur gleichen Zeit ausgelöst. Beide Kugeln schlagen gleichzeitig auf dem Boden auf

**Bild 159/3** Es wurde die Wurfbahn eines Körpers ermittelt, der mit einer Geschwindigkeit  $v_0 = 20$  m/s in waagerechter Richtung geworfen wurde. In jeder Sekunde wird in horizontaler Richtung ein Weg von 20 m zurückgelegt (geradlinig gleichförmige Bewegung), während die Fallstrecke mit dem Quadrat der Fallzeit wächst (freier Fall). Die Bahn eines waagrecht geworfenen Körpers ist eine Parabel

## Beispiel

- Um zu untersuchen, mit welcher Anfangsgeschwindigkeit ein Fußball nach dem Stoß fortfliegt, wurde dieser von einer Plattform, die erhöht liegt ( $s_h = 2,5 \text{ m}$ ), waagrecht weggeschossen. Der Ball flog  $14 \text{ m}$  weit.

Gegeben:

$$s_h = 2,5 \text{ m}$$

$$s_w = 14 \text{ m}$$

$$g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Gesucht:

$$v_0 \left( \text{in } \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

Lösung:

$$s_w = v_0 \cdot t$$

$$v_0 = \frac{s_w}{t}$$

$$v_0 = \frac{14 \text{ m}}{0,7 \text{ s}}$$

$$v_0 = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_0 = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Nebenrechnung:

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

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

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot s_h}{g}}$$

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^2}{10 \text{ m}}}$$

$$t \approx 0,7 \text{ s}$$

Die Anfangsgeschwindigkeit des Fußballs beträgt etwa  $72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .

## 2.2. Der lotrechte Wurf

Auch der lotrechte Wurf ist eine zusammengesetzte Bewegung aus einer geradlinig gleichförmigen Bewegung und einer Fallbewegung. Der Unterschied zum waagerechten Wurf besteht darin, daß beim lotrechten Wurf beide Bewegungen auf derselben Bahn erfolgen.

Beim **lotrechten Wurf nach unten** stimmen die Geschwindigkeiten in der Richtung überein: Es addieren sich die Wege bzw. die Geschwindigkeiten der geradlinig gleichförmigen Bewegung und der Fallbewegung zum resultierenden Wege beziehungsweise zu der resultierenden Geschwindigkeit.

Beim **lotrechten Wurf nach oben** sind die Geschwindigkeiten entgegengesetzt gerichtet. Der resultierende Weg beziehungsweise die resultierende Geschwindigkeit ist die Differenz der Teilwege bzw. der Teilgeschwindigkeiten.

Größe	gleichförmige Bewegung	Fallbewegung	lotrechter Wurf	
			nach unten	nach oben
Geschwindigkeit	$v_0$	$g \cdot t$	$v_0 + g \cdot t$	$v_0 - g \cdot t$
Weg	$v_0 \cdot t$	$\frac{g}{2} \cdot t^2$	$v_0 \cdot t + \frac{g}{2} \cdot t^2$	$v_0 \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2$

Die resultierende Geschwindigkeit des Körpers nimmt mit zunehmender Höhe ständig ab. An der höchsten Stelle, nach der Steigzeit  $t_h$ , ist sie Null. Es ist dann:

$$v_0 - g \cdot t_h = 0 \quad \text{oder} \quad v_0 = g \cdot t_h.$$

Daraus ergibt sich die Steigzeit  $t_h$ , wenn die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  des geworfenen Körpers bekannt ist, zu:

$$t_h = \frac{v_0}{g}$$

Nach Ablauf der Steigzeit hat der Körper den höchsten Punkt seiner Bahn erreicht. Daher läßt sich durch Einsetzen der Steigzeit in die Gleichung für den Weg beim Wurf nach oben die Steighöhe  $s_h$  berechnen:

$$\begin{aligned} s_h &= v_0 \cdot t_h - \frac{g}{2} \cdot t_h^2 \\ &= v_0 \cdot \frac{v_0}{g} - \frac{g}{2} \cdot \frac{v_0^2}{g^2} \\ &= \frac{v_0^2}{g} - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_0^2}{g} = \frac{v_0^2}{2g} \end{aligned}$$

$$s_h = \frac{v_0^2}{2g}$$



Bild 161/1

### Beispiel

- Bei einer mechanischen Handramme wird durch die Kraft des gezündeten Kraftstoff-Luft-Gemisches die Ramme bei jedem Arbeitsgang etwa 30 cm nach oben geschleudert (Bild 161/1). Wieviel Rammstöße kann der Steinsetzer mit dieser Ramme in einer Minute erreichen?

Gegeben:

Steighöhe  $s_h = 0,3 \text{ m}$

Fallbeschleunigung  $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Gesucht:

Anzahl der Arbeitsgänge je Minute

Lösung:

$$t = t_h + t'$$

$$t_h = \frac{v_0}{g}$$

$$t' = \sqrt{\frac{2 \cdot s_h}{g}}$$

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot s_h \cdot g}, \quad \text{somit ist} \quad t_h = \frac{\sqrt{2 \cdot s_h \cdot g}}{g}$$

$$t_h = \sqrt{\frac{2 \cdot s_h}{g}} = t'$$

$t$ : Zeit für einen Arbeitsgang

$t_h$ : Steigzeit

$t'$ : Fallzeit der Ramme

Bei einem Wurf nach oben sind die Steigzeit und die Fallzeit gleich!

$$t_h = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^2}{10 \text{ m}}}$$

$$t_h \approx 0,25 \text{ s}$$

$$t \approx 0,5 \text{ s}$$

Mit dieser Ramme werden in einer Minute höchstens 120 Arbeitsgänge erzielt.

### 2.3. Der schräge Wurf

Bei einem schrägen Wurf wird der Körper unter einem beliebigen Winkel  $\alpha$  zur Waagerechten geworfen. Auch hier erhält man, ähnlich wie bei dem waagerechten Wurf, den resultierenden Weg aus den beiden Teilwegen (Bild 162/1). Die beiden Teilwege ergeben sich aus der unter dem Winkel  $\alpha$  erfolgenden geradlinig gleichförmigen Bewegung und aus der Fallbewegung. Die Bahn eines schräg geworfenen Körpers ist wie die eines waagrecht geworfenen Körpers eine Parabel.

Untersucht man mittels eines Wasserstrahls die Wurfweite und die Steighöhe in Abhängigkeit vom Steigungswinkel, so kommt man zu folgendem Ergebnis (Bild 162/2):

1. Die Wurfweite und die Steighöhe sind von der Anfangsgeschwindigkeit und von dem Steigungswinkel abhängig.
2. Die größte Wurfweite wird bei dem Steigungswinkel  $\alpha = 45^\circ$  erreicht.
3. Bei Steigungswinkeln, die sich zu  $90^\circ$  ergänzen ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 90^\circ$ ), erhält man gleiche Wurfweiten.

Alle betrachteten Bewegungsgesetze für Würfe gelten nur dann genau, wenn keine zusätzliche Kraft den Bewegungszustand des Wurfkörpers beeinflusst. Bei großen Geschwindigkeiten kann zum Beispiel der Luftwiderstand nicht mehr vernachlässigt werden. Dadurch ergeben sich beim waagerechten und schrägen Wurf Abweichungen der Bahnkurve von der Wurfparabel (Bild 162/3). Diese den Luftwiderstand berücksichtigenden Bahnkurven werden **ballistische Kurven** genannt.

Die Lehre von den Geschosßbahnen, die **Ballistik**, ist für die Waffentechnik sehr wichtig.

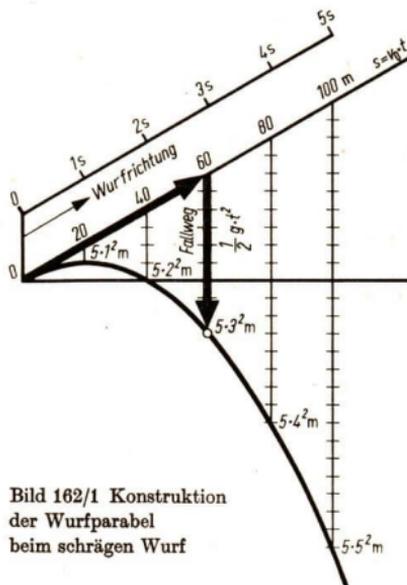


Bild 162/1 Konstruktion der Wurfparabel beim schrägen Wurf

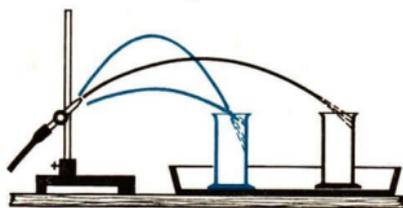


Bild 162/2 Abhängigkeit der Wurfweite vom Steigungswinkel

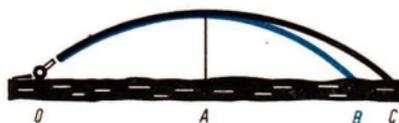


Bild 162/3 Die Geschosßbahn ist durch den Einfluß des Luftwiderstandes etwas verkürzt. Der Geschosßkörper gelangt nicht nach C, sondern nach B

## Fragen und Aufgaben

- 1. Vergleichen Sie den lotrechten Wurf nach oben mit dem anschließend erfolgenden freien Fall zum Ausgangspunkt!
- 2. Bei einem Ausbruch eines Vulkans wurden Steine 2 km hoch geschleudert. Mit welcher Geschwindigkeit kamen sie aus dem Krater? (Der Luftwiderstand ist zu vernachlässigen.)
- \*3. In welcher Zeit hat sich die Geschwindigkeit eines nach oben geworfenen Körpers auf die Hälfte verringert, wenn der Wurf mit einer Anfangsgeschwindigkeit von  $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  erfolgte ( $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ )? (Der Luftwiderstand ist zu vernachlässigen.)
- 4. Der Treibstoffsatz einer Rakete brennt 2 s und verleiht dieser (bei waagrechtem Flug) eine Beschleunigung, die doppelt so groß ist wie die Fallbeschleunigung. Bis zu welcher Höhe steigt die Rakete bei senkrechtem Start ( $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ )? (Der Luftwiderstand ist zu vernachlässigen.)

## Versuch

- V** 1. Bestimmen Sie die Anfangsgeschwindigkeit bei einer Spielzeugfederpistole beziehungsweise bei einem selbstgebauten Schleuderapparat! (Hinweis: Zur Bestimmung von  $v$  wird ein lotrechter Wurf nach oben ausgeführt!)

## ZUSAMMENFASSUNG

**Teilbewegungen eines Körpers können zu einer Gesamtbewegung zusammengesetzt werden.**

Wie lautet der Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen?

**Der waagerechte, der lotrechte und der schräge Wurf sind zusammengesetzte Bewegungen.**

Aus welchen Teilbewegungen sind diese Wurfarten zusammengesetzt?

## Die Newtonschen Grundgesetze der Mechanik



Im Jahre 1687 erschien das Werk „Die mathematischen Prinzipien der Naturwissenschaft“ von dem englischen Physiker ISAAC NEWTON. Dieses Buch enthält die wissenschaftlichen Grundlagen der Mechanik.

Am 4. Oktober 1957 umkreiste der erste künstliche Satellit die Erde. Viele Gesetze der Mechanik mußten für den Flug beachtet werden. Wie kommt es, daß sich ein Satellit ohne Antriebskraft ständig auf seiner Bahn bewegt? Warum stürzt er nicht auf die Erde zurück?



### 1. Der Trägheitssatz

#### Erstes Newtonsches Prinzip

Bei den behandelten mechanischen Bewegungen (der geradlinig gleichförmigen Bewegung, der gleichmäßig beschleunigten Bewegung) wurde auf die Ursachen, die zu einer Änderung des Bewegungszustandes führen, bisher nur hingewiesen. Es wurde festgestellt, daß stets eine Kraft Ursache der Änderung des Bewegungszustandes ist. Der Zusammenhang zwischen der Kraft und der mechanischen Bewegung soll im folgenden untersucht werden.

Es ist oftmals gar nicht einfach, den Bewegungszustand eines Körpers zu verändern. Das weiß zum Beispiel ein Torwart, der bestrebt sein muß, Schüsse in sein Tor zu verhindern. Mit Hilfe seiner Muskelkraft ist er in der Lage, den Ball zu „halten“ (d. h. physikalisch, den Ball aus dem Zustand der Bewegung in den Zustand der Ruhe zu versetzen) oder ihn „abzulenken“ (d. h. physikalisch, die Bewegungsrichtung des Balles zu ändern).

Ein Schlittschuhläufer auf einer Eisbahn zum Beispiel behält seinen Bewegungszustand nach dem letzten Abstoßen länger bei als ein Rollschuhläufer auf einer Betonbahn. (Vorausgesetzt ist dabei, daß die Anfangsgeschwindigkeit beim Auslaufen bei beiden den gleichen Betrag hat.) Die Reibungskraft zwischen Schlittschuh und Eis ist kleiner als die der Rollschuhe auf Beton.

Beide Läufer führen eine verzögerte Bewegung aus. Könnte man die Reibungskraft weiter verringern, würden die Läufer ihren Bewegungszustand länger beibehalten.

Wenn es möglich wäre, alle den Bewegungszustand ändernden Kräfte auszuschalten (z. B. Reibungskraft, Luftwiderstand), würde ein Körper im Zustand der geradlinig gleichförmigen Bewegung verharren.

Diese Überlegungen sind ein weiteres Beispiel für das in der Physik häufig angewendete Verfahren von bestimmten Erscheinungen abzusehen (zu abstrahieren), um zu Aussagen über die gesetzmäßigen Zusammenhänge zu kommen.

Nach der Untersuchung von mechanischen Bewegungen mit sehr geringer Reibungskraft hat ISAAC NEWTON seine Überlegungen in dem **Trägheitssatz** zusammengefaßt. Dieser wird auch als das **1. Newtonsche Prinzip** bezeichnet.

**Jeder Körper verharrt im Zustand der relativen Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, solange nicht durch einwirkende Kräfte sein Bewegungszustand geändert wird.**

Diese Eigenschaft eines Körpers wird **Trägheit** genannt (Bild 165/1). Bereits GALILEI hat die Trägheit als Eigenschaft von Körpern erkannt.

Der Trägheitssatz kann auch folgendermaßen formuliert werden:

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

#### Beispiel

- Ein Auto, das auf einer Autobahn fährt, die geradlinig und völlig waagrecht ist, befindet sich im Zustand der geradlinig gleichförmigen Bewegung, wenn alle Kräfte (die Motorkraft, die Reibungskraft, der Luftwiderstand, das Gewicht und die Gegenkraft zum Gewicht) im Gleichgewicht sind.
- *Welchen Einfluß hat zum Beispiel der Luftwiderstand auf den Bewegungszustand des Autos?*

Man kann die Aussagen des Trägheitssatzes auch umkehren:

**Wirkt eine Kraft auf einen frei beweglichen Körper ein, so ändert dieser seinen Bewegungszustand.**

Die folgende Übersicht gibt Möglichkeiten an, den Bewegungszustand eines Körpers durch die Einwirkung einer Kraft zu verändern:

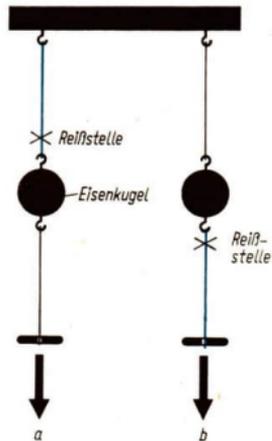


Bild 165/1 Nachweis der Trägheit eines Körpers  
a) Die Zugkraft wird langsam vergrößert,  
b) die Zugkraft wirkt durch ruckartiges Reißen sehr schnell.  
Warum zerreißt jeweils der farbig eingezeichnete Faden?

Körper befindet sich in	Geschwindigkeit	Durch Krafterwirkung kommt der Körper in	Geschwindigkeit
relativer Ruhe	$v = 0$	ungleichförmige Bewegung	Betrag wird größer
geradlinig gleichförmiger Bewegung	$v = \text{const}$	ungleichförmige Bewegung	Betrag wird größer oder Betrag wird kleiner oder (bzw. und) Richtung ändert sich

## 2. Die Reibung

Nach dem Trägheitssatz verharrt ein Körper in seinem Bewegungszustand, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt.

Fährt auf einer ebenen, geradlinigen Straße ein Kraftwagen, so wird das Fahrzeug im Freilauf, also ohne Motorkraft, bald zum Stehen kommen. Es ändert seinen Bewegungszustand. Auf eine Kraft, den Luftwiderstand, wurde bereits hingewiesen. Jedoch auch bei Rückenwind, durch den die Wirkung des Luftwiderstandes aufgehoben werden kann, entsteht eine verzögerte Bewegung des Fahrzeugs. Die Ursache ist die **Reibungskraft  $F_R$** .<sup>1</sup>

*Reibung* tritt immer auf, wenn sich zwei Körper berühren und sich dabei relativ zueinander bewegen. Sie ist in der Hauptsache auf Unebenheiten an den Berührungsflächen der festen Körper und auf Adhäsionswirkungen (Kraftwirkungen zwischen den Molekülen der berührenden Schichten) zurückzuführen.

Bei Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen tritt auch eine *innere Reibung* auf. Sie erklärt sich aus der Bewegung der einzelnen Teilchen.

**Zwischen den berührenden Flächen zweier sich zueinander bewegender Körper treten Reibungskräfte auf.**

Man unterscheidet verschiedene Reibungsarten: die *Haftreibung*, die *Gleitreibung* und die *Rollreibung*.

**Haftreibung** tritt auf, wenn ein Körper aus dem Zustand der Ruhe in Bewegung versetzt werden soll. Die Reibungskraft  $F_R$  kann mit Versuchsanordnungen nach Bild 167/1 bestimmt werden. Die Messung ergibt für die größte, für die mittlere und für die kleinste Fläche des Quaders gleiche Werte.

**Die Reibungskraft ist von der Größe der Fläche unabhängig.**

<sup>1</sup> Die Reibungskraft ist eine vektorielle Größe (vgl. Kraft S. 117). Im folgenden ist — wenn nicht ausdrücklich vom Betrag oder von der Richtung der Kraft gesprochen wird — stets der Betrag gemeint

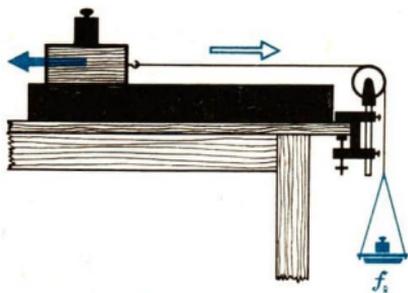
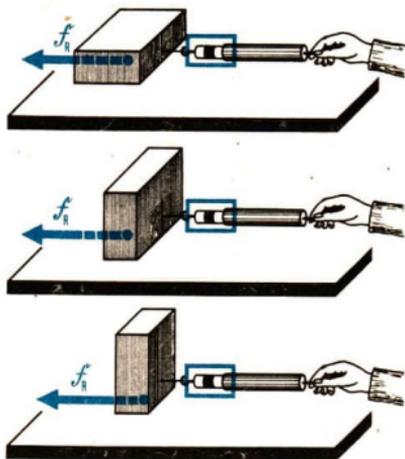


Bild 167/1 Bestimmung der Reibungskraft. Es wird bei verschiedener Lage des Quaders die Kraft gemessen, die der Zugkraft das Gleichgewicht hält, wenn der Quader gerade noch in Ruhe bleibt



**Gleitreibung:** Die bei der Bewegung auftretende Gleitreibung ist geringer als die Haftreibung. Das ist etwa dadurch zu erklären, daß sich in Ruhe zueinander befindende Flächen inniger berühren als sich gegeneinander bewegende Flächen.

