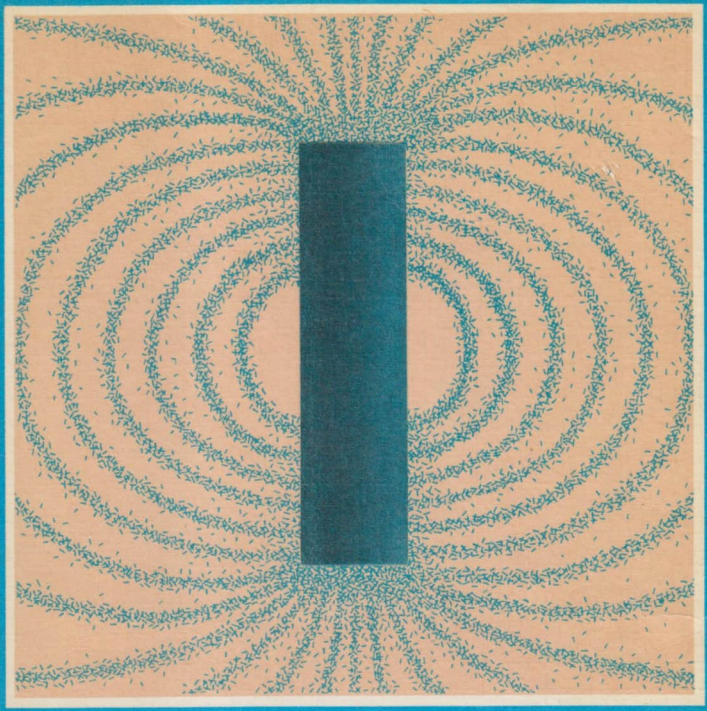
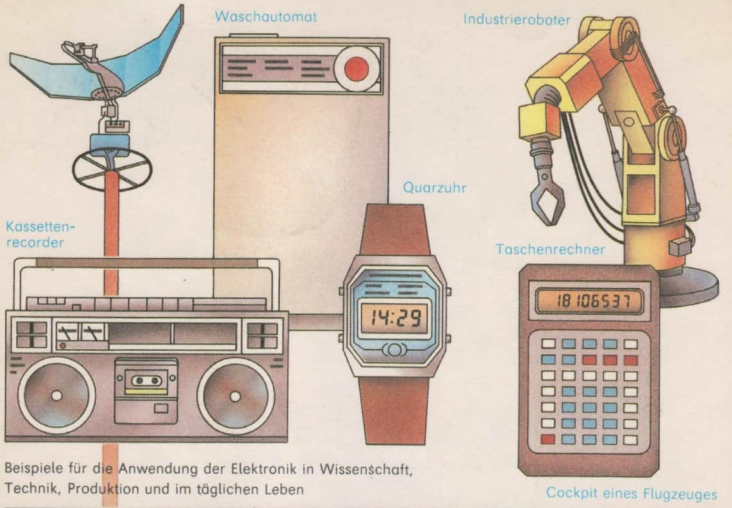
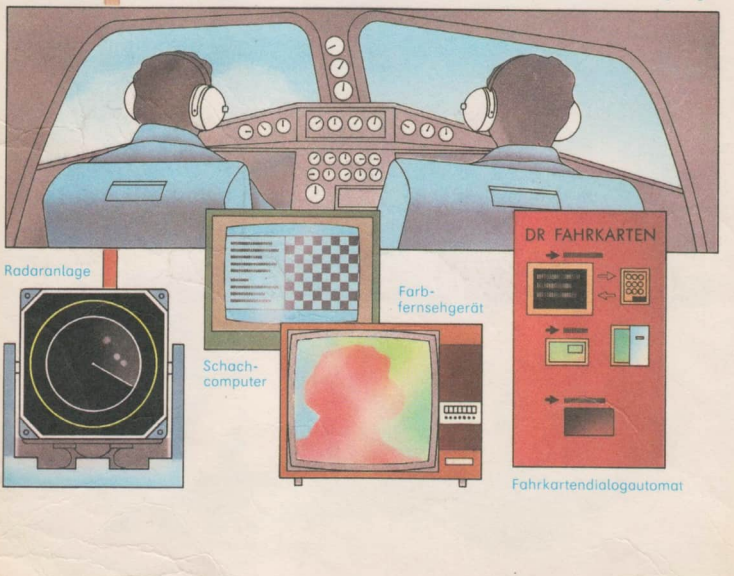