**Haft- und Gleitreibungszahl:** Durch Versuche mit verschiedenartigen Körpern kann nachgewiesen werden, daß die Reibungskraft vom Stoff und von der Beschaffenheit der Oberflächen der Körper abhängt. Ein weiterer Versuch zeigt, daß sie abhängig ist von der Kraft, die senkrecht auf die Berührungsfläche wirkt (*Normalkraft*). Die Reibungskraft ist der Normalkraft  $F_N$  proportional:

$$F_R \sim F_N \quad \text{oder} \quad F_R = \mu \cdot F_N \quad \text{bzw.} \quad F_R = \mu_0 \cdot F_N.$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\mu$  (sprich mü!) ist vom Stoff und von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig;  $\mu$  wird allgemein **Reibungszahl** oder auch *Reibungskoeffizient* genannt ( $\mu$  für Gleitreibung,  $\mu_0$  für Haftreibung).

Die Reibungskraft ist gleich dem Produkt aus Reibungszahl und Normalkraft

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

$$F_R = \mu_0 \cdot F_N$$

### Beispiel

- Wie groß ist der Betrag der Kraft, die aufgebracht werden muß, wenn eine Holzkiste, die ein Gewicht von 50 kp hat, auf einem Steinboden verschoben werden soll?

Gegeben:

$$G = F_N = 50 \text{ kp}$$

$$\mu_0 = 0,7$$

Gesucht:

$$F_R \text{ (in kp)}$$

Lösung:

$$F_R = \mu_0 \cdot F_N$$

$$F_R = 0,7 \cdot 50 \text{ kp}$$

$$\underline{\underline{F_R = 35 \text{ kp}}}$$

Der Betrag der aufzubringenden Kraft beträgt 35 kp.

Tabelle 6: Haft- und Gleitreibungszahlen

Werkstoffe	Haftreibungszahl $\mu_0$	Gleitreibungszahl $\mu$
Bremsbelag auf Stahl	—	0,5
Holz auf Stein	0,7	0,3
Metall auf Holz	0,6	0,4
Lederriemen auf Metallguß	0,6	0,3
Holz auf Holz	0,6	0,3
Stahl auf Bronze	0,18	0,16
Stahl auf Stahl	0,16	0,15
Stahl auf Eis	0,027	0,014

- Nennen Sie auf Grund Ihrer Erfahrungen aus dem UTP Beispiele für Haft- und Gleitreibung! Wodurch wird in manchen Fällen (z.B. Lager) die Gleitreibung vermindert, wodurch wird in manchen Fällen (z.B. Riementrieb) die Haftreibung erhöht?

**Rollreibung:** Noch wesentlich geringer als die Gleitreibung ist die Rollreibung. Sie ist hauptsächlich auf elastische Verformung des rollenden Körpers bzw. der Unterlage zurückzuführen (Bild 168/1).

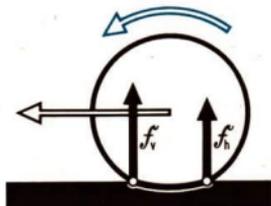


Bild 168/1 Bei der Rollreibung treten durch elastische Verformungen des abrollenden Rades und der Unterlage zwei Kräfte auf. Durch die innere Reibung ist  $f_h$  größer als  $f_v$ .

- Nennen Sie Beispiele für die Rollreibung!

Die Reibung ist in vielen Fällen unerwünscht, weil zur Überwindung der Reibungskraft zusätzliche Kraft notwendig ist. Man versucht daher, die Reibungskraft zu verringern.

- Welche Maßnahmen werden zur Verminderung der Reibungskraft durchgeführt?

Die Reibung ist aber auch nützlich und notwendig.

- Geben Sie Beispiele dafür an! Welche Maßnahmen müssen bei Glatteisbildung durchgeführt werden?

### 3. Der Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung

Als Folgerung des 1. Newtonschen Prinzips erhält man den Satz:

**Ein Körper ändert seinen Bewegungszustand, wenn die auf ihn einwirkenden Kräfte einander nicht aufheben.**

#### Beispiel

- Bild 169/1 zeigt das Einwirken verschiedener Kräfte auf ein Schiff. Da die resultierende Kraft in Richtung der Vortriebskraft wirkt, kommt es zu einer beschleunigten Bewegung des Schiffes, zum Anfahren.

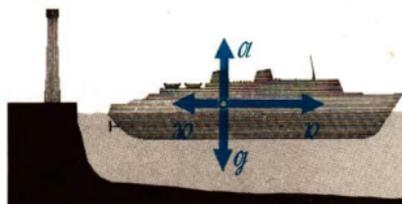


Bild 169/1 Schiff beim Anfahren. Es wirken Gewicht  $G$ , Auftrieb  $\mathcal{A}$ , Vortrieb  $\mathcal{B}$  und Strömungswiderstand  $\mathcal{W}$

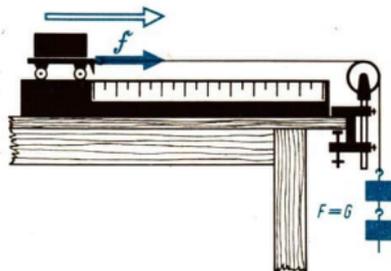


Bild 169/2 Versuchsanordnung zur Untersuchung der Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft

Durch einen Versuch nach Bild 169/2 kann man den Zusammenhang zwischen der auf einen Körper einwirkenden Kraft und seiner Beschleunigung untersuchen.

#### Abhängigkeit der Beschleunigung von der Kraft bei konstanter Masse

Kraft $F$	Masse $m$	Zeit $t$	Meßstrecke $s$	Beschleunigung $a = \frac{2s}{t^2}$	$\frac{a}{F}$
in p	in g	in s	in cm	in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	in $\frac{\text{cm}}{\text{p} \cdot \text{s}^2}$
10	900	2	21,5	10,8	1,08
20	900	2	44,0	22,0	1,10
30	900	2	64,0	32,0	1,07
40	900	2	88,5	44,3	1,11

Als Ergebnis der Versuchsreihen stellt man fest:

**Bei konstanter Masse ist die Beschleunigung der einwirkenden Kraft proportional.**  
 $a \sim F$ .

#### 4. Die Masse

Legt man auf das Wägelchen bei dem Versuch nach Bild 169/2 einen Holzklotz, dessen Masse kleiner ist, so stellt man fest, daß die Beschleunigung größer wird.

##### *Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse bei konstanter Kraft*

Kraft $F$ in p	Masse $m$ in g	Zeit $t$ in s	Meßstrecke $s$ in cm	Beschleunigung $a$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	$m \cdot a$ in $\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$
10	600	2	32,5	16,2	9720
10	700	2	27,5	13,8	9660
10	800	2	24,5	12,2	9760
10	900	2	21,5	10,8	9720

Die Beschleunigung hängt also nicht nur von der am Wagen angreifenden Kraft  $F$  ab, sondern auch von der Masse  $m$ .

Durch die physikalische Größe Masse werden zwei Eigenschaften der Körper charakterisiert:

##### *1. Alle Körper sind schwer.*

Alle Körper haben ein Gewicht. Dieses ist auf die Eigenschaft der Masse, schwer zu sein („schwere Masse“), zurückzuführen. Ein Körper von der Masse 1 kg wirkt in unseren Breitengraden mit einer Kraft von nahezu 1 kp auf seine Unterlage. Ein Körper von der Masse 1 kg, der sich etwa 40000 km über der Erde befindet, hat dort ein Gewicht von  $\frac{1}{50}$  kp. Ein Körper von der Masse 2 kg hat (am gleichen Ort) ein doppelt so großes Gewicht wie ein Körper von der Masse 1 kg. Masse und Gewicht sind am gleichen Ort proportional, es gilt  $m \sim G$ .

##### *2. Alle Körper sind träge.*

Die Änderung des Bewegungszustandes wird durch eine Kraft verursacht. Die dadurch auftretende Beschleunigung ist abhängig von der Masse („träge Masse“). Der beschriebene Versuch zeigt:

**Bei konstanter Kraft ist die Beschleunigung der Masse umgekehrt proportional.**

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

Um Massen miteinander vergleichen zu können, hat man den *Internationalen Kilogrammprototyp* geschaffen. Es ist ein Platin-Iridium-Zylinder (Bild 171/1).

Die Einheit der Masse ist das Kilogramm!

## 5. Das Grundgesetz der Mechanik

### Zweites Newtonsches Prinzip

Die bisherigen Erkenntnisse  $a \sim F$  und  $a \sim \frac{1}{m}$  kann man folgendermaßen zusammenfassen:

$$a \sim \frac{F}{m} \quad \text{oder} \quad F \sim m \cdot a.$$

*Die Kraft ist dem Produkt aus Masse und Beschleunigung proportional.*

Auf Grund dieser Beziehung, die den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen den wichtigsten mechanischen Größen angibt, wurde die Kraft wie folgt definiert:

**Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung**

$$F = m \cdot a$$

Der in dieser Gleichung ausgedrückte Sachverhalt wird auch das 2. Newtonsche Prinzip beziehungsweise das **Grundgesetz der Mechanik** genannt.

Die *Krafteinheit* ist wie die Beschleunigungseinheit eine abgeleitete Einheit. Sie ergibt sich, wenn man die Einheiten für die Masse (kg) und die Beschleunigung

$\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$  in die Gleichung  $F = m \cdot a$  einsetzt, zu

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

Diese Krafteinheit wurde zu Ehren NEWTONS 1 Newton (N) genannt.

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

### Beispiel

- Hat ein Körper die Masse 1 kg und wird ihm die Beschleunigung  $\frac{1 \text{ m}}{\text{s}^2}$  erteilt, so beträgt die bewegende Kraft 1 N.

*Eine Kraft hat den Betrag 1 Newton, wenn sie einem Körper mit der Masse 1 kg die Beschleunigung  $\frac{1 \text{ m}}{\text{s}^2}$  erteilt.*

Bild 171/1 Das Bild zeigt den Kilogrammprototyp im Deutschen Amt für Meßwesen und Warenprüfung (DAMW) in Berlin



Auf der Erdoberfläche wird einem Körper durch die Anziehungskraft der Erde nicht die Beschleunigung von  $\frac{1 \text{ m}}{\text{s}^2}$ , sondern die etwa 9,81mal so große Fallbeschleunigung  $g$  erteilt. Daraus ergibt sich die Beziehung zwischen der Krafteinheit 1 *Newton* und der Krafteinheit 1 *Kilopond*:

$$F = m \cdot g$$

$$1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ N}.$$

Der genaue, gesetzlich festgelegte Umrechnungswert ist:  
 $1 \text{ kp} = 9,806 65 \text{ N}$

### Beispiel

- Ein Motorrad erreicht aus dem Stand in 12 s die Geschwindigkeit von  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Die Gesamtmasse mit Fahrer beträgt 180 kg. Wie groß ist der Betrag der Antriebskraft? (Die Reibung bleibt unberücksichtigt.)

Gegeben:

$$v = 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{60 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}$$

$$t = 12 \text{ s}$$

$$m = 180 \text{ kg}$$

Gesucht:

$F$  (in N)

Lösung:

$$F = m \cdot a$$

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

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

$$F = \frac{180 \text{ kg} \cdot 60 \text{ m}}{12 \text{ s} \cdot 3,6 \text{ s}}$$

$$F = 250 \text{ N}$$

Der Betrag der Antriebskraft beträgt 250 N.

## 6. Die dynamische Kraftmessung

Bei der *statischen Kraftmessung* wird die verformende Wirkung einer Kraft ausgenutzt. Ein Beispiel dafür ist die Schraubenfeder und ihre Anwendung als Federwaage. Auf Grund der Definitionsgleichung  $F = m \cdot a$  kann die Kraft mittels der Änderung des Bewegungszustandes bestimmt werden. Diese Art der Kraftmessung bezeichnet man als **dynamische Kraftmessung**.

- Durch welche physikalische Größe wird die Änderung des Bewegungszustandes ausgedrückt?

### Beispiel

- Das Gewicht eines Körpers, der die Masse 5 kg hat, beträgt

$$5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 49,05 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 49,05 \text{ N}.$$

$$49,05 \text{ N in Kilopond umgerechnet ergeben: } \frac{49,05}{9,81} = 5; \text{ daraus folgt } 49,05 \text{ N} = 5 \text{ kp}.$$

Aus dem obigen Beispiel ersieht man, daß die Maßzahlen der Kraft und der Masse eines Körpers bei den Einheiten kp und kg unter Normalbedingungen (45. Breitengrad, Meereshöhe) übereinstimmen. Man muß jedoch immer beachten, daß es sich um völlig verschiedene physikalische Größen handelt. Das Kilogramm ist die Einheit für die Masse. Man darf also niemals, wie das früher geschah, für das Gewicht oder andere Kräfte die Einheit kg benutzen.

**Grundeinheiten und abgeleitete Einheiten:** Durch eine Verordnung wurden 1958 für die Deutsche Demokratische Republik die physikalisch-technischen Einheiten gesetzlich festgelegt. Die für die Mechanik wichtigen **Grundeinheiten** sind:

Grundgröße	Grundeinheit	Kurzzeichen
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Masse	Kilogramm	kg

Das Meter ist als Abstand zweier Striche auf dem Internationalen Meterprototyp festgelegt.

Das Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.

Alle anderen Einheiten der Mechanik sind aus diesen drei Grundeinheiten abgeleitet:

Tabelle 7: Abgeleitete mechanische Einheiten

Größe	abgeleitete Einheit	Kurzzeichen	Beziehung der Einheit zu den Grundeinheiten
Geschwindigkeit	Meter/Sekunde	m/s	$1 \text{ m/s} = 1 \text{ m s}^{-1}$
Beschleunigung	Meter/Quadratsekunde	m/s <sup>2</sup>	$1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ m s}^{-2}$
Kraft	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ m kg s}^{-2}$
			$1 \text{ kp} = 9,806 65 \text{ N}$

## 7. Das Gegenwirkungsprinzip

### Drittes Newtonsches Prinzip

Eine Kraft wirkt niemals auf einen Körper allein, sondern nur zwischen zwei Körpern. Bei jeder Kraftwirkung tritt deshalb eine gleich große Gegenkraft auf. Die Körper wirken stets wechselseitig aufeinander. Übt zum Beispiel der eine Körper auf einen anderen Körper die Kraft  $F_1$  aus, so wirkt umgekehrt dieser Körper mit einer Kraft  $F_2$  auf den ersten Körper. Die auftretenden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  haben gleiche Beträge, sind aber entgegengesetzt gerichtet.

## Beispiele

- Von einem Boot aus, das auf einem Teich schwimmt, versucht ein Ruderer einen schwimmenden Baumstamm wegzustoßen. Dabei stellt er fest, daß sich der Baumstamm in Richtung der einwirkenden Kraft fortbewegt, gleichzeitig gerät aber auch das Boot, in welchem er sich befindet, in Bewegung, jedoch in entgegengesetzter Richtung.  
Ähnliche, wechselseitige Wirkungen treten beim Anziehen eines Stahlkörpers durch einen Magneten auf. Der Stahlkörper zieht den Magneten mit einer gleich großen Kraft an wie der Magnet den Stahlkörper.

Zu jeder Wirkung besteht immer eine Gegenwirkung, die durch eine Gegenkraft zur einwirkenden Kraft hervorgerufen wird. Die Wirkung kann jedoch manchmal nicht unmittelbar beobachtet werden (Bild 174/1). Im Bild a sind die Wirkungen der



Bild 174/1 a) Beim Durchbrennen des Fadens erfolgt eine Krafteinwirkung auf beide Wagen. Sie legen gleiche Wege zurück, wenn  $m_1 = m_2$  ist

b) Die Kraftwirkung erfolgt auf Wagen und Wand. Die Wirkung auf die Wand kann nicht unmittelbar beobachtet werden

beiden, paarweise auftretenden Kräfte deutlich zu erkennen. Im Bild b ist die Kraftwirkung auf die Wand meist nur mit besonderen Hilfsmitteln zu erkennen. Newton faßte diese Zusammenhänge in dem 3. Newtonschen Prinzip zusammen:

Zu jeder Kraft gehört eine gleich große Gegenkraft.

## Beispiele

- Stützt man sich auf einen Tisch, so tritt durch die elastische Verformung eine Gegenkraft auf. Wird ein Geschoß abgefeuert, so wirken die Pulvergase auch gegen den Verschluß und drücken das bewegliche Rohr nach hinten. Eine wichtige Anwendung findet das Gegenwirkungsprinzip bei den Raketen- und Strahltriebwerken (Bild 175/1).
- Für welche Forschung ist die Entwicklung von Raketentriebwerken von ganz besonderer Bedeutung? Führen Sie Gründe an!

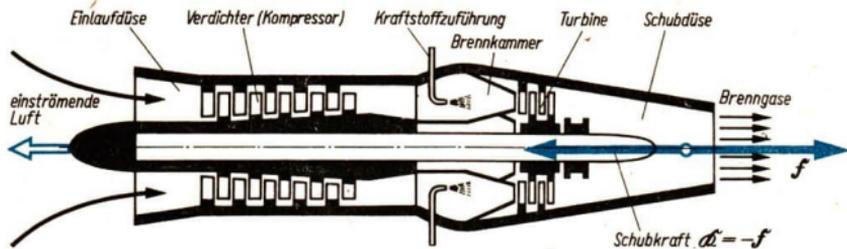


Bild 175/1 Funktion eines Strahltriebwerks. In das Triebwerk strömt vorn Luft ein und wird verdichtet, bevor sie in die Brennkammern gelangt. Die Verbrennungsgase treiben die Verdichtungsturbine an und strömen dann mit großer Geschwindigkeit durch die Schubdüse ins Freie. Die Gegenkraft wirkt auf die Rakete und beschleunigt sie. Bei Strahltriebwerken moderner Flugzeuge werden 7000 kp und mehr als Schubkraft erreicht. Wozu dient die Luft, und warum wird sie verdichtet?

### Fragen und Aufgaben

1. Was verstehen Sie unter der Trägheit eines Körpers, und unter welchen Umständen äußert sie sich?
2. Nennen Sie ein Beispiel, bei dem durch Trägheitswirkungen ein Unfall entstehen kann! Welche Lehre sollte man daraus für das Verhalten im Straßenverkehr ziehen?
3. Welche Reibungskräfte ermöglichen, welche hemmen die Fahrt eines Motorrads?
4. Welche Bedeutung hat die Herabsetzung der Reibung bei den Maschinen? Wie wird sie verwirklicht?
5. Auf welche Weise kann man die Massen verschiedener Körper miteinander vergleichen?
6. Auf einen Körper wirkt eine Kraft ein, die seinen Bewegungszustand ändert. Von welchen Größen ist dieser Vorgang abhängig?
7. Nach welchem Prinzip funktioniert ein Raketenantrieb?
8. Erklären Sie den Unterschied zwischen Masse und Gewicht!
9. Das Gewicht eines Eisenbahnwagens beträgt 10 Mp, während das der Ladung 17,5 Mp beträgt. Bestimmen Sie die notwendige Zugkraft in kp, wenn die Reibungszahl  $\mu = 0,002$  ist!
10. Mit welcher Kraft muß das Holzbrett nach Bild 175/2, das 3,5 kp wiegt, an die Wand gedrückt werden, wenn es nicht herabgleiten soll? Die Reibungszahl ist 0,3.
11. Geben Sie Ihr Körpergewicht in Newton an!
12. Die Anziehungskraft des Mondes auf der Mondoberfläche beträgt gegenüber der Erdanziehungskraft auf der Erdoberfläche nur ein Sechstel. Welches Gewicht hat ein Mensch, dessen Masse 60 kg beträgt, auf dem Mond?
13. Durch welche Kraft wird ein S-Bahn-Zug mit der Masse 288 t beschleunigt, wenn er in 10 s eine Geschwindigkeit von  $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  erreicht? (Reibungskraft und Luftwiderstand werden vernachlässigt!)
14. Welche Kraft wirkt auf die Bremsbacken eines Motor-

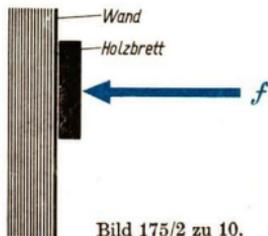


Bild 175/2 zu 10.

rades, wenn die Gesamtmasse 195 kg beträgt und mit einer negativen Beschleunigung von  $5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  gebremst wird? (Angaben der Kraft in kp und in N!) Auf welche Weise wird diese große Kraft beim Bremsen aufgebracht?