PHYSIK 9



Beispiele für die Anwendung der Elektronik in Wissenschaft, Technik, Produktion und im täglichen Leben

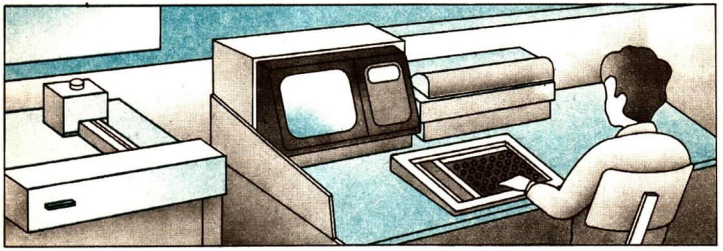


Cockpit eines Flugzeuges

Fahrkartendialogautomat

PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 9



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1988

Autoren:
Dr. Horst Bienioschek (Abschnitte 13 bis 21)
Dr. Lore Graumann (Abschnitte 13 bis 21)
Prof. Dr. sc. Hansjoachim Lechner (Abschnitte 4 bis 7)
Dr. sc. Lothar Meyer (Abschnitte 1, 3, 4, 7 bis 12)
Dr. Ernst Neumann (Abschnitte 4 bis 7)
Dr. Werner Riehl (Abschnitte 2, 3)
Leiter des Autorenkollektivs: Prof. Dr. Manfred Wünschmann

Redaktion: Werner Golm, Bettina Rosenkranz

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

ISBN 3-06-020910-3

2. Auflage
© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1987
Lizenz-Nr. 203/1000/88 (DN 020910-2)
Printed in the German Democratic Republic
Schrift: 9/10 Maxima, TVS
Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden
Illustrationen: Helmut Mahnke
Technische Zeichnungen: Heinrich Linkwitz
Einband: Manfred Behrendt/Helmut Mahnke
Typografische Gestaltung: Hansmartin Schmidt
Redaktionsschluß: 10. November 1987
LSV 0681
Bestell-Nr. 731 315 1
Schulpreis DDR: 2,20

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

Statische Felder 6

1 Elektrisches Feld 7
2 Magnetisches Feld 13
3 Wiederholung und Übung 24

Elektromagnetische Induktion 25

4 Das Induktionsgesetz 26
5 Wechselstromgenerator und Transformator 35
6 Wirbelströme und Selbstinduktion 46
7 Wiederholung und Übung 50

Elektrische Leitungsvorgänge 52

8 Gesetze in elektrischen Stromkreisen 53
9 Elektrische Leitungsvorgänge in Metallen und in leitenden Flüssigkeiten 60
10 Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum 63
11 Elektrische Leitungsvorgänge in Halbleitern 73
12 Wiederholung und Übung 89

MECHANIK

Kinematik 92

13 Mechanische Bewegungen 93
14 Bewegungen mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit 98
15 Bewegungen mit veränderlichem Betrag der Geschwindigkeit 104
16 Wiederholung und Übung 121

Dynamik 123

17 Wechselwirkungsgesetz und Trägheitsgesetz 124
18 Newtonsches Grundgesetz 131
19 Kräfte bei der Kreisbewegung 139
20 Mechanische Arbeit und mechanische Energie 144
21 Wiederholung und Übung 155