- Ein Radfahrer fährt auf einer ebenen, geradlinigen Straße. Berechnen Sie die Reibungskraft  $F_R$ , durch deren Wirkung das Fahrrad bei einer Geschwindigkeit von  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nach 6 s zum Stehen kommt! Wie groß ist die Reibungszahl? (Rechnen Sie mit dem Näherungswert  $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ !).
- Warum können Propellerflugzeuge in großen Höhen nicht mehr fliegen? Erklären Sie, warum für Raumschiffe diese Beschränkung nicht gilt!

## Versuche

- V** 1. Wie werden ein Hammer, eine Axt oder eine Hacke am Stiel befestigt? Welche Eigenschaft der Körper nutzt man dabei aus?
2. Das Bild 176/1 zeigt einen weiteren Versuch zum Nachweis der Trägheit der Körper. Auf das überstehende Ende des Brettchens muß ein schneller Schlag mit einem Holzstab geführt werden. Das Brettchen zerbricht, ohne daß das Papier beschädigt wird. Führen Sie diesen Versuch selbst aus und geben Sie eine Erklärung!
3. Nehmen Sie einen kleinen Wagen und befestigen Sie darauf einen aufgeblasenen Luftballon, in den ein Röhrchen ragt! Was geschieht, wenn die Luft aus dem Röhrchen an der Ballonöffnung entweichen kann? Geben Sie eine Erklärung für verschiedene Röhrenstellungen!

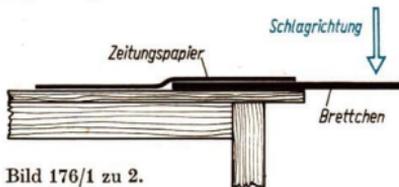


Bild 176/1 zu 2.

## ZUSAMMENFASSUNG

**Jeder Körper ist träge. Er ändert seinen Bewegungszustand nur dann, wenn eine Kraft auf ihn einwirkt.**

Wann beharrt ein Körper im Zustand der (relativen) Ruhe?

**Bewegungsvorgänge werden durch Reibungskräfte gehemmt.**

Welche Reibungskräfte kennen Sie?

**Die Einheit der Masse ist das Kilogramm.**

Nennen Sie andere Grundeinheiten der Mechanik!

**Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung.**

Was verstehen Sie unter Gewicht?

**Zu jeder Kraft gehört eine Gegenkraft.**

Vergleichen Sie Kraft und Gegenkraft hinsichtlich ihres Betrages und ihrer Richtung!

**Die Einheit der Kraft ist das Newton.**

Nennen Sie weitere Einheiten für die Kraft!

## Die Kreisbewegung

Kurven von Eisenbahnstrecken, Radrennbahnen, Straßen, Rodelbahnen müssen überhöht sein, wenn die Fahrzeuge sie mit hoher Geschwindigkeit durchfahren sollen. Warum sind solche Überhöhungen notwendig?

Jeder wird schon festgestellt haben, daß man bei einer Richtungsänderung eines Fahrzeugs je nach dessen Geschwindigkeit mehr oder weniger nach außen gedrückt wird. Bei einer geradlinig gleichförmigen Bewegung ist das nicht zu beobachten.

Wie ist die genannte Feststellung bei einer krummlinigen Bewegung zu erklären?

Bei jeder krummlinigen Bewegung ändert die Geschwindigkeit ständig ihre Richtung. Die Ursache ist eine Kraft, die eine Beschleunigung in Richtung der Kraft hervorruft. Ein Spezialfall der krummlinigen Bewegung ist die **Kreisbewegung**.

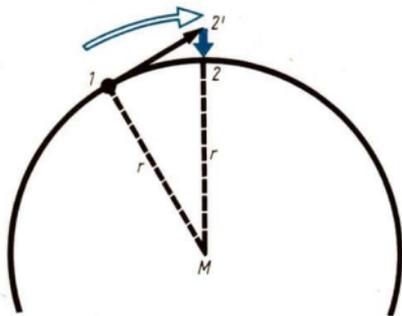
- Überlegen Sie an Hand des Bildes 177/2, wie die Kraft gerichtet sein muß, damit sich der Körper ständig auf einer Kreisbahn bewegt und nicht geradlinig (in Richtung der Tangente) weiterfliegt!

Bild 177/2 Ohne Krafteinwirkung würde sich der Körper nach 2' bewegen. Um nach 2 zu gelangen, muß sich ständig die Bewegungsrichtung ändern. (Damit wird der Abstand  $r$  vom Mittelpunkt eingehalten)

### 1. Die gleichförmige Kreisbewegung

Ändert sich bei einer Kreisbewegung der Betrag der Geschwindigkeit nicht, so spricht man von einer **gleichförmigen Kreisbewegung**.

**Ein Körper bewegt sich gleichförmig auf einer Kreisbahn, wenn er in gleichen Zeiten gleiche Wege durchläuft.**



Da sich bei der gleichförmigen Kreisbewegung ständig die Richtung der Geschwindigkeit ändert, ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung. Sie wird aber gleichförmige Kreisbewegung genannt, weil der Betrag der Geschwindigkeit konstant ist.

Bei der gleichförmigen Kreisbewegung berechnet man den Betrag der Bahngeschwindigkeit wie den Betrag der Geschwindigkeit einer geradlinig gleichförmigen Bewegung. Bewegt sich der Körper in der Zeit  $t$  auf einer Kreisbahn von A nach B (Bild 178/1), so gilt für den Betrag der Bahngeschwindigkeit

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

Einfacher ergibt sich der Betrag der Bahngeschwindigkeit aus einem vollen Umlauf des Körpers. Die dafür benötigte Zeit heißt Umlaufzeit  $T$ . Der bei einem Umlauf zurückgelegte Weg ist gleich dem Umfang des Kreises mit dem Radius  $r$ ; es ist  $s = 2 \cdot \pi \cdot r$ . Somit ist der Betrag der Bahngeschwindigkeit einer gleichförmigen Kreisbewegung:

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

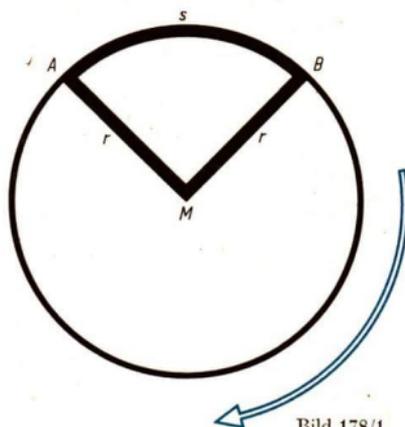


Bild 178/1

Der reziproke Wert der Umlaufzeit  $T$  heißt Umlaufzahl  $n$ . Sie ist der Quotient aus der Anzahl der Umläufe und der Zeit.

Setzt man die Umlaufzahl  $n$  in die oben genannte Gleichung für  $\frac{1}{T}$  ein, so erhält man:

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

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$$

### Beispiel

- Am 14. 6. 1963 wurde das Raumschiff „Wostok 5“ gestartet. An Bord befand sich der sowjetische Oberleutnant Bykowski, der nach 81 Erdumkreisungen am 19. 6. 1963 wieder sicher landete. Der Radius der Kreisbahn von Wostok 5 betrug etwa 6575 km. Eine Erdumkreisung dauerte etwa 88 min und 16 s. Wie groß war der Betrag der Geschwindigkeit, mit der Oberleutnant Bykowski kreiste (Bild 178/2)?

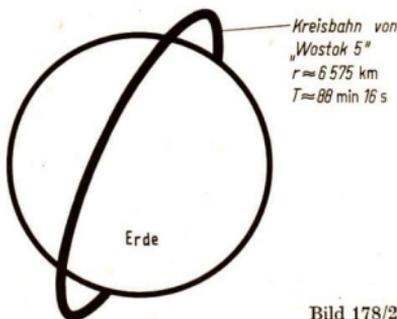


Bild 178/2

Gegeben:

$$r = 6575 \text{ km}$$

$$T = 88 \text{ min } 16 \text{ s} = 5296 \text{ s}$$

Gesucht:

$$v \left( \text{in } \frac{\text{km}}{\text{s}} \right)$$

Lösung:

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

$$v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6575 \text{ km}}{5296 \text{ s}}$$

$$v \approx \underline{\underline{7,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}}}$$

Der Betrag der Bahngeschwindigkeit von „Wostok 5“ betrug annähernd  $7,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .

Die Bewegung eines festen Körpers um eine Achse heißt *Drehbewegung*. Zum Beispiel vollführen das Schwungrad einer Maschine, desgleichen die Zahnräder, das Spannfutter und die Wellen der Maschine Drehbewegungen. Der Quotient aus der Anzahl der Umdrehungen eines Körpers und der dazu benötigten Zeit wird **Drehzahl**  $n$  genannt.

## 2. Kräfte bei der gleichförmigen Kreisbewegung

Für die Untersuchung der Kräfte bei der gleichförmigen Kreisbewegung ist das Bezugssystem (vgl. S. 140) zu beachten. Es sind folgende Fälle zu unterscheiden:

1. Die gleichförmige Kreisbewegung vollzieht sich gegenüber einem als in Ruhe angesehenen Beobachter, man spricht auch von einem ruhenden Bezugssystem.
2. Der Beobachter und sein Bezugssystem nehmen an der Kreisbewegung teil, man spricht auch vom mitbewegten Bezugssystem. In diesem System ist der Körper in Ruhe.

### 2.1. Zentripetalkraft

Es sollen zunächst die Verhältnisse bei der gleichförmigen Kreisbewegung gegenüber einem ruhenden Bezugssystem betrachtet werden.

Bei der gleichförmigen Kreisbewegung ändert sich ständig die Richtung der Geschwindigkeit. Diese Geschwindigkeitsänderung wird auch bei der Kreisbewegung als Beschleunigung bezeichnet. Sie heißt **Zentripetalbeschleunigung** (auch Zentralbeschleunigung), da sie auf das Zentrum, den Mittelpunkt der Kreisbahn, gerichtet ist. Sie wird verursacht durch eine Kraft, die man entsprechend **Zentripetalkraft** (auch Zentralkraft) nennt (Bild 179/1).

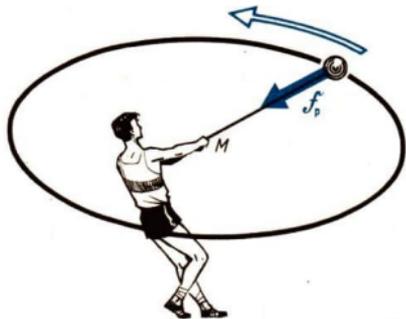


Bild 179/1 Durch die Zentripetalkraft  $\vec{f}_p$  wird die Kugel auf der Kreisbahn gehalten. Wie würde sie sich bewegen, wenn  $\vec{f}_p$  nicht mehr angreift, zum Beispiel beim Zerreißen des Drahtseils?

Ohne die Zentripetalkraft  $\mathfrak{F}_p$  würde der Stein im Zeitabschnitt  $t$  die Strecke  $\overline{AB}$  durchfliegen (Bild 180/1). Ist  $v$  der Betrag seiner Bahngeschwindigkeit, so gilt  $\overline{AB} = v \cdot t$ . Unter der Einwirkung der Zentripetalkraft allein würde der Körper eine beschleunigte Bewegung von A nach D vollführen. Die Zentripetalkraft  $\mathfrak{F}_p$  ist jedoch ständig nach dem Zentrum M gerichtet, sie ändert somit dauernd ihre Richtung. Dadurch beschreibt der Körper eine Kreisbahn. Will man die Länge der Strecke  $\overline{AD}$  berechnen, so muß man ein sehr kleines Stück  $\widehat{AC}$  der Kreisbahn herausgreifen, das heißt, man muß den Zeitabschnitt  $t$  sehr klein wählen. In diesem Falle ist der Unterschied zwischen der Länge des Kreisbogens  $\widehat{AC}$  und der Länge der Sehne  $\overline{AC}$  bzw. der Länge der Strecke  $\overline{AB}$  verschwindend klein, so daß man  $\overline{AB} = \overline{AC}$  setzen darf.

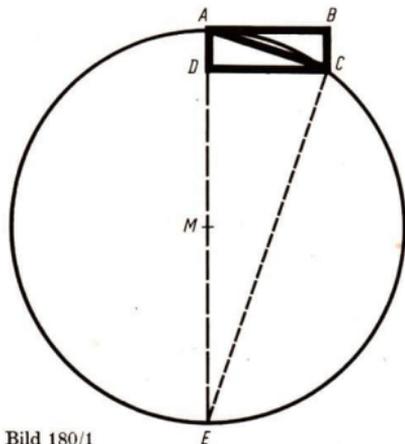


Bild 180/1

Nach dem Kathetensatz gilt im rechtwinkligen Dreieck ACE:

$$\overline{AC}^2 = \overline{AD} \cdot \overline{AE} \quad \text{oder} \quad \overline{AD} = \frac{\overline{AC}^2}{\overline{AE}} = \frac{\overline{AB}^2}{\overline{AE}}$$

Die Strecke  $\overline{AE}$  entspricht dem doppelten Radius der Kreisbahn. Außerdem gilt wie oben bereits gezeigt wurde

$$\overline{AB} = v \cdot t.$$

Berücksichtigt man dies, so erhält man

$$\overline{AD} = \frac{(v \cdot t)^2}{2 \cdot r} \quad \text{oder anders geschrieben}$$

$$\overline{AD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot t^2.$$

Ein Vergleich der Gleichung

$$\overline{AD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot t^2$$

mit dem Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

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

zeigt, daß  $\frac{v^2}{r}$  der Betrag der Beschleunigung der gleichförmigen Kreisbewegung ist.

Für den Betrag  $a_p$  der *Zentripetalbeschleunigung* gilt somit

$$a_p = \frac{v^2}{r}$$

Nach dem 2. Newtonschen Prinzip folgt daraus für den Betrag  $F_p$  der *Zentripetalkraft*

$$F_p = m \cdot a_p \quad \text{oder} \quad F_p = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

<p>Die Zentripetalkraft ist die bei einer gleichförmigen Kreisbewegung zum Mittelpunkt des Kreises gerichtete Kraft.</p>	$F_p = m \cdot \frac{v^2}{r}$	$a_p = \frac{v^2}{r}$
--	-------------------------------	-----------------------

### 1. Beispiel

- Welche Geschwindigkeit muß ein Körper haben, damit er die Erde in Erdnähe umkreisen kann? (Vom Luftwiderstand ist abzusehen. Der mittlere Erdradius beträgt 6370 km.)

Gegeben:

$$r = 6370000 \text{ m}$$

Gesucht:

$$v \left( \text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

Lösung:

Die Zentripetalkraft ist gleich dem Gewicht des Körpers:

$$F_p = G$$

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

$$v^2 = r \cdot g$$

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

$$v = \sqrt{6370000 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$v \approx 7900 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Nebenrechnung:

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

$$G = m \cdot g$$

Der Körper muß mit einer Geschwindigkeit von  $7,9 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  fliegen, wenn er nicht auf die Erde zurückfallen soll.

- Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Bahngeschwindigkeit von „Wostok 5“ (s. S. 179)! Erläutern Sie die geringe Abweichung!

## 2. Beispiel

- Ein Körper von der Masse 5 kg ist an einer 1,2 m langen Schnur befestigt und führt in einer waagrecht liegenden Ebene eine gleichförmige Kreisbewegung aus. Wie groß ist die Kraft, durch die der Körper mittels der Schnur auf der Kreisbahn gehalten wird, wenn er 60 Umläufe in der Minute ausführt?

Gegeben:

$$m = 5 \text{ kg}$$

$$r = 1,2 \text{ m}$$

$$n = 60 \frac{\text{U}}{\text{min}} = 1 \frac{\text{U}}{\text{s}}$$

Gesucht:

$$F_p \text{ (in kp)}$$

Lösung:

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

$$F_p = 5 \text{ kg} \cdot \frac{7,5^2 \text{ m}^2}{1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^2}$$

$$F_p \approx 234 \text{ N}$$

$$\underline{\underline{F_p \approx 27 \text{ kp}}}$$

Nebenrechnung:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$$

$$v = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot \frac{1}{\text{s}}$$

$$v = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Zentripetalkraft beträgt annähernd 27 kp.

### 2.2. Zentrifugalkraft

Was ergibt sich nun für einen Beobachter, der die Bewegung des Körpers auf der Kreisbahn mitmacht?

Er kann eine Kraft feststellen, die nicht nach dem Mittelpunkt des Kreises gerichtet ist, sondern die vom Mittelpunkt wegzeigt. Als Fahrer auf einem Kettenkarussell zum Beispiel hat man deutlich das Gefühl, nach außen gezogen zu werden.

In diesem mitrotierenden Bezugssystem ist der Körper in Ruhe. Er muß aber durch eine Kraft festgehalten werden, damit er seine Kreisbahn nicht nach außen verläßt. Die Trägheitswirkung zeigt sich in diesem mitrotierenden Bezugssystem als Kraft, die den Körper vom Mittelpunkt fortzieht. Man nennt diese Kraft **Zentrifugalkraft** oder **Fliehkraft**.

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

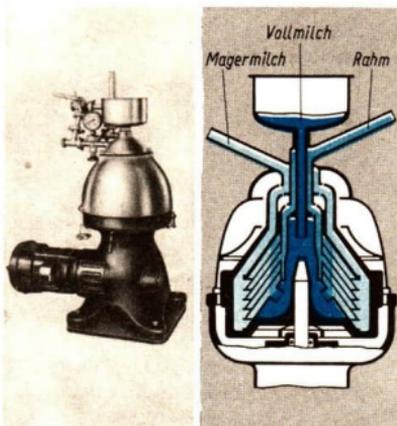
Die im mitrotierenden System auftretende Zentrifugalkraft entspricht der Trägheitswirkung, die im ruhenden System von der zum Mittelpunkt des Kreises gerichteten Kraft überwunden werden muß. Deshalb sind bei der gleichförmigen Kreisbewegung die Beträge der Zentripetalkraft  $F_p$  und der Zentrifugalkraft  $F_f$  einander gleich, ihre Richtungen einander entgegengesetzt.

$F_f = m \cdot \frac{v^2}{r}$	$a_f = \frac{v^2}{r}$
-------------------------------	-----------------------

### 3. Ausnutzung von Zentrifugalkräften

#### Zentrifugen

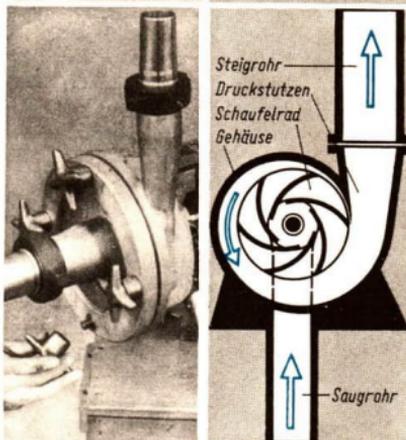
Zum Trennen von Flüssigkeiten verschiedener Dichte und zum Reinigen oder Trocknen einiger Stoffe werden Zentrifugen eingesetzt. So wird zum Beispiel der Honig aus den Waben herausgeschleudert. Zuckerkristalle werden vom Sirup getrennt. Durch Milchzentrifugen wird der Milch die Sahne entzogen (Bild). Nasse Wäsche, gesponnene Textilfasern, Erze werden in Zentrifugen trockengeschleudert. Warum sammelt sich die Magermilch in der Trommel außen an?



#### Kreiselpumpen

Eine weitere technische Anwendung ist die Zentrifugalpumpe oder Kreiselpumpe. Das Schaufelrad versetzt die Flüssigkeit in Umdrehung. Infolge der Fliehkraft wird diese Flüssigkeit nach außen getrieben, während in der Mitte des Gehäuses ein Unterdruck entsteht.

Auch die Überhöhung von Kurven moderner Straßen oder von Eisenbahnstrecken ist durch das Auftreten von Fliehkraften begründet.

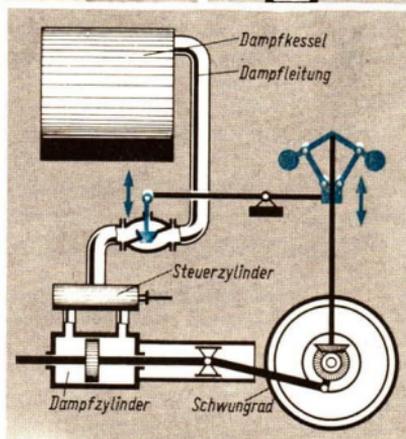


#### Zentrifugalregler

Zur Steuerung und Regelung in der Industrie ist der Zentrifugalregler von großer Bedeutung.

Beschreiben Sie die Wirkungsweise der Drehzahlregelung an der Dampfmaschine nach dem nebenstehenden Bild!

Regeleinrichtungen spielen bei der Automatisierung der Produktion eine entscheidende Rolle. Ihre Weiterentwicklung ist eine wichtige Aufgabe, da durch die Automatisierung große Möglichkeiten zur Steigerung der Arbeitsproduktivität geboten werden.



## Fragen und Aufgaben

1. Durch welche Größen werden gleichförmige Kreisbewegungen gekennzeichnet?
2. Welche Ähnlichkeiten und welche Unterschiede bestehen zwischen der gleichförmig geradlinigen Bewegung und der gleichförmigen Kreisbewegung?
3. Welche Bedeutung hat die Zentripetalkraft? Welche Wirkungen werden durch Zentrifugalkräfte verursacht?
4. Nennen Sie Beispiele für technische Anwendungen der Zentrifugalkraft!
- \*5. Ein Personenkraftwagen „Wartburg“ mit der Gesamtmasse 1100 kg durchfährt eine nicht überhöhte Kurve mit einer Geschwindigkeit von  $90 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .
  - a) Wie groß ist die Zentrifugalbeschleunigung, wenn der Krümmungsradius der Kurve 550 m beträgt?
  - b) Wie groß ist die Zentrifugalkraft (in kp)?
  - c) Wie groß muß die Reibungszahl (Wagenräder auf Straßenbelag) mindestens sein, damit das Schleudern des Wagens in der Kurve vermieden wird?
6. Auf einer Moto-Cross-Strecke befindet sich ein „Sprunghügel“ (Bild 184/1), dessen oberer Teil einen Krümmungshalbmesser von 4 m hat. Bei welcher Geschwindigkeit verlieren die Räder des Motorrades beim Überfahren des Hügel die Bodenhaftung?
7. Ein Turbinenrad von der Masse 15 kg macht 30000 Umdrehungen in der Minute. Durch einen Montagefehler liegt der Schwerpunkt des Turbinenrades in einer Entfernung von 0,1 mm vom Kreismittelpunkt. Wird sich diese kleine Abweichung bemerkbar machen? Berechnen Sie die auftretende Fliehkraft!
8. Berechnen Sie für „Sputnik 1“ die Zentripetalkraft unter der Annahme einer gleichförmigen Kreisbewegung ( $m = 86 \text{ kg}$ ; mittlere Entfernung vom Erdmittelpunkt:  $r = 6870 \text{ km}$ ,  $T = 96,2 \text{ min}$ )!

Bild 184/1 zu 6.

## Versuch

- V** 1. Zeigen Sie experimentell die Wirkungsweise einer Wäschetrockenschleuder! Benutzen Sie dazu zum Beispiel einen Schwamm und ein Ballnetz!

## ZUSAMMENFASSUNG

Für die gleichförmige Kreisbewegung gilt:

**In gleichen Zeiten legt ein Körper gleiche Wege auf der Kreisbahn zurück.**

Wie heißt die Gleichung für den Betrag der Bahngeschwindigkeit?

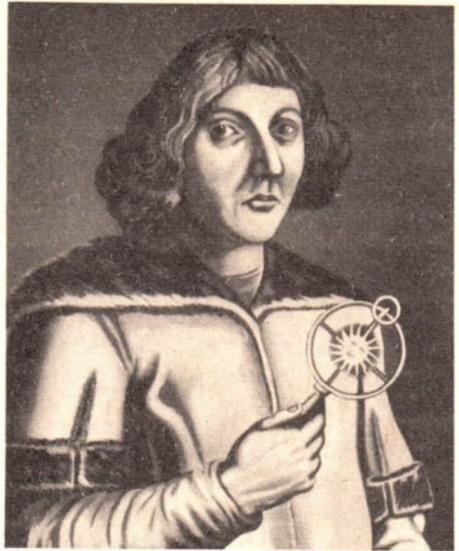
**Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung sind die Beträge der Zentripetalkraft und der Zentrifugalkraft einander gleich, ihre Richtungen sind einander entgegengesetzt.**

Wodurch erreicht man sehr große Zentrifugalkräfte?

## Die Gravitation



KOPERNIKUS und KEPLER untersuchten bereits eingehend, wie sich die Himmelskörper bewegen. Doch die physikalischen Gesetze, nach denen ihre Bewegungen erfolgen, wurden erst von NEWTON gefunden. Er erkannte, daß die Bewegung des Mondes um die Erde und die Bewegung des Apfels vom Baume zur Erde eine gemeinsame Ursache haben.



### 1. Das Weltbild des PROLEMÄUS und das Weltbild des KOPERNIKUS

Schon im Altertum hatten sich die Gelehrten mit der Bewegung der Gestirne beschäftigt. Sie erkannten, daß sich die beobachteten Bewegungen der Sonne und der Planeten von den Fixsternbewegungen unterscheiden.

Der griechische Astronom PROLEMÄUS, der ungefähr Anfang des 2. Jahrhunderts lebte, kam zu der Annahme, daß die Erde der ruhende Mittelpunkt des Weltalls sei, während sich die Sonne, der Mond und die übrigen Himmelskörper um die Erde drehen. Dieses nach ihm benannte *Ptolemäische Weltbild* ist falsch. Lange Zeit fand es keine wissenschaftliche Widerlegung. Es stimmte mit der Beobachtung der Menschen überein, außerdem war es sehr gut mit den Lehren vieler Religionen zu vereinbaren. So blieb diese falsche Vorstellung für 1400 Jahre maßgebend.

Im 15. Jahrhundert kam es zu größeren Änderungen der gesellschaftlichen Verhältnisse. Der Handel nahm in den europäischen Ländern einen großen Aufschwung. Für den Seeverkehr wurden genaue Angaben über die Stellung der Gestirne benötigt. Das Interesse für astronomische Fragen nahm ständig zu. Unter diesen Bedingungen entstand als Ergebnis das *Weltbild des Kopernikus*. Danach steht die Erde nicht unbeweglich im „Mittelpunkt“ der Welt, sondern die Erde und die übrigen Planeten bewegen sich auf kreisförmigen Bahnen um die Sonne. Die Erde dreht sich täglich einmal um ihre Achse. Sie braucht für einen Umlauf um die Sonne etwa  $365\frac{1}{4}$  Tage. NIKOLAUS KOPERNIKUS (1473 bis 1543) wagte viele Jahre nicht, gegen die damals herrschenden Ansichten aufzutreten. Erst kurz vor seinem Tode entschloß er sich, sein Buch „Über die Bewegungen der Himmelskörper“ zu veröffentlichen. Gelehrte,

die sich mutig zu dem neuen Weltbild bekannten, wurden verfolgt. Im Jahre 1600 wurde GIORDANO BRUNO (1548 bis 1600), ein italienischer Denker, als Opfer der römischen Inquisition auf dem Scheiterhaufen verbrannt.

Auch GALILEO GALILEI vertrat die Kopernikanische Lehre. Er wurde von der Inquisition festgenommen. Unter Androhung höchster Strafen wurde der siebzigjährige große Gelehrte gezwungen, sich von seinen „Verirrungen“ öffentlich loszusagen.

## 2. Die Keplerschen Gesetze

Der berühmte dänische Astronom TYCHO BRAHE (1546 bis 1601) verfolgte auf Grund zahlreicher, äußerst genauer Messungen Jahre hindurch den Stand der Planeten am Sternenhimmel. Er konnte sich jedoch nie entschließen, die Lehre des Kopernikus anzuerkennen, sondern versuchte immer wieder, sie zu widerlegen. Sein wertvolles Beobachtungsmaterial stand dem deutschen Astronomen JOHANNES KEPLER (1571 bis 1630) zur Verfügung. KEPLER konnte dadurch nicht nur weitere Beweise für das Kopernikanische Weltbild erbringen, sondern er kam auch zu neuen Erkenntnissen. Nach sechsjähriger Rechenarbeit fand er im Jahre 1609 die ersten Gesetze der Bewegung der Planeten um die Sonne und der Satelliten um die Planeten.

### 1. Keplersches Gesetz:

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

### 2. Keplersches Gesetz:

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

- *An welcher Stelle hat der Planet seine größte Bahngeschwindigkeit?*

Bild 186/1 zum 1. Keplerschen Gesetz

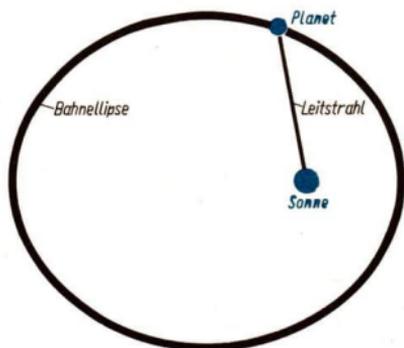
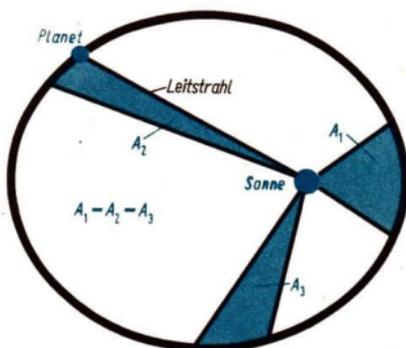


Bild 186/2 zum 2. Keplerschen Gesetz



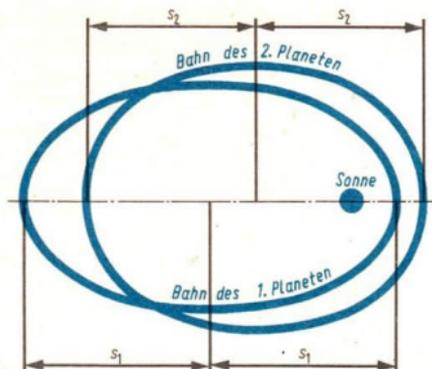


Bild 187/2 Sind die Halbachsen  $s$  größer, so sind auch die Umlaufzeiten  $T$  größer. Es gilt:  $s^3 \sim T^2$

Erst zehn Jahre später konnte KEPLER auch sein drittes Gesetz exakt formulieren:

### 3. Keplersches Gesetz:

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

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{s_1^3}{s_2^3} \quad \text{somit gilt:} \quad \frac{s^3}{T^2} = \text{const}$$

Bedenkt man, daß die meisten Planetenbahnen von der Kreisbahn nur sehr wenig abweichen, so werden einem KEPLERS Leistungen erst richtig verständlich. Wird zum Beispiel die Ellipsenbahn der Erde um die Sonne soweit verkleinert, daß ihre große Achse 7,2 m beträgt, so ist die kleine Achse nur 1 mm kleiner!

### 3. Die Gravitationskraft

NEWTON suchte nach den tieferliegenden Ursachen, aus denen die drei Keplerschen Gesetze folgen. Er wies nach, daß zwischen allen Körpern auf der Erdoberfläche und der Erde eine Kraft wirkt und daß ebenso zwischen Erde und Mond eine Anziehungskraft besteht.

- Welche Erscheinung auf der Erde rührt von der Anziehungskraft zwischen Erde und Mond her?

Die Anziehungskraft zwischen der Erde und anderen Körpern heißt *Schwerkraft*. Sie wurde vor NEWTON als konstante Kraft angesehen. NEWTON erkannte aber, daß sich die Schwerkraft mit dem Abstand des Körpers von der Erde ändert.

Auch zwischen anderen Himmelskörpern bestehen Anziehungskräfte, ebenso zwischen den Molekülen eines Gases.

Die allgemein zwischen Körpern wirkende Anziehungskraft heißt **Gravitationskraft**. Die Schwerkraft der Erde kann als spezieller Fall der Gravitationskraft angesehen werden.

Allgemein ist festzustellen:

**Alle Körper ziehen sich gegenseitig an.**

**Die zwischen den Körpern wirkende Anziehungskraft heißt Gravitationskraft.**

Die gegenseitige Anziehung der Körper ist eine allgemeine physikalische Gesetzmäßigkeit der Materie. Sie besteht zu allen Zeiten und an jedem Orte.

NEWTON erkannte, daß die Gravitationskraft einen um die Sonne oder um die Erde kreisenden Körper auf seiner Bahn hält. Die Gravitationskraft hat also für die gleichförmige Kreisbewegung eines Himmelskörpers die Bedeutung einer Zentripetalkraft (s. S. 179). NEWTON konnte das am Beispiel des Mondes, der sich nahezu kreisförmig um die Erde bewegt, nachweisen.

### NEWTONS Mondrechnung

Die Zentripetalkraft der gleichförmigen Kreisbewegung hat den Betrag  $F_p = m \cdot a_p = m \cdot \frac{v^2}{r}$ .

Der Radius  $r$  ist hierbei die Entfernung vom Erdmittelpunkt bis zum Mittelpunkt des Mondes. Den Betrag der Bahngeschwindigkeit  $v$  errechnete NEWTON aus der Umlaufzeit  $T$  des Mondes zu  $v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$ . Es ergibt sich somit für den Betrag der Gravitationskraft

$$F = m \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot r)^2}{T^2 \cdot r} = m \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r}{T^2} = m \cdot a.$$

Der Betrag der Zentripetalbeschleunigung  $a$  des Mondes ist somit:

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

Für  $r = 384 \cdot 10^6 \text{ m} = 60,3 R$  ( $R$  ist der mittlere Erdradius) und  $T = 27,32 \text{ Tage} = 2,36 \cdot 10^6 \text{ s}$  ergibt die Rechnung:

$$a = 0,0027 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

als Betrag der Beschleunigung des Mondes. Für NEWTON war aber nunmehr die entscheidende Frage: In welcher Beziehung steht der berechnete Betrag der Beschleunigung des Mondes zu seiner Entfernung vom Erdmittelpunkt?

Er verglich dazu den Betrag der Beschleunigung eines Körpers unmittelbar auf der Erde (Entfernung vom Erdmittelpunkt:  $R$ ) mit dem Betrag der Beschleunigung  $a$  des Mondes (Entfernung  $r = 60,3 R$ ) und fand, daß sich die Beträge der Beschleunigungen umgekehrt wie die Quadrate der Abstände verhalten:

$$\frac{0,0027}{9,81} = \frac{1}{60,3^2}, \quad \text{d. h. } \frac{a}{g} = \frac{R^2}{r^2}.$$

*Ergebnis:* Der Mond ist rund sechzigmal soweit vom Erdmittelpunkt entfernt wie ein Körper auf der Erdoberfläche. Der Betrag der Beschleunigung des Mondes beträgt rund den 60<sup>2</sup>-ten Teil des Betrages der Beschleunigung eines Körpers auf der Erdoberfläche. NEWTON zeigte, daß diese Gesetzmäßigkeit kein Einzelfall ist, sondern auch für die Planetenbahnen um die Sonne gilt. Es gilt

$$a_1 : a_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2} \quad \text{oder } a \sim \frac{1}{r^2}.$$

Der Betrag der Beschleunigung eines Körpers ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung der Körper voneinander. Somit gilt auch für die Gravitationskraft, welche die Beschleunigung der Körper verursacht, folgender Satz:

Die Gravitationskraft zwischen zwei sich anziehenden Körpern ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung der Körper voneinander.	$F_1 : F_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}$	$F \sim \frac{1}{r^2}$
--	---	------------------------

### Beispiel

■ Wie groß ist die Gravitationskraft zwischen der Erde und einem Körper mit der Masse 1 kg, der sich

- a) auf der Erdoberfläche ( $g$  soll  $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  betragen),  
 b) 40000 km über der Erdoberfläche befindet?

a) <i>Gegeben:</i>	<i>Lösung:</i>	b) <i>Gegeben:</i>	<i>Lösung:</i>
$m = 1 \text{ kg}$	$F_1 = m \cdot g$	$F_1 = 9,81 \text{ N}$	$F_1 : F_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}$
$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$F_1 = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$r_1 = R = 6370 \text{ km}$	$F_2 = \frac{F_1 \cdot r_1^2}{r_2^2}$
		$r_2 = 46370 \text{ km}$	
<i>Gesucht:</i>	$F_1 = 9,81 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$	<i>Gesucht:</i>	$F_2 = \frac{9,81 \text{ N} \cdot 6370^2 \text{ km}^2}{46370^2 \text{ km}^2}$
$F_1$ (in N)	<u><math>F_1 = 9,81 \text{ N}</math></u>	$F_2$ (in N)	<u><math>F_2 \approx 0,19 \text{ N}</math></u>

Die Gravitationskraft zwischen der Erde und einem Körper der Masse 1 kg beträgt

- a) auf der Erdoberfläche 9,81 N,  
 b) 40000 km über der Erdoberfläche annähernd 0,19 N.

(Vergleichen Sie mit dem Wert in Tabelle 5, Seite 152!)

#### 4. Das Newtonsche Gravitationsgesetz

Die folgenden stark vereinfachten Darlegungen sollen zeigen, welche Zusammenhänge zum Gravitationsgesetz führen. Die Erde zieht den Mond an. Die dabei wirkende Kraft ist nicht nur von der Entfernung des Mondes von der Erde, sondern auch von der Masse des Mondes abhängig. Wie durch Untersuchungen festgestellt wurde, ist die wirkende Kraft der Masse des Mondes proportional:  $F \sim m_1$ . Aber auch der Mond zieht die Erde an (3. Newtonsches Prinzip). Die dabei wirkende Kraft ist proportional der Masse der Erde.  $F \sim m_2$  (Bild 190/1).

Auch bei der gegenseitigen Anziehung anderer Körper hängt die Gravitationskraft von der Entfernung und der Masse beider Körper ab.

Die Gesetzmäßigkeiten über die Gravitationskraft, die zwischen zwei Körpern von der Masse  $m_1$  und der Masse  $m_2$  wirkt,

$$F \sim \frac{1}{r^2}, \quad F \sim m_1, \quad F \sim m_2$$

lassen sich wie folgt zusammenfassen:

$$F \sim \frac{1}{r^2} \cdot m_1 \cdot m_2 \quad \text{oder} \quad F \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Durch Einsetzen eines Proportionalitätsfaktors  $k$  ergibt sich das Newtonsche Gravitationsgesetz:



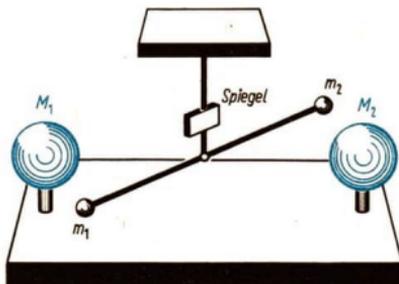
Bild 190/1 Die zwischen Erde und Mond wirkende Gravitationskraft ist der Masse der Erde und der Masse des Mondes proportional und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung

<p>Zwei Körper ziehen sich gegenseitig mit einer Kraft an, die dem Produkt ihrer Massen direkt und dem Quadrat ihrer Entfernungen umgekehrt proportional ist.</p>	$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
---	---

Der Proportionalitätsfaktor  $k$  heißt Gravitationskonstante und wurde 1798 erstmalig experimentell bestimmt (Bild 190/2).

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

Bild 190/2 1798 gelang CAVENDISH (1731 bis 1810) mittels einer Drehwaage die Bestimmung der Gravitationskraft zwischen zwei irdischen Körpern. Die beiden kleinen Bleikugeln befinden sich an einem leichten Stab, der drehbar an einem Faden aufgehängt ist. Nähert man die beiden großen Bleikugeln in geeigneter Weise, so wird die gegenseitige Anziehung so groß, daß sie mittels eines Lichtzeigers meßbar gemacht werden kann



## Beispiel

Wie groß ist die Masse der Erde?