Lösungen 157
Register 159

Quellenverzeichnis der Abbildungen

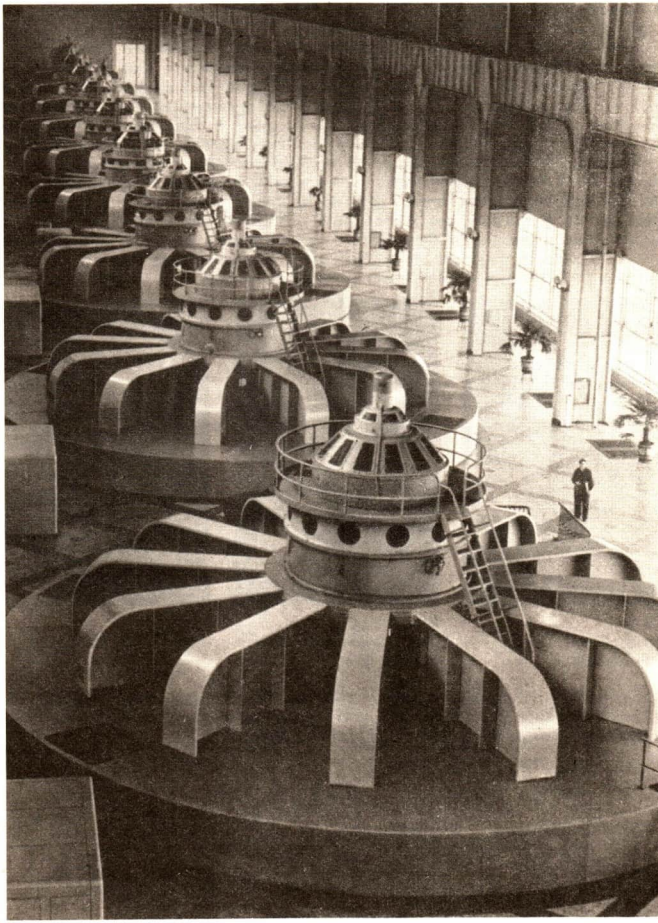
M. Bark, Berlin: 44/1, 53/1, 98/1, 100/1, 131/1 · Deutsche Fotothek, Dresden: 145/2 · Film- und Bildstelle der Humboldt-Universität zu Berlin: 35/2, 37/1, 39/1, 40/2, 47/2 · Foto-Heinrich, Wismar: 126/1 · Haus der DSF Berlin, Bildstelle: 5/1 · Karl-Sudhoff-Institut, Leipzig: 123/1 · Leitstelle für Kraftfahrzeug-Bauvorschriften der DDR, Karl-Marx-Stadt: 136/1 · L. Meyer, Potsdam: 65/1, 81/1, 83/1, 86/2 · G. Roye, Halle: 23/1 · M. Seifert, Berlin: 48/1, 141/2 · VWV/Archiv: 6/1, 6/2, 6/3, 7/1, 13/1, 16/1, 17/1a, 34/1, 34/2, 37/2, 46/1, 47/1, 73/1, 87/1, 92/1, 93/1, 123/2 · ZB: 16/1, 26/1, 35/1, 52/1, 63/1, 87/2, 91/1, 98/2, 98/3, 101/2, 104/1, 114/2, 124/1,139/1, 141/1, 144/1,145/1

Im Lehrbuch verwendete Symbole

- ▼ Experimente
- ▼ Schülerexperimente
- ▶ Merksätze
- ■ Beispiele
- ① Fragen und Aufträge
- ↗ siehe

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

ELEKTRIZITÄTSLEHRE



Statische Felder

Elektrische und magnetische Erscheinungen sind den Menschen seit vielen Jahrhunderten bekannt.
Doch erst ab Mitte des 16. Jahrhunderts begann ihre systematische Erforschung. Der englische Arzt und Naturforscher Gilbert (Bild 6/1) stellte fest, daß Körper aus verschiedenen Stoffen sich beim Reiben elektrisch aufladen. Er untersuchte auch die Eigenschaften von Magneten. Otto von Guericke (1602 bis 1686) baute die erste Elektrisiermaschine zur Trennung von Ladungen. Coulomb (Bild 6/2) fand ein Gesetz über die Kraft, mit der sich elektrisch geladene Körper anziehen oder abstoßen. In zunehmendem Maße wurden Geräte zur Trennung, Speicherung und Messung elektrischer Ladungen entwickelt. Dies alles diente der Untersuchung des Wesens elektrischer und magnetischer Erscheinungen. Doch erst die Untersuchungen von André-Marie Ampère (1755 bis 1836), Oersted (Bild 6/3) und Michael Faraday (1791 bis 1867) schufen die entscheidenden Grundlagen für die Anwendung des Wissens über elektrische und magnetische Felder in Technik und Produktion. Auf diesen Grundlagen beruhen Aufbau und Wirkungsweise von Kondensatoren, Elektromagneten, Elektromotoren, Generatoren (Bild 5/1 zeigt Generatoren im Maschinensaal des Dneprowsker Wasserwerkes.) und Transformatoren.