Das Gewicht eines Körpers mit der Masse  $m$  kann auf zwei Arten bestimmt werden. Nach dem Grundgesetz der Mechanik ist es  $m \cdot g$ , auf Grund des Gravitationsgesetzes erhält man  $k \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}$ , wobei  $M$  und  $R$  die Masse beziehungsweise der Radius der Erde bedeuten.

Also gilt:

$$m \cdot g = \frac{k \cdot m \cdot M}{R^2} \quad \text{oder} \quad M = \frac{R^2 \cdot g}{k}$$

Bekannt sind:

$$R = 6370 \text{ km}; \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}; \quad k = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N m}^2}{\text{kg}^2}$$

Die Rechnung ergibt  $M = \underline{\underline{5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}}}$ .

Die Masse der Erde beträgt  $5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ .

## 5. Die Eroberung des Weltalls durch den Menschen

Der Start des ersten Sputniks erfolgte am 4. Oktober 1957. Sowjetische Menschen zeigten der Welt, was Physiker, Astronomen, Chemiker, Raketenforscher und Elektronikspezialisten durch kollektive Zusammenarbeit in einem sozialistischen Lande leisten können. Am 12. April 1961 wurde durch die UdSSR der erste Flug eines Menschen in einem künstlichen Erdsatelliten verwirklicht.

Damit ein Raumschiff als künstlicher Satellit um die Erde kreist, müssen mindestens zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. Der Körper muß auf seiner Umlaufbahn die **1. kosmische Geschwindigkeit** erreichen. Es wurde bereits auf Seite 181 gezeigt, daß sie in Erdnähe **7,9 km/s** beträgt.
2. Der Körper muß eine Umlaufbahn genügend hoch über der Erde (etwa 100 km) erreichen.

Es genügt nicht, wenn nur eine der Bedingungen erfüllt ist.

Die Umlaufbahnen künstlicher Erdsatelliten können nahezu kreisförmig sein. Sie sind aber in vielen Fällen auch langgestreckte Ellipsen.

*Erläutern Sie, warum die Keplerschen Gesetze auch für die Ellipsenbahnen der künstlichen Erdsatelliten gelten!*

Bei einer Geschwindigkeit von  $11,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  überwindet ein Körper die Erdanziehung und bewegt sich als **künstlicher Planet** um die Sonne. Diese Geschwindigkeit wird als **2. kosmische Geschwindigkeit** bezeichnet. Auch diese Geschwindigkeit wurde erreicht, als die Sowjetunion den ersten künstlichen Planeten auf seine Bahn brachte.

## Fragen und Aufgaben

1. Was verstehen Sie unter Gravitationskraft? Nennen Sie Beispiele für ihre Wirkungen!
2. Beschreiben Sie, wie man die Masse der Erde bestimmen kann!
3. Wie ändert sich die Fallbeschleunigung mit zunehmender Höhe?
4. Wie groß ist die Fallbeschleunigung  $a$  in einer Höhe von 6370 km über der Erde?
- \*5. Künstliche Satelliten gewinnen auch als Relaisstationen zur Übermittlung von Nachrichten und Fernsehsendungen bei großen Entfernungen an Bedeutung. Ein Nachrichtensatellit, der sich ständig über einem Punkt der Erdoberfläche befindet, hat große Vorteile. Die Bahn eines solchen, für einen Beobachter auf der Erde stillstehenden Satelliten liegt also, daß seine Kreisbewegung genau mit der Erdumdrehung zusammenfällt, das heißt, seine Bahn muß in der Äquatorebene der Erde liegen (Bild 192/1). Seine Umlaufzeit beträgt genau einen Tag.  
(Die Berechnung der Bahn eines solchen Satelliten ist etwas kompliziert. Sie können diese jedoch auf Grund Ihrer bisherigen Kenntnisse durchführen!) In welcher Entfernung vom Erdmittelpunkt muß der Satellit kreisen? Wie groß ist der Betrag seiner Bahngeschwindigkeit?
6. Wie groß ist die mittlere Dichte der Erde ( $M = 5,97 \cdot 10^{24}$  kg,  $R = 6370$  km)?

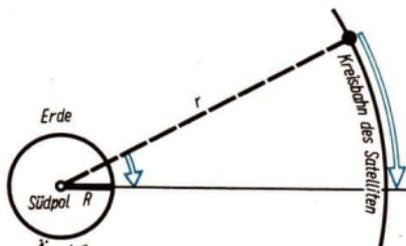


Bild 192/1 zu \*5.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Bahnen der Planeten und der Satelliten sind Ellipsen.

Nach welchen Gesetzen erfolgen ihre Bewegungen?

Alle Körper ziehen sich gegenseitig an.

Die Gravitationskraft wirkt im gesamten Weltall. Sie ist bestimmend für die Umlaufbahnen der Himmelskörper.

Wie hängt die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern von deren Entfernung ab?

## 6. ISAAC NEWTON

ISAAC NEWTON wurde 1642 in einem kleinen Dorf in Ostengland geboren. Seine Kindheit verbrachte er auf dem Gutshof seiner Eltern. Später besuchte er eine Lateinschule. Mit 18 Jahren wurde NEWTON Student an der Universität Cambridge. Da er wenig Geld hatte, bediente er gegen Bezahlung ältere Studenten und Lehrkräfte. Bereits 1669 wurde er Professor und verbrachte die nächsten Jahrzehnte fast ausschließlich in Cambridge. Durch die Fürsprache eines Freundes wurde er 1699 Direktor der Münze<sup>1</sup> in London. 1708 wurde der große englische Gelehrte Präsident der

<sup>1</sup> Münze: Münzstätte, an der Münzen geprägt wurden

berühmten Royal Society, der englischen naturforschenden Gesellschaft. Im Alter von 85 Jahren starb NEWTON im Jahre 1727.

NEWTON lebte in der Zeit des aufblühenden Kapitalismus, in der eine verstärkte wissenschaftliche Tätigkeit einsetzte. Das Zentrum der Wissenschaft lag in Westeuropa. Der Grund dafür bestand vor allem in der Tatsache, daß sich der damals fortschrittliche Kapitalismus in besonderem Maße in England, Frankreich und Holland entwickelte und die den wissenschaftlichen Fortschritt hemmende katholische Kirche in diesen Ländern nur geringen bzw. keinen Einfluß hatte. Innerhalb kurzer Zeit wurde damals das physikalische Wissen in ungeahntem Umfang erweitert. Unter den vielen bedeutenden Physikern dieser Zeit, wie BOYLE, HOOKE, HUYGENS, PAPIN usw. nimmt ISAAC NEWTON den hervorragendsten Platz ein. Bereits in der Studienzeit legte er die Grundlagen für seine wissenschaftlichen Arbeiten. Wie viele seiner Mitbürger flüchtete er beim Ausbruch der Pest auf das Land. Hier konnte er sich in voller Ruhe wissenschaftlichen Problemen

widmen. Er hat sich gleich große Verdienste auf dem Gebiet der experimentellen wie der mathematischen Physik erworben. 1687 erschien sein berühmtestes Werk „Die mathematischen Prinzipien der Naturwissenschaft“. Der Sekretär NEWTONS berichtete darüber:

„... Nach erfolgtem Druck schickte mich Sir ISAAC mit den Büchern als Geschenk zu leitenden Persönlichkeiten im College<sup>1</sup> und ... einer von ihnen sagte, man müsse sieben Jahre studieren, ehe man etwas von diesem Buch verstehe. Sir ISSAC war zu jener Zeit ständig beschäftigt, ... gestattete sich keine Erholung oder Pause, ... er hielt jede Stunde für verloren, die nicht dem Studium gewidmet war.“

In den „Prinzipien“ gelang NEWTON eine einheitliche Zusammenfassung der Mechanik. Er konnte viele mechanische Erscheinungen erklären. Besonders wichtig ist das von ihm erkannte Gesetz über die Bewegung der Himmelskörper (s. S. 190). Auch auf dem Gebiete der Optik und der Mathematik leistete er Hervorragendes.

Das von NEWTON geschaffene System der Mechanik bildete in den folgenden Jahrhunderten die Grundlage für viele physikalische Forschungen. Aber auch in der physikalischen Erkenntnis gibt es keinen Stillstand. Durch neue Erkenntnisse im 20. Jahrhundert ist seine „klassische Mechanik“ erweitert worden. Es entstanden neue Theorien, zum Beispiel die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik. NEWTONS Prinzipien sind in diesen neuen Theorien als Spezialfälle enthalten. Die Änderungen liegen in den Bereichen, in denen sich die Geschwindigkeit der Körper der Lichtgeschwindigkeit ( $c \approx 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ) nähert.



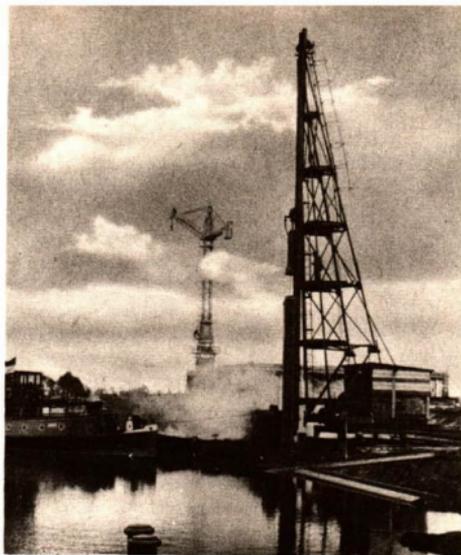
Bild 193/1 Isaac Newton

<sup>1</sup> College: Englische Hochschule

## Die mechanische Energie



Überall und immer wieder versucht der Mensch die Naturkräfte für seine Zwecke einzusetzen. Beim Bau von Städten oder auch von Hafenanlagen ist mechanische Energie in vielfältiger Form notwendig. Um einen Hafen zu befestigen, werden Rammhären eingesetzt. In den hochgehobenen Rammhären ist Arbeitsvermögen gespeichert. Wovon wird das Arbeitsvermögen abhängig sein?

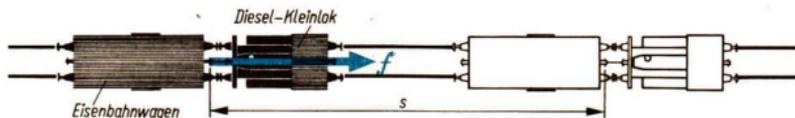


### 1. Mechanische Arbeit und Leistung

Im täglichen Leben wird für die verschiedensten Tätigkeiten das Wort Arbeit verwendet. Es gibt geistige und körperliche Arbeit, Hand- und Maschinenarbeit oder auch Lernerbeit. In der Physik spricht man dann von mechanischer Arbeit, wenn ein Körper unter der Wirkung einer Kraft längs eines Weges verschoben wird. Arbeiten, bei denen durch die Krafteinwirkung (siehe obiges Bild) eine *Verformung* eines Körpers oder eine *Beschleunigung* eines Körpers längs eines Weges bewirkt wird, sind *mechanische Arbeiten*.

Stimmt die Richtung der einwirkenden Kraft mit der Richtung des Weges überein, so ist die Arbeit einfach zu bestimmen: Nach Bild 194/2 zieht die Lokomotive mit konstanter Kraft und mit konstanter Geschwindigkeit einen Wagen. Es handelt sich hier um eine Reibungsarbeit. (Wenn die Kraft der Lokomotive größer ist als die Reibungskraft, kommt noch eine Beschleunigungsarbeit hinzu.) Die Arbeit  $W$ , die verrichtet werden muß, ist abhängig von der Länge des Weges  $s$  und von der einwirkenden Kraft  $F$ . Bei doppeltem Weg muß auch doppelt soviel Arbeit verrichtet werden:  $W \sim s$ . Stimmen die Richtung der Kraft und des Weges überein, so ist die Arbeit gleich dem Produkt aus Kraft und Weg.

Bild 194/2 Kraft und Weg haben gleiche Richtung



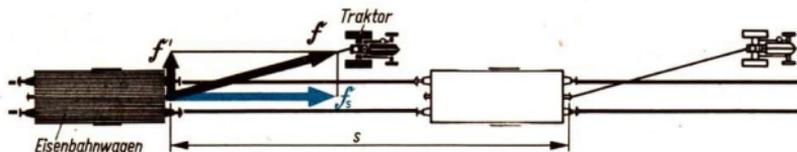


Bild 195/1 Nur die in Wegrichtung liegende Komponente der Kraft  $F_s$  ist für die Arbeit wirksam

Ein neben den Schienen fahrender Traktor muß mit einer größeren Kraft am Eisenbahnwagen ziehen, weil nur die Kraftkomponente in Gleisrichtung ausgenutzt wird (Bild 195/1). Die Arbeit ist somit gleich dem Produkt aus dem Betrag der in Wegrichtung wirkenden Kraftkomponente und dem Betrag des Weges.

Auf Grund dieser Beziehung wurde die Arbeit wie folgt bestimmt:

Die mechanische Arbeit ist gleich dem Produkt aus der in Wegrichtung wirkenden Kraftkomponente und dem Weg.

$$W = F_s \cdot s$$

Die *Einheit der Arbeit* ergibt sich als Produkt aus der Kräfteinheit und der Wegeinheit. Die Einheit der Arbeit ist das **Newtonmeter (Nm)** oder auch das **Joule (J)**. Diese Einheit der mechanischen Arbeit stimmt mit der Einheit der elektrischen Arbeit **Wattsekunde (Ws)** überein.

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$$

Eine Arbeit von 1 Nm wird verrichtet, wenn zum Beispiel eine Kraft von 1 N längs eines Weges von 1 m einwirkt.

Eine weitere Arbeitseinheit ist das Kilopondmeter (kpm):

$$1 \text{ kpm} = 1 \text{ kp} \cdot 1 \text{ m} \approx 9,81 \text{ Nm}$$

$$1 \text{ Nm} \approx \frac{1}{9,81} \text{ kpm} \approx 0,102 \text{ kpm}$$

### Beispiel

- Welche Hubarbeit wird verrichtet, wenn beim Bauen ein Betonfertigteile von 1,5 t mittels eines Kranes 10 m hochgehoben wird?

Gegeben:

$$m = 1,5 \text{ t} = 1500 \text{ kg}$$

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

$$s = 10 \text{ m}$$

Lösung:

$$W = F_h \cdot s$$

$$W = m \cdot g \cdot s$$

$$W = 1500 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m}$$

$$W \approx \underline{\underline{147000 \text{ Nm}}}$$

Gesucht:

Arbeit  $W$  (in Nm)

Die Hubarbeit beträgt 147 000 Nm.

Je geringer die Zeit ist, innerhalb der eine Arbeit durchgeführt wird, um so größer ist die Leistung. Das gilt nicht nur in der Produktion, sondern ebenso für die Leistung  $P$  in der Physik.

Die Leistung ist gleich dem Quotient aus der Arbeit und der Zeit.

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

Die *Einheit der Leistung* ergibt sich als Quotient aus der Arbeitseinheit und der Zeiteinheit. Die Einheit der Leistung ist das **Newtonmeter je Sekunde (Nm/s)**, auch **Joule je Sekunde (J/s)** genannt. Sie stimmt mit der Leistungseinheit **Watt (W)** überein.

$$1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \text{ W}$$

Weitere Leistungseinheiten:

$$1 \frac{\text{kpm}}{\text{s}} \approx 9,81 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}; \quad 1 \frac{\text{Npm}}{\text{s}} \approx 0,102 \frac{\text{kpm}}{\text{s}}; \quad 1 \text{ PS} = 75 \frac{\text{kpm}}{\text{s}} \approx 735,5 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

Da  $P = \frac{W}{t}$  ist, erhält man durch Einsetzen von  $W = F_s \cdot s$ :

$$P = \frac{F_s \cdot s}{t} = F_s \cdot \frac{s}{t} = F_s \cdot v.$$

Die Leistung ist auch als das Produkt aus der Kraft und der Geschwindigkeit bestimmt.

$$P = F_s \cdot v$$

### Beispiel

- Ein Handwagen wird in Wegrichtung mit einer Kraft von 100 N gezogen. In 10 Sekunden werden 12 Meter zurückgelegt. Wie groß ist die Leistung?

Gegeben:

$$F_s = 100 \text{ N}$$

$$s = 12 \text{ m}$$

$$t = 10 \text{ s}$$

Gesucht:

$$\text{Leistung } P \left( \text{in } \frac{\text{Nm}}{\text{s}} \right)$$

Lösung I:

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

$$W = F_s \cdot s$$

$$W = 100 \text{ N} \cdot 12 \text{ m}$$

$$W = 1200 \text{ Nm}$$

$$P = \frac{1200 \text{ Nm}}{10 \text{ s}}$$

$$P = 120 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

Lösung II:

$$P = F_s \cdot v$$

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

$$v = \frac{12 \text{ m}}{10 \text{ s}} = 1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 100 \text{ N} \cdot 1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 120 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

Die Leistung beträgt  $120 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$ .

## 2. Formen der mechanischen Energie

Damit Werkzeugmaschinen arbeiten können, müssen ihre Motoren Energie vom Elektrizitätswerk erhalten. Die Generatoren des Elektrizitätswerkes arbeiten wiederum nur dann, wenn sie ihrerseits Energie erhalten und zum Beispiel durch die Energie des gestauten Wassers einer Talsperre angetrieben werden. Umgekehrt kann man sagen: Wird an einem Körper eine Arbeit verrichtet, so erhöht sich im allgemeinen seine Energie, nämlich die Fähigkeit, selbst Arbeit zu verrichten.

- Beschreiben Sie an dem Modell einer Ramme (Bild 197/1), welche Arbeit erst verrichtet werden muß, damit der Rammbar Energie erlangt!

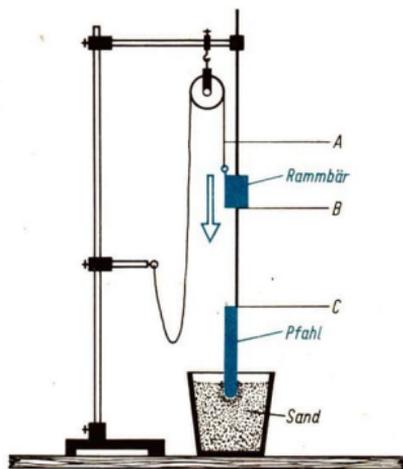


Bild 197/1 Modell einer Ramme

Die Einheiten der mechanischen Energie sind die gleichen wie die Einheiten der mechanischen Arbeit: Nm, J, Ws.

Die mechanische Energie tritt in zwei Formen auf.

### 2.1. Die potentielle Energie

Hat ein Körper auf Grund seiner Lage Energie, wie zum Beispiel der hochgehobene Rammbar oder die gespannte Uhrfeder, so spricht man von *Energie der Lage* oder *potentieller Energie*.

#### Beispiele

- Gehobener Vorschlaghammer, Wasser des Stausees, Wasser in einer Regenwolke, Springer auf dem Sprungturm, gespannte Sehne des Bogens, gedehnte Feder einer Federwaage, gespannte Feder des Luftgewehrs.

Wichtig ist hierbei das Bezugssystem. Ein Gewichtsstück wurde vom Boden des Klassenzimmers auf den Tisch (Höhe  $h$ ) gehoben. Es besitzt nun gegenüber seiner Lage auf dem Fußboden die potentielle Energie  $m \cdot g \cdot h$ . Der Fußboden ist also hier das Bezugssystem. Gegenüber der Straße besitzt das Gewichtsstück die größere potentielle Energie  $m \cdot g \cdot H$ . Hierbei ist  $H = h_{\text{Tisch}} + h_{\text{Stockwerk}}$ .

Die aufgewandte mechanische Hubarbeit ist ein Maß für die potentielle Energie des angehobenen Körpers. Zum Heben eines Körpers vom Gewicht  $G$  um die Höhe  $h$  muß die Arbeit  $W = G \cdot h$  verrichtet werden. Nach dem 2. Newtonschen Prinzip ist  $G = m \cdot g$ . Somit ist die potentielle Energie eines gehobenen Körpers

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

Wird eine Feder durch Auseinanderziehen um die Strecke  $s$  gespannt, so ist die Kraft zum Spannen der Feder um so größer, je mehr die Feder auseinandergezogen wird. Hat die Spannkraft am Ende des Spannens den Wert  $F$  erreicht, so ist für die gesamte Strecke nur eine mittlere Federkraft vom Werte  $\frac{F}{2}$  anzusetzen. Somit ist die **potentielle Energie einer Feder**

$$W_{\text{pot}} = \frac{F}{2} \cdot s$$

## 2.2. Die kinetische Energie

Die Energie, die ein Körper infolge seiner *Bewegung* hat, heißt *Bewegungsenergie* oder **kinetische Energie**.

### Beispiele

- Sputnik im Weltall, fahrendes Auto, fallender Stein, strömendes Wasser (Räder der Wassermühlen, Turbinen), fallender Hammer.

Auch hier ist das Bezugssystem von Bedeutung

- *Erklären Sie, warum auch der gegenüber der Erde in Ruhe befindliche Körper eine kinetische Energie hat!*  
*Wie äußert sich die kinetische Energie eines schnell fahrenden Kraftwagens?*

Die Erfahrung des täglichen Lebens beweist, daß die Energie eines bewegten Körpers von seiner Masse und von seiner Geschwindigkeit abhängt.

Die kinetische Energie eines Körpers mit der Geschwindigkeit  $v$  wird durch die Arbeit gemessen, die verrichtet werden muß, um ihn auf die Geschwindigkeit  $v$  zu beschleunigen. Diese Beschleunigungsarbeit  $W$  wird auf einer bestimmten Strecke  $s$  verrichtet. Somit gilt:

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot s. \text{ Setzt man } s = \frac{a}{2} \cdot t^2, \text{ so erhält man}$$

$$W = m \cdot a \cdot \frac{a}{2} \cdot t^2 = m \cdot \frac{(a \cdot t)^2}{2} \text{ oder, da } a \cdot t = v \text{ ist, } W = \frac{m \cdot v^2}{2}.$$

Die kinetische Energie eines Körpers ist gleich dem halben Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit.

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

## Beispiel

- Welche kinetische Energie hat ein Motorrad mit Fahrer von der Gesamtmasse 200 kg, wenn die Fahrgeschwindigkeit  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  beträgt?

Gegeben:

$$m = 200 \text{ kg}$$

$$v = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 27,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Gesucht:

$W_{\text{kin}}$  (in Nm)

Die kinetische Energie beträgt 77300 Nm.

Lösung:

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

$$W_{\text{kin}} \approx \frac{200 \text{ kg} \cdot 27,8^2 \text{ m}^2}{2 \cdot \text{s}^2}$$

$$\underline{\underline{W_{\text{kin}} \approx 77300 \text{ Nm}}}$$

### 3. Die Umwandlung der potentiellen Energie in kinetische Energie

Wird der Rammbar einer Ramme (Bild 197/1) hochgehoben, so muß dazu die Hubarbeit  $W = m \cdot g \cdot h$  verrichtet werden. Der Rammbar hat somit eine *potentielle Energie* erlangt:

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

Nach dem Loslassen nimmt beim Abwärtsbewegen seine Geschwindigkeit ständig zu. Beim Auftreffen auf den Boden hat die Geschwindigkeit ihren größten Wert. Der Rammbar hat seine größte kinetische Energie erlangt:

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

Im gleichen Maße jedoch wie die kinetische Energie beim Fallen wächst, nimmt die potentielle Energie des Rammbars ab. Sie ist beim Aufschlagen gleich Null.

Ein Stein, der nach oben geworfen wird, hat im Moment des Abwurfes eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ . Die anfängliche kinetische Energie des Steines ist somit

$W_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}$ . Bei der Aufwärtsbewegung nimmt seine Geschwindigkeit ständig

ab, folglich auch seine kinetische Energie. Dafür wird seine potentielle Energie größer. Am höchsten Punkt, an dem der Stein seine Bewegungsrichtung umkehrt, hat er die Geschwindigkeit Null. Seine kinetische Energie ist somit auch gleich Null. Die potentielle Energie jedoch hat an dieser Stelle den größten Wert erreicht:

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

Bei beiden Beispielen findet ein Austausch beider mechanischer Energien statt.

- Wo wird die Umwandlung potentieller Energie in kinetische Energie in der Industrie genutzt?



- *Geben Sie die Summe der mechanischen Energien der Kugel in den Punkten E, F und G an! Benutzen Sie das Bild 200/1!  
In welche Energieform wird die kinetische Energie der Kugel im Punkt D umgewandelt?*

Wie die letzte Spalte zeigt, ist die Summe der beiden Energien zu jedem Zeitpunkt gleich groß. Es findet somit eine ständige Umwandlung der einen Energieform in die andere statt. Energie geht dabei nicht verloren. Durch Reibungserscheinungen und den Luftwiderstand nimmt zwar die Sprunghöhe der Stahlkugel über einen längeren Zeitraum ab, wie das Bild 201/1 zeigt, doch auch hier bleibt die Gesamtsumme der Energie erhalten. Die „verlorengelende“ mechanische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt.

Treten bei Energieumwandlungen nur mechanische Energieformen auf, so gilt folgender

**Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie:**  
Die Summe der mechanischen Energien bleibt bei allen mechanischen Vorgängen unverändert.

$$W_{\text{pot}} + W_{\text{kin}} = \text{const}$$

Dieser Satz ist als Sonderfall im allgemeinen Energieerhaltungssatz enthalten.

**Gesetz von der Erhaltung der Energie:**

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

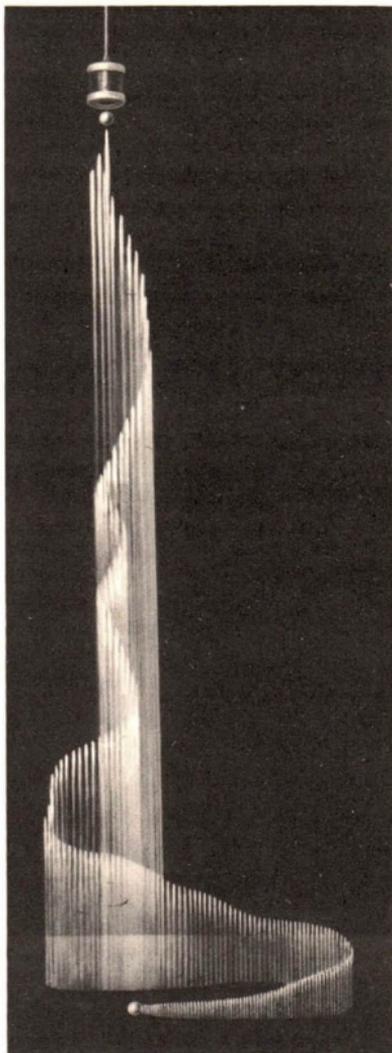


Bild 201/1 Bahns Spuren einer springenden Stahlkugel. Die Sprunghöhe nimmt ab, da ständig eine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie erfolgt

## Fragen und Aufgaben

1. Welches sind die Kennzeichen der potentiellen und der kinetischen Energie?
2. Finden Sie Beispiele für die Umwandlung der kinetischen Energie in potentielle Energie!
3. Wie groß ist die kinetische Energie eines Zuges, der eine Masse von 800 t hat und dessen Geschwindigkeit  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  beträgt?
4. Bei einem Wasserfall fällt je Sekunde eine Wassermenge von  $5 \text{ m}^3$  aus einer Höhe von 4 m. Welche Leistung (in Kilowatt) hat der Wasserfall?
5. Berechnen Sie die kinetische Energie eines Kleinkalibergeschosses, dessen Masse 2,5 g und dessen Geschwindigkeit  $360 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  beträgt! Bis zu welcher Höhe kann das Geschöß auf Grund seiner kinetischen Energie steigen? (Der Luftwiderstand ist zu vernachlässigen.) Welche Energie besitzt es an der höchsten Stelle?
- \*6. Ein Hammer von 5 kg fällt aus 1 m Höhe auf einen Nagel, der dabei 2 cm tief in ein Brett dringt. Wie groß ist die Widerstandskraft des Holzes? Berechnen Sie die Dauer des Schlages!
7. Der „Trabant 601“ erreicht bei einer Nutzleistung von 23 PS eine Höchstgeschwindigkeit von  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wie groß ist die Widerstandskraft, die der Motor überwinden muß ( $1 \text{ PS} = 75 \frac{\text{kpm}}{\text{s}}$ )?

## ZUSAMMENFASSUNG

**Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn eine Kraft längs eines Weges wirkt.**

Welche Arten der mechanischen Arbeit kennen Sie?

**Die mechanische Leistung ist gleich dem Quotienten aus der mechanischen Arbeit und der Zeit.**

Nennen Sie Einheiten für die Leistung!

**Die Fähigkeit eines Körpers, mechanische Arbeit zu verrichten, wird mechanische Energie genannt.**

Wie lautet der allgemeine Energieerhaltungssatz?

### 5. Die Bedeutung des Energieerhaltungssatzes

Die Ausnutzung mechanischer Energie zählt zu den ältesten Erfahrungen der Menschen. Schon in der Urgemeinschaft wurden zum Beispiel Fallgruben gebaut (Bild 203/1) und Pfeil und Bogen verwendet. Ohne daß die Menschen etwas von den mechanischen Energieformen wußten oder etwa den Energieerhaltungssatz kannten, haben sie mechanische Arbeit verrichtet (Hubarbeit beim Fallenstellen, Spannen des Bogens), um potentielle Energie zur Verfügung zu haben, die dann in Bewegungsenergie (fallender Stein, fliegender Pfeil) umgewandelt wurde.

Seit etwa dem 13. Jahrhundert versuchte man, Maschinen zu bauen, die, einmal in Bewegung gesetzt, ohne Zufuhr neuer Energie unaufhörlich laufen und dabei noch

Arbeit verrichten. Solche Versuche wurden jahrhundertlang unternommen, führten aber niemals zu einem Erfolg. Das konnte auch nicht anders sein; denn solch eine Maschine, perpetuum mobile genannt (Bild 203/2), hätte Energie erzeugen müssen. Energie kann aber nicht aus dem Nichts entstehen, sondern es wird immer nur eine Energieart in eine andere Energieart umgewandelt. Diese Erkenntnis wurde erstmalig von dem russischen Naturwissenschaftler M. W. LOMONOSSOW (1711 bis 1765) ausgesprochen und von dem Heilbronner Arzt JULIUS ROBERT MAYER (1814 bis 1874) durch die Berechnung des mechanischen Wärmeäquivalents bestätigt. Durch den englischen Physiker J. P. JOULE (1818 bis 1889) wurde das mechanische Wärmeäquivalent experimentell bestimmt. Der deutsche Wissenschaftler H. v. HELMHOLTZ (1821 bis 1894) begründete diese Erkenntnisse mathematisch und wandte sie auf die Gesamtheit der physikalischen und chemischen Erscheinungen an.

Die Erkenntnisse, die zum Energieerhaltungssatz führten, wurden in verschiedenen Ländern etwa zur gleichen Zeit gewonnen. Die Ursache dafür ist in den damaligen ökonomischen Verhältnissen zu finden. Die auf Grund der Erfindung der Dampfmaschine ständig steigende industrielle Produktion machte es notwendig, den Zusammenhang zwischen Wärme und mechanischer Energie aufzuklären.

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie ist eines der Gesetze, das zeigt, daß keine außergewöhnlichen „Kräfte“ von außerhalb unserer Welt wirksam sind, sondern daß zwischen den Vorgängen in der Natur erkennbare, wechselseitige Beziehungen bestehen.

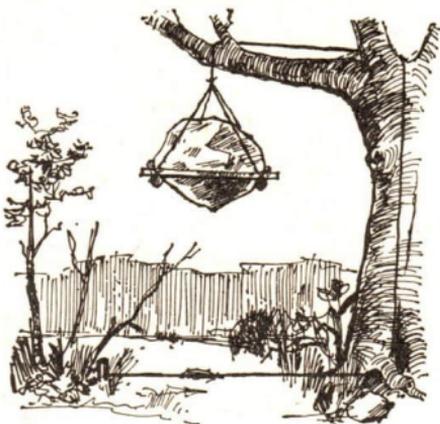


Bild 203/1 Fallgrube

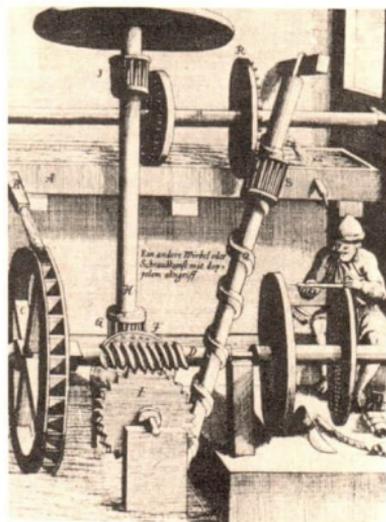


Bild 203/2 Versuch eines perpetuum mobile

## Widerstände im Wechselstromkreis

## Aufgabe

- Bestimmen Sie den Ohmschen Widerstand zweier Spulen (750 und 1500 Windungen)! Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen dem Ohmschen Widerstand und der Windungszahl!
- Bestimmen Sie den Wechselstromwiderstand zweier Spulen (750 und 1500 Windungen)! Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen dem Wechselstromwiderstand und der Windungszahl!
- Stellen Sie fest, welcher Zusammenhang zwischen der Kapazität und dem kapazitiven Widerstand besteht!

## Theoretische Grundlagen

Zu 1) Erläutern Sie die Ursache des Ohmschen Widerstandes! Welche Stromart muß verwendet werden, damit der Ohmsche Widerstand der vorgegebenen Spulen bestimmt werden kann? Warum? Mit Hilfe welcher Gleichung kann der Ohmsche Widerstand berechnet werden? (LB 9, S. 61, Abschnitt 3.1.)

Zu 2) Welche Widerstände können in einem Wechselstromkreis auftreten? Erklären Sie die Entstehung des induktiven Widerstandes! Warum kann man die Änderung des Wechselstromwiderstandes als Maß für die Änderung des induktiven Widerstandes benutzen? Wie heißt die Gleichung zur Berechnung des Wechselstromwiderstandes? Aus welchen Widerständen setzt sich der Wechselstromwiderstand zusammen? Ist es möglich, die Widerstände algebraisch zu addieren? Begründen Sie Ihre Antwort! (LB 9, ab S. 63, Abschnitte 3.2., 3.3. und 4.1.)

Zu 3) Wodurch entsteht der kapazitive Widerstand? Wie ist die physikalische Größe *Kapazität* definiert? Wie heißen die Einheiten der Kapazität? (LB 9, S. 65, Abschnitt 3.3. und S. 31 und 32, Abschnitt 3.2.)

## Geräte und Material

zu 1) 2 Spulen  
(750 und 1500 Windungen)  
Spannungsmesser  
(Meßbereich 5 V =)  
Strommesser  
(Meßbereich 1 A =)  
Potentiometer 100  $\Omega$   
(3,5 W)  
Stromversorgungsgerät  
für Schülerübungen  
Verbindungsleiter

zu 2) 2 Spulen  
(750 und 1500 Windungen)  
geblätterter I-Kern  
Spannungsmesser  
(Meßbereich 10 V ~)  
Strommesser  
(Meßbereich 100 mA ~)  
Potentiometer 100  $\Omega$   
(3,5 W)  
Stromversorgungsgerät  
Verbindungsleiter

zu 3) 2 Kondensatoren  
(1  $\mu\text{F}$  und 2  $\mu\text{F}$ )  
Schablone aus dem  
HF-Satz  
Spannungsmesser  
(Meßbereich 50 V ~)  
Strommesser  
(Meßbereich 100 mA ~)  
Potentiometer 100  $\Omega$   
(3,5 W)  
Stromversorgungsgerät  
Verbindungsleiter

### Versuchsaufbau

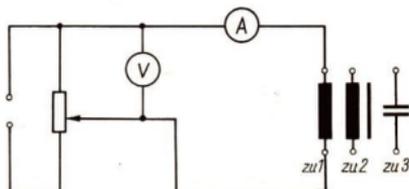


Bild 205/1

### Versuchsablauf

Zu 1) Die Geräte werden nach dem Schaltbild (Bild 205/1) aufgebaut. Mit dem Potentiometer wird eine konstante Spannung von  $1\text{ V} =$  eingestellt. Am Strommesser wird die dazugehörige Stromstärke abgelesen. Die Spannung und die Stromstärke werden in das Meßprotokoll eingetragen. Der angegebene Ablauf wird zur Spannungs- und Stromstärkemessung an der Spule mit 1500 Windungen wiederholt.

### Meßprotokoll zur Bestimmung des Ohmschen Widerstandes

$N$	$U$ in V	$I$ in A	$R$ in $\Omega$	$\frac{R}{N}$
750	1,0	...	...	...
1500	1,0	...	...	...

Zu 2) Nach dem Schaltbild (Bild 205/1) werden die Geräte zusammengebaut. Es wird eine konstante Spannung von  $2\text{ V} \sim$  eingestellt und die dazugehörige Stromstärke abgelesen. Die Meßwerte (bei 750 Windungen und bei 1500 Windungen) werden in das Meßprotokoll eingetragen.

### Meßprotokoll zur Bestimmung des induktiven Widerstandes

$N$	$U_{\text{eff}}$ in V	$I_{\text{eff}}$ in A	$X_L$ in $\Omega$	$\frac{X_L}{N^2}$
750	2	...	...	...
1500	2	...	...	...

Zu 3) Nach dem Schaltbild 205/1 werden die Geräte zusammengebaut. Eine konstante Spannung von  $10\text{ V} \sim$  wird eingestellt und die dazugehörige Stromstärke abgelesen. Die Messungen werden ausgeführt bei einer Kapazität von  $1\ \mu\text{F}$ ,  $2\ \mu\text{F}$  und  $3\ \mu\text{F}$  (Parallelschaltung der beiden Kondensatoren). Die Meßwerte werden in das Meßprotokoll eingetragen.

### Meßprotokoll zur Bestimmung des kapazitiven Widerstandes

$C$ in $\mu\text{F}$	$U$ in V	$I$ in A	$X_C$ in $\Omega$	$X_C \cdot C$
1	10	...	...	...
2	10	...	...	...
3	10	...	...	...

### Auswertung

Zu 1) Errechnen Sie den Ohmschen Widerstand für jede Spule! Begründen Sie, warum die Widerstände verschieden groß sind! Fertigen Sie eine grafische Darstellung (Bild 206/1) an! Bilden Sie die Quotienten  $R:N$ ! Welcher funktionale Zusammenhang besteht zwischen dem Widerstand  $R$  und der Windungszahl  $N$ ?

Zu 2) Errechnen Sie die induktiven Widerstände der beiden Spulen! Begründen Sie die verschiedenen Werte der Widerstände! Vergleichen Sie die Widerstände mit den Ohmschen Widerständen! Begründen Sie die unterschiedlichen Werte! Bilden Sie die Quotienten  $X_L:N^2$ ! Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem induktiven Widerstand  $X_L$  und der Windungszahl  $N$ ?

Zu 3) Errechnen Sie den kapazitiven Widerstand und zeichnen Sie das  $X_C$ - $C$ -Diagramm (Bild 206/2)! Erläutern Sie das Diagramm! Bilden Sie die Produkte aus kapazitivem Widerstand und der Kapazität! Welcher funktionale Zusammenhang besteht zwischen dem kapazitiven Widerstand  $X_C$  und der Kapazität  $C$ ? Welche Beziehung besteht zwischen Kapazität und Stromstärke?

#### Weitere Fragen und Aufgaben

Welche Abhängigkeit besteht bei metallischen Leitern zwischen dem Ohmschen Widerstand und der Temperatur? Begründen Sie diese Abhängigkeit! Wie beeinflussen der Ohmsche Widerstand, der induktive Widerstand und der kapazitive Widerstand die Wirkleistung? Erklären Sie die Angabe  $\cos \varphi = 0,78$ ! Wovon ist der induktive Widerstand abhängig? Erläutern Sie die Phasenverschiebung durch Widerstände!