Bild 6/1
William Gilbert
(1544 bis 1603)

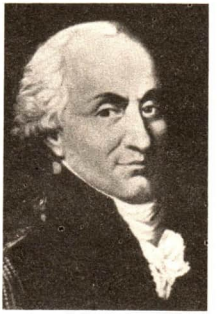


Bild 6/2
Charles Augustin de Coulomb
(1736 bis 1805)

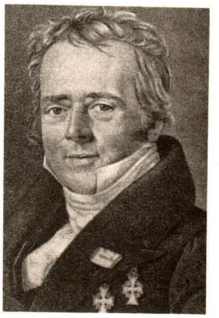
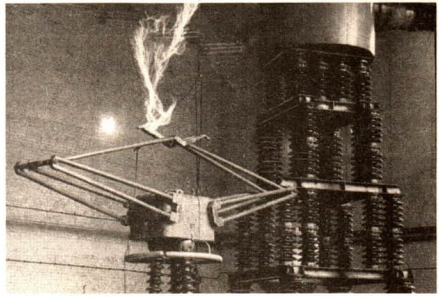


Bild 6/3
Hans-Christian Oersted
(1777 bis 1851)

Wir werden uns mit *elektrischen Feldern zwischen ruhenden elektrischen Ladungen* und mit *konstanten magnetischen Feldern um Dauermagnete* und *stromdurchflossene Leiter* beschäftigen. Solche Felder nennt man *statische Felder.*

In Laboratorien werden starke elektrische Felder erzeugt, um Isolatoren auf ihre Durchschlagsfestigkeit zu prüfen. Elektrische Felder sind bei Gewittern zwischen verschiedenen Wolken sowie zwischen Wolken und Erde vorhanden. Sie existieren auch im Raum zwischen den Platten eines geladenen Plattenkondensators und in elektrischen Stromkreisen, wenn eine Spannung anliegt. Was ist ein elektrisches Feld, und wie kann es beschrieben werden?



Elektrische Ladung

Wir wissen bereits:

- Es gibt positive und negative elektrische Ladungen. Die Träger der kleinsten elektrischen Ladungen sind Protonen und Elektronen.
- Ladungstrennung kann erfolgen, wenn es durch Reibung zu einer engen Berührung zweier Nichtleiter kommt.
- Körper mit Elektronenüberschuß sind negativ geladen, Körper mit Elektronenmangel sind positiv geladen.
- Zwischen ungleichartig geladenen Körpern besteht eine elektrische Spannung.
- Körper mit gleichartigen elektrischen Ladungen stoßen sich ab, Körper mit ungleichartigen elektrischen Ladungen ziehen sich an.
- Der Nachweis von elektrischen Ladungen erfolgt mit Elektroskopen (Bild 7/2). ① ② ③ ④

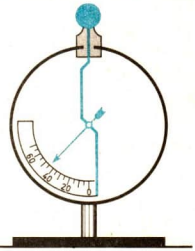


Bild 7/2 Elektroskop

① Skizzieren und beschreiben Sie den Aufbau eines Wasserstoffatoms, eines Kohlenstoffatoms und eines Aluminiumatoms!

② Erläutern Sie Vorgänge des Alltags, bei denen elektrische Ladungen getrennt werden und demzufolge Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern auftreten! Gehen Sie dabei auf Eigenschaften elektrischer Ladungen ein!

③ Beschreiben Sie anhand von Bild 7/2 den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise eines Elektroskops!

④ Wie kann man feststellen,
a) ob ein Körper elektrisch geladen ist; b) ob er positiv oder negativ geladen ist?