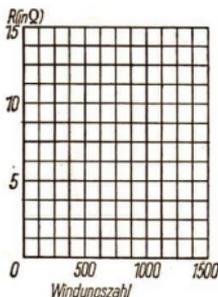


Bild 206/1

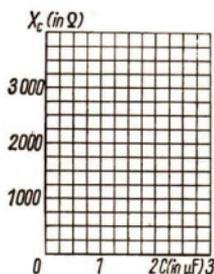


Bild 206/2

## Gesetze des Transformators

### Aufgabe

1. Bestätigen Sie das Gesetz über die Spannungsübersetzung am Transformator!
2. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad eines Transformators bei verschiedenen Belastungen!

### Theoretische Grundlagen

Wie ist ein Transformator aufgebaut und welche physikalischen Vorgänge spielen sich in ihm ab? Welche physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten für Spannung und Stromstärke am Transformator?

Was versteht man im allgemeinen unter dem Wirkungsgrad eines Gerätes oder einer Maschine? Wie kann man den Wirkungsgrad eines Transformators angenähert bestimmen?

(LB 9, S. 95 bis S. 99)

## Geräte und Material

Stromversorgungsgerät

2 Spannungsmesser

(Meßbereiche 10 V $\sim$  und 50 V $\sim$ , umschaltbar)

2 Strommesser (Meßbereich 100 mA $\sim$ )

2 Spulen (125/250 Windungen)

2 Spulen (500 Windungen)

U-Kern, geblättert

I-Kern, geblättert

Potentiometer 100  $\Omega$  (3,5 W)

Lämpchen 4 V (0,1 A) mit Lampenbrett

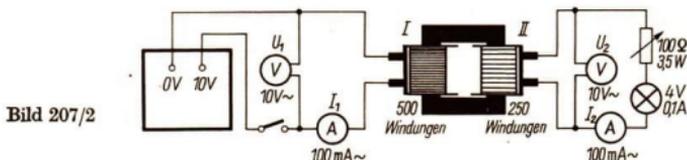
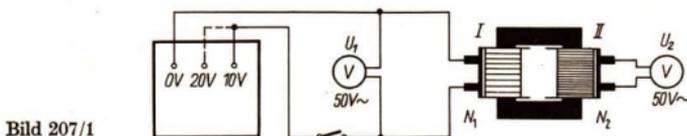
Schalter

Verbindungsleiter

## Versuchsaufbau

Der Transformator wird aus U- und I-Kern sowie zwei Spulen zusammengestellt. Zur Untersuchung der Spannungsübersetzung werden Primär- und Sekundärspannung am unbelasteten Transformator gemessen (Bild 207/1).

Die Ermittlung des Wirkungsgrades erfolgt bei verschiedenen Belastungen (Bild 207/2).



## Versuchsablauf

Zu 1) Stellen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 207/1 zusammen! Legen Sie an die Primärspule zunächst eine Wechselspannung von 10 V!

Messen Sie die Primär- und die Sekundärspannung für folgende Spulenkombinationen:

Primärspule (I)

125 Windungen

125 Windungen

125 Windungen

Sekundärspule (II)

125 Windungen

250 Windungen

500 Windungen

Benutzen Sie nun für die folgenden Kombinationen die 20-V-Wechselspannungsbuchsen des Stromversorgungsgerätes!

Primärspule (I)

500 Windungen

500 Windungen

500 Windungen

Sekundärspule (II)

500 Windungen

250 Windungen

125 Windungen

Berechnen Sie jeweils die zusammengehörigen Verhältnisse der Windungszahlen und der Spannungen! Tragen Sie die Meßergebnisse und die berechneten Quotienten in die Tabelle 1 ein!

Tabelle 1

Nr. d. Messung	$N_1$	$N_2$	$\frac{N_1}{N_2}$	$U_1$ in V	$U_2$ in V	$\frac{U_1}{U_2}$
1	125	125	...	...	...	...
2	125	250	...	...	...	...
3	125	500	...	...	...	...
4	500	500	...	...	...	...
5	500	250	...	...	...	...
6	500	125	...	...	...	...

Zu 2) Stellen Sie den Versuchsaufbau nach Bild 207/2 her! Die Spannung wird an den Buchsen für 10 V Wechselspannung des Stromversorgungsgerätes abgenommen.

Verändern Sie den Widerstand so, daß sich die Leistung im Sekundärstromkreis stufenweise ändert! Dabei ist es zweckmäßig, die Sekundärstromstärke stets um gleiche Schritte zu vergrößern, beispielsweise jeweils um 0,01 A bis zur Höchststromstärke von 0,10 A.

Messen Sie jedesmal Spannung und Stromstärke sowohl im Primär- als auch im Sekundärstromkreis! Berechnen Sie die primäre und die sekundäre Scheinleistung und aus diesen den Wirkungsgrad! Tragen Sie alle gemessenen und berechneten Werte in die Tabelle 2 ein!

Tabelle 2

Nr. d. Messung	$U_1$ in V	$I_1$ in A	$P_{s1}$ in VA	$U_2$ in V	$I_2$ in A	$P_{s2}$ in VA	$\eta$
1	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...	...	...
6	...	...	...	...	...	...	...

### Auswertung

Welche Gesetzmäßigkeit ergibt sich aus dem Vergleich der Verhältnisse der Windungszahlen und der Spannungen? Worauf sind eventuelle Abweichungen zurückzuführen?

Wie ändert sich der Wirkungsgrad des untersuchten Transformators, wenn die Belastung vergrößert wird?

### Weitere Fragen und Aufgaben

Weshalb benutzt man für Transformatoren geblätterte Eisenkerne?

Erläutern Sie je eine technische Anwendung des Transformators zur Vergrößerung der Spannung bzw. zur Vergrößerung der Stromstärke!

# Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften

## Aufgaben

1. Ermitteln Sie die resultierende Kraft zweier Teilkräfte (Komponenten), die miteinander einen Winkel von  $90^\circ$  bilden!
2. Ermitteln Sie die Hangabtriebs- und Normalkraft eines Körpers auf der geneigten Ebene bei einem Neigungswinkel von  $45^\circ$ !

## Theoretische Grundlagen

Wie können zwei Kräfte mit gleichem Angriffspunkt zu einer resultierenden Kraft zusammengesetzt werden? Wie kann eine Kraft in zwei Komponenten zerlegt werden?

Wiederholen Sie die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten! (LB 9, S. 120 bis 129)

Machen Sie sich mit der Kraftzerlegung an der geneigten Ebene vertraut! (LB 9, S. 127)

## Geräte und Material

2 V-förmige Stativfüße

2 Stativstäbe

2 Rollen mit Schraubzwinde

Hakengewichtsstücke

Kreuzmuffe

Achszapfen 70 mm

Schnur

Zeichendreieck

Brett für geneigte Ebene

Walze

Federwaage (Meßbereich 1 kp)

## Versuchsaufbau

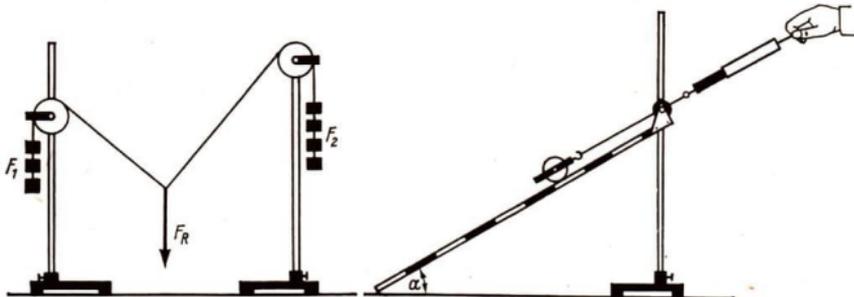


Bild 209/1

Bild 209/2

## Versuchsablauf

Zu 1) Der Versuchsaufbau erfolgt nach Bild 209/1. Als Teilkräfte werden — wie in Bild 209/1 angegeben — Hakengewichtsstücke verwendet. Hängen Sie in der Mitte des Fadens so lange Hakengewichtsstücke an, bis sich bei einem Winkel von  $90^\circ$  zwischen den Seilstücken der Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  Gleichgewicht einstellt! Bestimmen Sie den Betrag der resultierenden Kraft  $F_R$ !

$\alpha$ in $^\circ$	$F_1$ in p	$F_2$ in p	$F_R$ in p
90	...	...	...

Zu 2) Bestimmen Sie zunächst das Gewicht  $G$  des Körpers (Walze) und anschließend (Bild 209/2) die Hangabtriebskraft  $F_H$  der Walze mit der Federwaage! Notieren Sie die Meßergebnisse und überlegen Sie, wie man auch die Normalkraft  $F_N$  ermitteln könnte!

$\alpha$ in °	$F_H$ in p	$G$ in p
45	...	...

#### Auswertung

Zeichnen Sie für beide Versuche ein Kräfteparallelogramm ( $10 \text{ p} \cong 0,5 \text{ cm}$ ) und vergleichen Sie die gemessenen Werte mit den aus der Zeichnung gewonnenen Ergebnissen! Bestimmen Sie die resultierende Kraft (Versuch 1) und die Hangabtriebskraft (Versuch 2) durch Rechnung! Um wieviel Prozent weichen die experimentellen Ergebnisse von den errechneten ab? Nennen Sie Fehlerquellen!

## Die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

#### Aufgabe

Bestätigen Sie die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung!

#### Theoretische Grundlagen

Was versteht man unter einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung? Nennen Sie das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz und das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung! (LB 9, S. 145 bis S. 150, Abschnitte 1 bis 3)

#### Geräte und Material

Fallrinne (2000 mm)	Anschlagklotz
Ansatzrinne (1000 mm)	Meßstab
Stahlkugel (etwa 30 mm Durchmesser)	Stoppuhr
Unterlegkeil	

#### Versuchsaufbau



Bild 210/1

Durch Unterlegen des Keils soll die Fallrinne eine Neigung von etwa  $7^\circ$  bekommen.

#### Versuchsablauf

Die Kugel soll auf der Fallrinne die Wege 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm, 140 cm und 160 cm zurücklegen. Markieren Sie die Startpunkte!

Solange sich die Kugel auf der Fallrinne bewegt, wird sie beschleunigt. Auf der kurzen Strecke der Ansatzrinne bewegt sie sich nahezu gleichförmig mit der Geschwindigkeit, die sie am Ende der Fallrinne hatte. Messen Sie die Laufzeit der Kugel für die verschiedenen Wege auf der Fallrinne und tragen Sie die Werte in das Meßprotokoll ein! Jede Messung wird fünfmal wiederholt.

Meßprotokoll für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Weg $s$ in cm	40	60	80	100	120	140	160
Nr. d. Messung	$t$ in s						
1	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...	...	...
Summe $t$ in s	...	...	...	...	...	...	...
Mittelwert $t_m$ in s	...	...	...	...	...	...	...

Markieren Sie auf der Ansatzrinne ausgehend von dem Fußpunkt der Fallrinne eine Strecke von 100 cm! Messen Sie die Zeiten, die die Kugel nach Durchlaufen der einzelnen Wege der Fallrinne zum Zurücklegen dieses auf der Ansatzrinne markierten Weges benötigt! Jede Messung wird fünfmal wiederholt. Die Meßwerte werden in das Meßprotokoll für die gleichförmige Bewegung eingetragen.

Meßprotokoll für die gleichförmige Bewegung ( $s_1 = 100$  cm)

Weg $s$ in cm	40	60	80	100	120	140	160
Nr. d. Messung	$t_1$ in s						
1	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...	...	...
Summe $t_1$ in s	...	...	...	...	...	...	...
Mittelwert $t_{1m}$ in s	...	...	...	...	...	...	...

Übertragen Sie die Mittelwerte aus den beiden Meßprotokollen in die Tabelle 1! Errechnen Sie für die einzelnen Wege der Fallrinne die Endgeschwindigkeit  $v_E$  der Kugel! Berechnen Sie aus der Endgeschwindigkeit  $v_E$  und der zugehörigen Laufzeit  $t_m$  auf der Fallrinne die Beschleunigung!

Tabelle 1

beschleunigte Bewegung auf der Fallrinne		gleichförmige Bewegung auf der Ansatzrinne			Beschleunigung $a = \frac{v_E}{t_m}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$
$s$ in cm	$t_m$ in s	$s_1$ in cm	$t_{1m}$ in s	$v_E = \frac{s_1}{t_{1m}}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	
40	...	100	...	...	...
60	...	100	...	...	...
80	...	100	...	...	...
100	...	100	...	...	...
120	...	100	...	...	...
140	...	100	...	...	...
160	...	100	...	...	...

#### Auswertung

Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Gesetzen der gleichmäßig beschleunigten Bewegung! Fassen Sie Ihre Erkenntnisse zusammen!

#### Weitere Fragen und Aufgaben

Ein Körper legt auf einer geeigneten Ebene in 1 s einen Weg von 10 cm zurück. Welche Wege legt er in 2 s, 3 s, 4 s zurück? Was können Sie daraus erkennen?

Warum nimmt die Geschwindigkeit eines Zuges bei der Fahrt auf waagerechter Strecke nicht ständig zu, obwohl die Zugkraft der Lokomotive dauernd wirkt?

## Grundgesetz der Mechanik

### Aufgabe

Untersuchen Sie die Zusammenhänge zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung!

#### Theoretische Grundlagen

Was versteht man unter einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung? Nennen Sie das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung! (LB 9, S. 146 und 149)

Welche Zusammenhänge werden durch das Grundgesetz der Mechanik beschrieben? Wie lautet dieses Gesetz? (LB 9, S. 169 bis 172)

#### Geräte und Material

Meßuhr mit Haltemagnet,  
Kontaktplatte und Verbindungskabel  
Glasplatte auf Brett, 800 mm lang  
Leichtbeweglicher Wagen

Körper mit einer Masse von 100 g, 200 g, 200 g,  
500 g  
Körper mit einem Gewicht von 10 p, 20 p, 20 p  
Rolle mit Schraubzwinde

2 V-förmige Stativfüße  
5 kurze Stativstäbe  
Tischklemme

2 Kreuzmuffen  
Meßstab  
Schnur

Federwaage (Meßbereich 100 p)  
Spannungsquellen  
(220 V ~ und 4 V bis 6 V =)

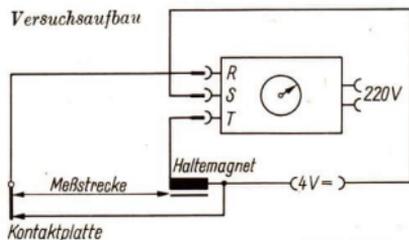


Bild 213/1

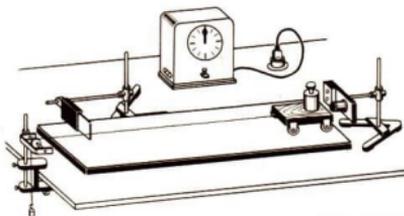


Bild 213/2

### Versuchsablauf

Machen Sie sich mit der Funktionsweise der Meßuhr mit Haltemagnet und Kontaktplatte vertraut (Bild 213/1)!

Bauen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 213/2 zusammen! Um den störenden Einfluß der Reibung des Wagens auszuschalten, wird das Brett mit der Glasplatte etwas geneigt, so daß sich der Wagen mit dem Massestück gleichförmig bewegt. Der Abstand zwischen dem Wagen und der Kontaktplatte (Meßstrecke  $s$ ) sollte etwa 60 cm betragen (mit Meßstab abmessen!).

### Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse bei gleichbleibender Kraft

Die konstante Kraft  $F$  beträgt 10 p.

Auf den Wagen werden nacheinander Massestücke von 100 g, 200 g, 300 g, 400 g und 500 g aufgelegt. Nachdem für jedes Massestück durch Neigung der Fahrbahn der Reibungsausgleich erfolgt ist, wird dreimal die Zeit gemessen, die der Wagen mit den jeweils aufgelegten Körpern zum Durchfahren der Meßstrecke  $s$  benötigt.

Die Gesamtmasse  $m$  des Wagens setzt sich zusammen aus  $m = m_W + m_K + m_E + m_F$  ( $m_W$ : Masse des Wagens;  $m_K$ : Masse des aufgelegten Körpers;  $m_E$ : Ersatzmasse für die Trägheit der Rolle, sie beträgt etwa die halbe Masse der Rolle;  $m_F$ : Masse des jeweils wirkenden Gewichtstückes). Die Werte für die Meßstrecke  $s$ , die Gesamtmasse  $m$  und die Zeiten  $t_1, t_2, t_3$  werden in das Meßprotokoll eingetragen.

### Meßprotokoll für die Abhängigkeit der Beschleunigung von der Masse bei gleichbleibender Kraft

Nr. der Messung	$F$ in p	$s$ in cm	$m$ in g	$t_1$ in s	$t_2$ in s	$t_3$ in s	$t_m$ in s	$a$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	$m \cdot a$ in $\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$
1	10	...	...	...	...	...	...	...	...
2	10	...	...	...	...	...	...	...	...
3	10	...	...	...	...	...	...	...	...
4	10	...	...	...	...	...	...	...	...
5	10	...	...	...	...	...	...	...	...

### Abhängigkeit der Beschleunigung von der wirkenden Kraft bei konstanter Masse

Die Masse  $m_K$  des aufgelegten Körpers beträgt 500 g (Reibungsausgleich beachten!). Der Wagen mit dem aufgelegten Körper wird dann nacheinander durch die Kraft  $F$  von 10 p, 20 p, 30 p, 40 p und 50 p in Bewegung gesetzt. Für jede Kraft ist dreimal die Zeit zu messen, die der Wagen zum Durchfahren der Meßstrecke  $s$  benötigt.

Die durch Veränderung der Kraft bedingte Änderung der Gesamtmasse ist so gering, daß sie vernachlässigt werden kann.

Die Meßwerte werden in das Meßprotokoll eingetragen.

Meßprotokoll für die Abhängigkeit der Beschleunigung von der wirkenden Kraft bei gleichbleibender Masse

Nr. der Messung	$m$	$s$	$F$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_m$	$a$	$\frac{a}{F}$
	in g	in cm	in p	in s	in s	in s	in s	in $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$	in $\frac{\text{cm}}{\text{p} \cdot \text{s}^2}$
1	....	....	10	....	....	....	....	....	....
2	....	....	20	....	....	....	....	....	....
3	....	....	30	....	....	....	....	....	....
4	....	....	40	....	....	....	....	....	....
5	....	....	50	....	....	....	....	....	....

#### Auswertung

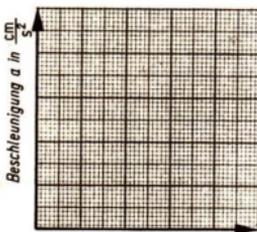
Berechnen Sie die Mittelwerte  $t_m$  der Zeiten  $t_1, t_2, t_3$ , die Werte für die Beschleunigung  $a$  sowie für die Produkte  $m \cdot a$  und für die Quotienten  $a : F$ !

Fertigen Sie ein  $a$ - $m$ -Diagramm (Bild 214/1) und ein  $a$ - $F$ -Diagramm (Bild 214/2) an!

Welche Folgerungen kann man aus den beiden Versuchsreihen ziehen?

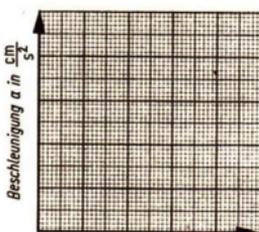
#### Weitere Fragen und Aufgaben

Wie würden sich die Werte des Produkts  $m \cdot a$  ändern, wenn man bei dieser Versuchsreihe den Einfluß der Reibung nicht beachtet? Begründen Sie Ihre Antwort!



Masse  $m$  in g

Bild 214/1



Kraft  $F$  in p

Bild 214/2

## 2. Lösungen

### 2.1. Elektrizitätslehre

Seite 10

2. In feuchten Räumen müssen besondere Isolationsvorschriften beachtet werden. Bei durchfeuchteter Isolation fließt ein Strom zwischen den nebeneinanderliegenden Leitern. Es besteht ein Feuchtigkeitsschluß. Berührt man einen blanken oder durchfeuchteten Leiter, so kann durch den menschlichen Körper ein Strom zur Erde fließen. Dieser ist besonders groß und lebensgefährlich, wenn man nasse Finger hat und auf nassem Boden steht.
2. Am negativen Pol tritt eine Rotfärbung des Phenolphthaleins ein, weil hier Natriumhydroxid bzw. Kaliumhydroxid entsteht.