Physikalische Bedeutung, Formelzeichen und Einheit der elektrischen Ladung. Körper können mehr oder weniger stark geladen sein. Um das genauer zu kennzeichnen, wird in der Physik die physikalische Größe *elektrische Ladung* genutzt. Die elektrische Ladung eines Körpers gibt an, wie groß dessen Elektronenüberschuß oder Elektronenmangel ist. Das Formelzeichen für die elektrische Ladung ist Q. Je größer die elektrische Ladung eines Körpers ist, desto größer ist dessen Elektronenmangel oder Elektronenüberschuß.

Wenn wir zwei ungleichartig geladene Platten durch einen Leiter miteinander verbinden, dann erfolgt ein Ladungsausgleich. Es fließt kurzzeitig ein elektrischer Strom. Auch im elektrischen Stromkreis wird elektrische Ladung transportiert. Welcher Zusammenhang besteht in einem Stromkreis zwischen der transportierten elektrischen Ladung, der Stromstärke und der Zeitdauer des Stromflusses? Dazu wird der elektrische Strom mit einer Wasserströmung in einem Rohr verglichen. Die durch einen Rohrquerschnitt hindurchfließende Wassermenge ist um so größer, je größer die Stärke der Strömung und je länger die Zeit sind (Bild 8/1). Analog dazu ist in einem elektrischen Leiter die durch einen Leiterquerschnitt transportierte elektrische Ladung um so größer, je größer die elektrische Stromstärke und je länger die Zeit sind (Bild 8/2).

Fließt in der Zeit t die konstante Stromstärke I, dann beträgt die transportierte elektrische Ladung $Q = I \cdot t$.

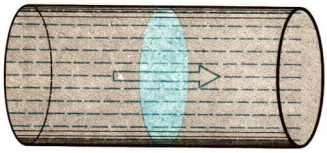


Bild 8/1 Wasserströmung

Bild 8/2 Elektrischer Strom

Als Einheit der elektrischen Ladung ergibt sich eine Amperesekunde (1 A · s). In Würdigung der Leistungen des französischen Physikers Coulomb wurde die Einheit der elektrischen Ladung **ein Coulomb (1 C)** benannt: ① ②

$1\ A \cdot s = 1\ C$.

In der Elektrotechnik ist es häufig erforderlich, elektrische Ladungen zu speichern. Dazu werden *Kondensatoren* verwendet.

Sie bestehen im einfachsten Fall aus zwei metallischen Platten (Bild 8/3), zwischen denen sich ein Nichtleiter befindet. In der Technik verwendet man anstelle der Platten zumeist Metallfolien, die zu langen Bändern geformt, aufgewickelt und in einem Gehäuse untergebracht werden.

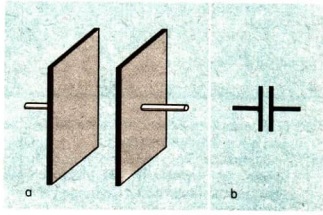


Bild 8/3 a) Plattenkondensator
b) Schaltzeichen für einen Kondensator

Elementarladung. Elektrische Ladungen sind nicht beliebig teilbar. Untersuchungen haben ergeben, daß Elektronen und Protonen die kleinste elektrische Ladung tragen. Diese

elektrische Ladung wird als Elementarladung e bezeichnet. Sie beträgt $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Die elektrische Ladung Q eines Körpers ist stets ein Vielfaches der Elementarladung e. ③ ④

Zusammenfassung

Die elektrische Ladung eines Körpers gibt an, wie groß dessen Elektronenüberschuß oder Elektronenmangel ist.

Formelzeichen: Q **Einheit: 1 C** **$1\,C = 1\,A \cdot s$**

Es gilt: $Q = I \cdot t$ (Gültigkeitsbedingung: I = konstant)
Die elektrische Ladung Q eines Körpers ist ein Vielfaches der Elementarladung e.