Seite 21

4. 18 Elemente

5. Es müssen 2 Zweige parallel geschaltet werden. In jedem Zweig müssen 6 Akkumulatorenzellen in Reihenschaltung liegen.
2. Die Batterie besteht aus 6 Zink-Braunstein-Elementen. Sie sind übereinandergeschichtet und durch leitende Plastfolien in Reihe geschaltet. Die Elemente sind aus einer dünnen Zinkfolie, einem mit einer elektrolytischen Lösung getränkten Papier und einem gepreßten Block aus Kohle und Braunstein aufgebaut.

Seite 34

2.  $Q = 6550 \text{ C}$

7. Man soll eine möglichst kleine Fläche bedecken, auf keinen Fall Schutz unter freistehenden Bäumen suchen. Antennen und Netzstecker von Rundfunk- und Fernsehgeräten abziehen, da durch Blitzableitung über das Netz die Geräte gefährdet werden können.

Seite 50/51

2. a) Die Lenzsche Regel gibt die Richtung von Induktionsströmen an. Sie verlaufen so, daß sie Bewegungen hemmen und Änderungen des induzierenden Feldes entgegenwirken.  
b) Das würde bedeuten, daß elektrische und mechanische Energie aus dem Nichts entstehen.
4. Schalterkontakte müssen schnell geöffnet werden. Funkenüberschläge können durch Preßluft gelöscht werden.
6.  $0,102 \text{ kpm} = 1 \text{ Ws}$

Seite 71

6. a)  $u_{\max} = 311 \text{ V}$       b)  $i_{\max} = 6,65 \text{ A}$

9.  $R = 31,2 \Omega$        $P_W = 1,48 \text{ kW}$

Es wird eigentlich nach den Formeln für den Scheinwiderstand und die Scheinleistung gerechnet. Der induktive und kapazitive Widerstand sind in diesem Fall jedoch bedeutungslos.

10. a)  $Z = 28,8 \Omega$                       b)  $Z = 630 \Omega$   
 $P_S = 5 \text{ kVA}$                                $P_S = 77 \text{ VA}$

11.  $I_{\text{eff}} = 8,5 \text{ A}$

12.  $I_W = 275 \text{ A};$      $I_S = 325 \text{ A}$

Es können Kondensatoren eingesetzt werden,  
um die Phasenverschiebung aufzuheben.

Seite 81

3.  $I_R = I_S = I_T$   
 $I_R \approx 0,87 \text{ A}$

Seite 103

7.  $U_L \approx 380 \text{ V}$

## 2.2. Mechanik

Seite 154

12.  $t = 5,9 \text{ s} + 0,5 \text{ s} = 6,4 \text{ s}$   
(für  $v_{\text{schall}} = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ )

Seite 163

4. Gesamthöhe = 40 m

Seite 175

9.  $F = 55 \text{ kp}$   
12.  $F = 98,1 \text{ N} = 10 \text{ kp}$   
14.  $F = 975 \text{ N} = 99,5 \text{ kp};$   
Anwendung des Hebelgesetzes

Seite 184

6.  $v = 22,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$   
7.  $F_f \approx 14800 \text{ N} \approx 1510 \text{ kp}$

Seite 192

4.  $a = 2,45 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Seite 202

4.  $P = 196,2 \text{ kW}$

# NAMEN- UND SACHWORTVERZEICHNIS

- Akkumulator 17 ff.  
 Aloxidierung 9  
 Amperesekunde 24  
 Anion 7  
 Anlasser 87  
 Anlaßwiderstand 93  
 Anode 7  
 Arbeit, mechanische 194 f.  
 —, im Wechselstromkreis 67  
 ARCHIMEDES 138  
 ARISTOTELES 138, 151 f., 154  
 Außenpolmaschine 55  
 Augenblickswert 62, 79  
  
 BAILY, WALTER 82  
 Ballistik 162  
 Batterie 14  
 Beschleunigung 146 ff.  
 Bewegung, geradlinig gleichförmige 142  
 —, gleichförmige 140 f.  
 —, gleichmäßig beschleunigte 145 ff.  
 —, mechanische 113 f.  
 —, ungleichförmige 145  
 —, zusammengesetzte 157  
 Bewegungen, Satz von der Unabhängigkeit der 156 f.  
 Bewegungszustand 114, 164 f.  
 Bleiakkumulator 18  
 Blindleistung 69  
 Blindwiderstand 64, 65  
 Blitzschutzanlage 29  
 BOYLE, ROBERT 193  
 BRADLEY, CHARLES SCHENK 82  
 BRAHE, TYCHO 186  
 Braunsch'sches Elektrometer 28  
 BRUNO, GIORDANO 186  
  
 Coulomb 24  
 COULOMB, CHARLES AUGUSTIN DE 24  
  
 Dielektrizitätskonstante 32  
 Dissoziation 6 f.  
 DOBROWOLSKI, MICHAEL OSSIPOWITSCH v. 82, 83  
 Doppelpendel 28  
 Doppelschicht 12  
 Doppelschlußgenerator 91  
 Doppel-T-Anker 54  
 Drehbewegung 179  
 Dreheisenmeßwerk 59  
 Drehfeld 81 f.  
 Drehstrom 82  
 Drehstrommotor 83 f.  
 Drehstromtransformator 102  
 Drehzahl 179  
 Dreieckschaltung 80 f., 85  
 Dreileitersystem 77 f.  
 Dreiphasenwechselstromgenerator 76  
 Dreiphasenwechselstromsystem, geschlossenes 74, 75  
 —, offenes 73  
 Dreiphasenwechselstromtransformator 102  
 Dynamik 114  
 Dynamobleche 99  
 Dynamoelektrisches Prinzip 89 f.  
  
 Ebene, geneigte 127  
 Effektivwert 60  
 Einphasenwechselstromtransformator 102  
 Eisenverluste 99  
 Elektrizitätsmenge 23  
  
 Elektroden 7  
 Elektrolyse 8  
 Elektrolyt 6 ff.  
 Elektrolytkondensator 33  
 Elektromagnet 39 ff.  
 Elektron 22  
 Elektronenmangel 23, 30  
 Elektronenüberschuß 23, 30  
 Elektrostatik 22  
 Elektrostatische Gasreinigung 29  
 Energieerhaltung 44  
 Energieerhaltungssatz 201  
 Energie, chemische 17  
 —, elektrische 17  
 —, kinetische 198 f.  
 —, mechanische 194 ff.  
 —, potentielle 197 f.  
 Energieumwandlung 17  
 Entladen 18  
 Erdleitung 80  
  
 Fahrraddynamo 55  
 Fallbeschleunigung 152  
 Fallgesetze 153  
 Farad 32  
 FARADAY, MICHAEL 26, 36, 50  
 Feld, elektrisches 26  
 Feldlinie 26  
 FERRARIS, GALILEO 82, 83  
 Fliehkraft 182  
 FRANKLIN, BENJAMIN 29  
 Freier Fall 150 ff.  
 Fremderregung 89  
 Frequenz 58  
  
 GALILEI, GALILEO 139, 151, 154 f., 165, 186

- GALVANI, LUIGI** 11  
 Galvanische Elemente 11  
 Galvanoplastik 9  
 Galvanostegie 9  
 Gegenwirkungsprinzip 173f.  
 Geschwindigkeit, (geradlinig  
 gleichförmige Bewegung)  
 142  
 —, (gleichmäßig beschleunigte  
 Bewegung) 147  
 —, 1. kosmische 191  
 —, 2. kosmische 191  
 —, mittlere 142f., 146  
 Gewitter 29  
 Gleichgewicht 121, 125f., 130f.  
 —, indifferentes 133  
 —, labiles 133  
 —, stabiles 132  
 Gleichspannung, geglättete 89  
 Gleichstrom, pulsierender 33  
 Gleichstromnebenschluß-  
 generator 90f.  
 Gleichstromnebenschlußmotor  
 91f.  
 Gleichstromreihenschluß-  
 generator 90f.  
 Gleichstromreihenschlußmotor  
 91f.  
 Gleitreibung 167  
 Glimmlampenschwenkstab 57  
 Gravitation 185ff.  
 Gravitationskonstante 190  
 Gravitationskraft 187f.  
 Grundgesetz der Mechanik  
 171f.  
 Gruppenschaltung 20  
 Haftreibung 166  
 Hangabtriebskraft 127  
**HASELWANDER, FRIEDRICH**  
 AUGUST 83, 87, 111  
 Hauptleiter 77  
 Hertz 58  
**HERTZ, HEINRICH** 58  
**HOOKE** 193  
**HUYGENS, CHRISTIAN** 193  
 Induktion 36ff.  
 Induktionsschmelzofen 101  
 Induktionsspannung 36ff.  
 Induktionsspannungen, Größe  
 von 43  
 Induktionsspule 39ff.  
 Induktionsstrom 40ff.  
 Influenz 24  
 Innenpolmaschine 55  
 Ion 6ff.  
 Ionenstrom 7  
 Kapazität 31  
 Kation 7  
 Katode 7  
 Katodenstrahloszillograf 57  
**KEPLER, JOHANNES** 186f.  
 Keplersche Gesetze 186f.  
 Kerntransformator 100f.  
 Kilogramm 170  
 Kilopond 117, 173  
 Kollektor 87  
 Kommutator 87  
 Kondensator 30, 65  
 —, Laden 30  
 —, Entladen 30  
 Konduktor 25  
**KOPERNIKUS, NIKOLAUS** 185  
 Kopplung, induktive 95  
 Korrosion 16  
 Kraft 115f.  
 Kraftkomponente 126f.  
 Kraft, Maßeinheit der 117, 171  
 —, resultierende 120ff.  
 Kraftwirkung, dynamische  
 116, 172  
 —, statische 116  
 Kreisbewegung, gleichförmige  
 177ff.  
 Kreislampe 183  
 Kupferverluste 99  
 Kurbelinduktor 54  
 Kurzschlußläufermotor 83, 84  
 Ladung, elektrische 22  
 —, negative 23  
 —, positive 23  
 Ladungstrennung, 23  
 Läufer 56, 76  
 Leistung, mechanische 196  
 Leistung im Wechselstromkreis  
 67  
 Leistungsfaktor 69  
 Leistungsschalter 48  
 Leiter 79  
 Leiter-Mittelpunktleiter-  
 Spannung 77  
 Leiterspannung 77, 79  
 Leiterstrom 79  
 Leitfähigkeit von Flüssigkeiten  
 6  
 Lenzsche Regel 50  
 Leuchtstofflampe 48  
 Lichtmaschine 87  
 Manteltransformator 100f.  
 Masse 170  
 Materie 28  
 Mikrofarad 32  
 Mittelpunktleiter 77  
 Momentangeschwindigkeit 146  
 Monozelle 32  
 Mp-Leiter 77  
 Nanofarad 32  
**NERNST, WALTER** 12  
**NEWTON, ISAAC** 152, 164, 192f.  
 Newton 171, 173  
 Newtonsches Gravitations-  
 gesetz 190  
 Newtonsches Prinzip, erstes  
 164f.  
 —, zweites 171  
 —, drittes 173f.  
 Normalkraft 127, 167  
 Orientierungspolarisation 25  
**PAPIN, DENIS** 193  
 Parallelschaltung 15  
 Periode 58  
 Phasenverschiebung 64  
 Pikofarad 32  
 Polprüfer 23  
 Polrad 76  
 Polreagenzpapier 10  
**PTOLEMÄUS** 185  
 Pulsierender Gleichstrom 88  
 Pumpspeicherwerk 109, 110

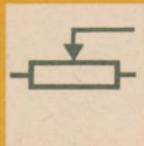
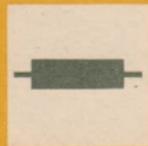
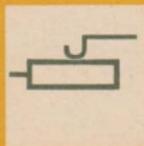
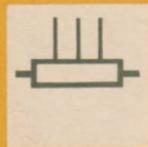
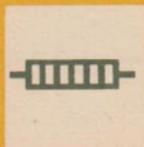
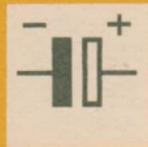
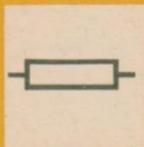
- Rechenmaschine** 48  
**Rechte-Faust-Regel** 41  
**Reibung** 166 ff.  
**Reibungskraft** 166  
**Reibungszahl** 167  
**Reihenschaltung** 15  
**Resultierende Kraft** 120 ff.  
**Ringversuch** 41  
**R-Leiter** 77  
**Rollreibung** 168  
**Rotor** 56, 76  
**Ruhe, relative** 116, 140 f.
- Scheinarbeit** 70  
**Scheinleistung** 69  
**Scheinwiderstand** 67  
**Schweißtransformator** 101  
**Schwerpunkt** 130 f.  
**Schwingspiegeloszillograf** 57  
**Selbsterregung** 90  
**Selbstinduktion** 47 f.  
**SIEMENS, WERNER V.** 90  
**S-Leiter** 77  
**Spannungsquellen, chemische**  
 11  
**Spannungsreihe, elektrochemische** 13  
 —, galvanische 13  
**Spannungsübersetzung** 96 f.  
**Spitzenkraftwerk** 109  
**Stahlakkumulator** 19  
**Ständer** 56  
**Standfestigkeit** 134 ff.
- Statik** 114  
 —, Entwicklung der 138 ff.  
**Stator** 56  
**Steigzeit** 161  
**Stern-Dreieck-Schalter** 85  
**Sternschaltung** 78 ff., 85  
**STEVIN, SIMON** 139  
**Störschutzkondensator** 34  
**Strahltriebwerk** 175  
**Strangspannung** 79  
**Strangstromstärke** 79  
**Stromstoß** 24, 31  
**Stromübersetzung** 97 f.  
**Stromwender** 87
- Teilkraft** 126  
**TESLA, NICOLA** 82, 83  
**T-Leiter** 77  
**Trägheit** 165  
**Trägheitssatz** 164 f.  
**Transformator** 95 ff.  
**Transformatorenleichung** 98
- Umlaufzahl** 178  
**Umlaufzeit** 178, 187  
**Umspanner** 95  
**Universalmotor** 94
- Vektorielle Größe (Beschleunigung)** 150  
 — (Geschwindigkeit) 142  
 — (Kraft) 117 ff.  
**Verbundnetz** 108 f.  
**Verkettungsfaktor** 77
- Verschiebungspolarisation** 25  
**Vierleitersystem** 77  
**VINCI, LEONARDO DA** 139  
**VOLTA, ALESSANDRO** 11
- Waltenhofensches Pendel** 49  
**Wechselspannung** 52  
**Wechselstrom** 52  
**Wechselstromgenerator** 52  
**Wickelkondensator** 33  
**Widerstand, induktiver** 63  
 —, kapazitiver 65  
 —, Ohmscher 61  
**Wirbelströme** 69  
**Wirkarbeit** 67, 70  
**Wirkleistung** 69  
**Wirkwiderstand** 64, 67  
**Wurf** 157 ff.  
 —, lotrechter 160 f.  
 —, schräger 162  
 —, waagerechter 158 f.
- Zentralbeschleunigung** 179  
**Zentralkraft** 179  
**Zentrifugalbeschleunigung** 182  
**Zentrifugalkraft** 182  
**Zentrifugalregler** 183  
**Zentrifuge** 183  
**Zentripetalbeschleunigung** 181  
**Zentripetalkraft** 179 ff.  
**Zink-Braunstein-Element** 14  
**Zink-Kupfer-Element** 12  
**Zungenfrequenzmesser** 58

#### Quellennachweis der Abbildungen

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen der Autoren von Heinrich Linkwitz, Berlin, angefertigt.

G. Aechtner, Halle: 57/2. W. Brunstein, Güstrow: 15/1, 36/2, 39/1, 46/1 a, 46/1 b. W. Bunschuh, Berlin: 26/1 a. Deutsche Akademie der Künste, Berlin: 187/1. Deutsches Amt für Meßwesen und Warenprüfung, Berlin: 171/1. Deutsches Zentralinstitut für Lehrmittel, Berlin: 36/2, 59/2, 71/1, 71/2. Dewag, Berlin: 20/2. M. Ittenbach, Berlin: 133/2. H. Krüger, Berlin: 19/1. Photo-Kino Krütgen, Halle: 30/1, 50/1, 55/1, 161/1. R. Lehmann, Berlin: 134/2. Dr. W. Manthel, Berlin: 84/1, 86/1 a, 86/1 b, 91/1, 91/2, 92/1, 92/2, 93/1, 101/2 a, 101/2 b. R. Müller, Berlin: 34/1. H. Opitz, Leipzig: 106/1. R. Peter jr., Dresden: 6/1. PGH Foto Studio Leipzig: 9/1. VEB Carl Zeiss, Jena: 48/2. VEB Elektroapparatewerke Treptow, Berlin: 58/2. VEB Sachsenwerk, Dresden-Niedersedlitz: 48/1. VEB Weimar-Werk, Weimar: 130/1. VVV Archiv, Berlin: 9/2, 19/2, 20/1, 22/1, 26/1 b, 27/1, 27/2, 27/3, 27/4, 28/1, 28/2, 33/1, 48/3, 49/3, 55/2, 56/1, 56/2, 89/1, 138/1, 139/1, 139/2, 155/1, 157/1, 183/1, 185/1, 193/1, 201/1. VVV M. Seifert, Berlin: 20/3, 33/2, 57/1, 57/3, 69/1, 87/1, 104/1, 111/1, 115/1 b, 134/1, 146/1. W. Wörstenfeld, Berlin: 157/1, Zentralbild, Berlin: 5/1, 8/1, 9/3, 11/1, 11/2, 36/1, 52/1, 73/1, 95/1, 106/3, 109/1, 113/1 a, c, d, e, f, 115/1 a, 120/1, 136/2, 140/1, 145/1, 156/1, 157/1, 177/1, 183/2, 194/1. Zentrales Haus der Deutsch-Sowjetischen-Freundschaft, Berlin: 106/2, 113/1 b. Reproduktion aus: Dr. F. Klemm „Technik – Eine Geschichte ihrer Probleme“, Freiburg/München: 203/2.

Bei Empfang und Abgabe des Lehrbuches vom Schüler auszufüllen				
Lfd. Nr.	Name	Schuljahr	Zustand des Buches	
			bei Empfang	bei Abgabe
1		19__/__	neu	
2		19__/__		
3		19__/__		
4		19__/__		



### Schaltzeichen:

Von links oben nach rechts  
unten

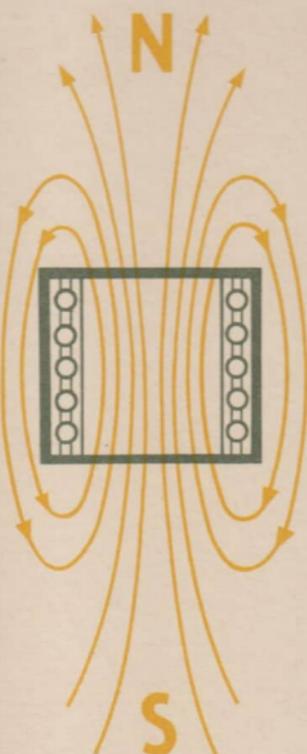
- Widerstand
- Elektrolytkondensator
- Dreieckschaltung
- Sternschaltung
- Heizgerät
- Widerstand mit 3 Anzapfungen
- Relais
- Widerstand, stufig verstellbar
- Induktiver Widerstand
- Phasenverschiebungsmesser
- Kondensator
- Induktiver Widerstand  
mit Eisenkern
- Spannungsmesser (Millivolt)
- Spannungsteiler,  
stetig verstellbar
- Transformator mit Kern
- Wechselstromgenerator
- Lampe
- Transformator
- Wechselstrommotor



**1785**

Elektrisches Feld

Charles-Augustin Coulomb  
1736 bis 1806



**1842**

Elektromagnetisches  
Feld

Michael Faraday  
1791 bis 1867



**1885**

Elektromagnetisches  
Drehfeld

Galileo Ferraris  
1847 bis 1897