Beschreibung elektrischer Felder

Kräfte auf elektrisch geladene Körper. Wir wissen, daß zwischen elektrisch geladenen Körpern elektrische Felder existieren. Elektrische Felder können wir nicht wahrnehmen, wir können sie aber mit geeigneten Hilfsmitteln nachweisen. Bringt man elektrisch geladene Körper in ein elektrisches Feld, so greifen an diesen Körpern Kräfte an. Je stärker das Feld ist, desto größer sind die auf die Körper wirkenden Kräfte. Die Richtung dieser Kräfte hängt von der Art der elektrischen Ladungen der Körper ab (Bild 9/1).

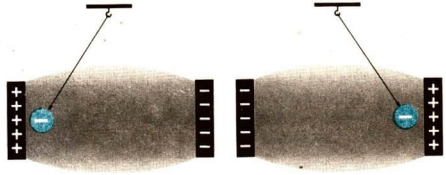


Bild 9/1 Kraft auf einen elektrisch geladenen Körper im elektrischen Feld

Kräfte auf elektrisch ungeladene Körper. Auch elektrisch ungeladene Körper werden im elektrischen Feld beeinflußt.

1 ▼ Ein Plastestab wird mit einem Tuch gerieben und dadurch aufgeladen. Bringt man ihn in die Nähe kleiner Papierstücke, so werden diese angezogen, obwohl sie nicht geladen sind.

Im elektrischen Feld wirken auf die in jedem Körper vorhandenen Ladungsträger Kräfte. Dadurch kommt es zu Verschiebungen der Ladungsträger und zu Kräften auf elektrisch

---

① Geben Sie für die Gleichung $Q = I \cdot t$ den jeweils zwischen zwei Größen bestehenden Zusammenhang und die konstant zu haltende Größe an!
② Durch eine Glühlampe fließt ein Strom mit einer Stromstärke von 0,4 A. Wie groß ist die elektrische Ladung, die in einer halben Stunde durch die Glühlampe transportiert wird?
③ Durch einen Leiterquerschnitt wird die elektrische Ladung 1 C transportiert.
Wie groß ist die Anzahl der Elektronen, die durch den Leiterquerschnitt hindurchtreten?
④ Wieviel Elektronen muß man einem elektrisch neutralen Körper entziehen, damit dieser die elektrische Ladung 1 C hat?

ungeladene Körper. Längliche Körper werden gedreht und nehmen eine bestimmte Richtung ein.

▶ **Im Raum zwischen elektrisch geladenen Körpern besteht ein elektrisches Feld. Es ist eine real existierende Erscheinung und läßt sich durch Kräfte auf elektrisch geladene Körper nachweisen.**
Elektrisch ungeladene Körper werden durch elektrische Felder ebenfalls beeinflußt.

Energie des elektrischen Feldes. Wenn wir die Platten eines geladenen Kondensators durch einen Leiter miteinander verbinden, fließt kurzzeitig ein elektrischer Strom. Der Leiter erwärmt sich geringfügig. Verbinden wir die beiden Platten eines geladenen Kondensators mit einer Glimmlampe, so leuchtet diese kurz auf. In beiden Fällen wird elektrische Energie in andere Energieformen umgewandelt. Diese Energie entstammt dem elektrischen Feld zwischen den Platten des geladenen Kondensators. Daraus und aus der Tatsache, daß in einem elektrischen Feld auf elektrisch geladene Körper Kräfte wirken, können wir schlußfolgern:

▶ **Im geladenen Kondensator ist Energie gespeichert. Jedes elektrische Feld besitzt Energie.**

In den von uns betrachteten Beispielen ist die Feldenergie gering. Sie kann aber in anderen Fällen, beispielsweise bei elektrischen Feldern zwischen Wolken oder in Hochspannungsprüfanlagen, auch große Werte annehmen.

Feldlinienbild des elektrischen Feldes. Mit einfachen Hilfsmitteln ist es möglich, sich eine anschauliche Vorstellung von elektrischen Feldern zu verschaffen.

2 ▼ In den Raum zwischen zwei metallischen Platten werden Grießkörnchen gebracht, die auf Öl schwimmen. Werden die Platten verschiedenartig aufgeladen, so ordnen sich die Grießkörnchen in bestimmter Weise (Bild 10/1a).

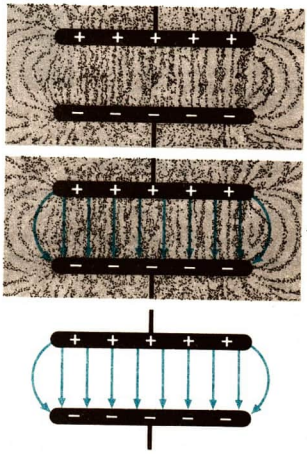


Bild 10/1 Feldlinienbild des elektrischen Feldes zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Platten

Entlang der geordneten Grießkörnchen lassen sich Linien zeichnen (Bild 10/1b). Diese Linien nennt man *Feldlinien*. Die Bilder 10/1c, 11/1 und 11/2 zeigen die Feldlinienbilder verschiedener elektrischer Felder.

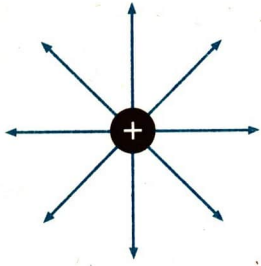


Bild 11/1 Feldlinienbild des elektrischen Feldes um eine elektrisch geladene Kugel

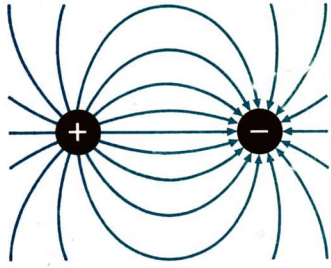


Bild 11/2 Feldlinienbild des elektrischen Feldes zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Kugeln

Das Feldlinienbild ist eine Vereinfachung der Wirklichkeit und damit ein Modell des elektrischen Feldes. Welche Aussagen über das elektrische Feld können wir diesem Modell entnehmen? Der Vergleich zwischen dem Modell und durchgeführten Messungen zeigt:

- Aus dem Verlauf der Feldlinien läßt sich erkennen, in welcher *Richtung* die Kraft auf einen elektrisch geladenen Körper in den verschiedenen Punkten eines elektrischen Feldes wirkt (Bild 11/3).
- Aus dem Abstand der Feldlinien lassen sich Aussagen über *die Stärke des Feldes ableiten*. Vereinbarungsgemäß gilt: Je stärker das Feld ist, desto dichter werden die Feldlinien gezeichnet.

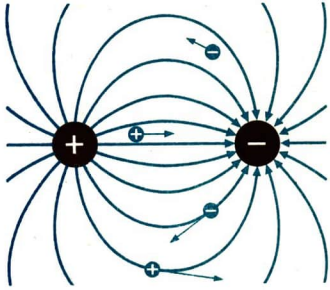


Bild 11/3

Verlaufen die Feldlinien parallel und haben sie gleichen Abstand voneinander, so spricht man von einem *homogenen Feld*. Ist dies nicht der Fall, so nennt man das Feld *inhomogen*. ①

Im Feldlinienbild kommen nicht alle Merkmale des realen Feldes zum Ausdruck. So existiert beispielsweise das elektrische Feld nicht nur in der Ebene, in der die Feldlinien ge-

---

① Geben Sie an, ob die Bilder 10/1c, 11/1 und 11/2 Feldlinienbilder von homogenen oder inhomogenen Feldern sind!
Begründen Sie Ihre Antwort!

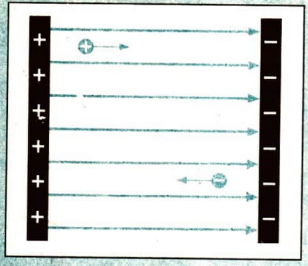
zeichnet sind, sondern im gesamten Raum zwischen den elektrisch geladenen Körpern. Es existiert auch an den Stellen, an denen keine Feldlinien gezeichnet sind.

▶ **Ein Feldlinienbild ist ein Modell des elektrischen Feldes. Aus ihm kann man die Richtung der Kraft auf einen elektrisch geladenen Körper und die Stärke des Feldes in verschiedenen Punkten erkennen.**

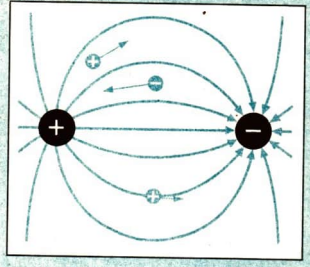
①

Zusammenfassung

Im Raum zwischen elektrisch geladenen Körpern besteht ein elektrisches Feld. Jedes elektrische Feld besitzt Energie. Zur Beschreibung elektrischer Felder werden Feldlinienbilder genutzt. Aus ihnen lassen sich die Richtung der Kraft auf elektrisch geladene Körper und die Stärke des Feldes in verschiedenen Punkten erkennen.



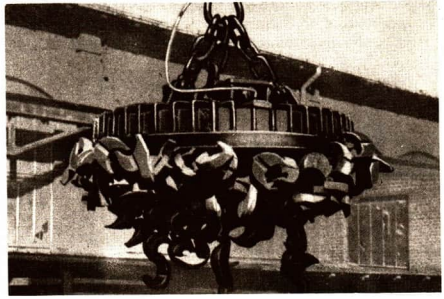
Homogenes Feld



Inhomogenes Feld

① Nennen Sie Modelle, die Sie im bisherigen Physikunterricht kennengelernt haben! Erläutern Sie eines dieser Modelle genauer! Gehen Sie dabei auf die Bedeutung von Modellen ein!

Magnetische und elektromagnetische Bauelemente werden vielfach eingesetzt. Dauermagnete finden wir u. a. als Magnetnadel im Kompaß oder als Feldmagnet in kleinen Motoren und Generatoren. Elektromagnete werden beispielsweise als Lastenhebemagnete, beim Relais, bei großen Elektromotoren und Generatoren verwendet.
Welche Eigenschaften haben solche Magnete, und wie kann ein Magnetfeld beschrieben werden?



Grunderscheinungen des Magnetismus

Magnete. In der Natur kommen Stoffe vor, z. B. Magneteisenstein, die in der Nähe befindliche Körper aus Eisen anziehen. Solche Magnete wurden schon im Altertum benutzt. Heute stehen uns kräftige Dauer- und Elektromagnete zur Verfügung (Bild 13/2).

Bild 13/2 a) Stabmagnet b) Kompaßnadel c) Hufeisenmagnet d) Manipermmagnet e) Elektromagnet

Aus planmäßigen Untersuchungen ergeben sich folgende grundlegende
Eigenschaften von Magneten:
- Jeder Magnet hat 2 Pole, die sich nicht voneinander trennen lassen.
- Wird ein Stabmagnet leicht drehbar aufgehängt, so stellt er sich annähernd in Nord-Süd-Richtung ein. Dabei weist immer derselbe Pol nach Norden. Dieser wird magnetischer **Nordpol**, der andere magnetischer **Südpol** genannt (Bild 13/3).

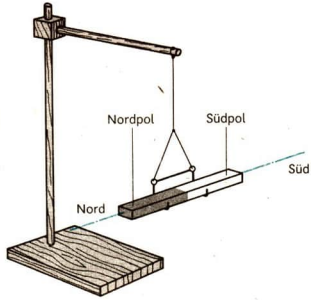


Bild 13/3

- Zwischen Magneten und Körpern aus Eisen, Nickel oder Kobalt treten Kräfte auf. Diese Stoffe werden *ferromagnetische Stoffe* genannt (Bild 14/1).
- Die Kraft zwischen Stabmagneten und Körpern aus ferromagnetischen Stoffen ist am größten an den Magnetpolen, die sich in der Nähe der Stabenden befinden. In der Stabmitte ist keine Kraft festzustellen (Bild 14/2).
- Magnete üben aufeinander Kräfte aus. Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an (Bild 14/3).

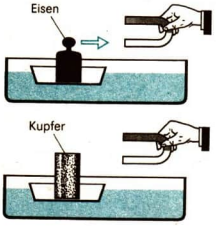


Bild 14/1

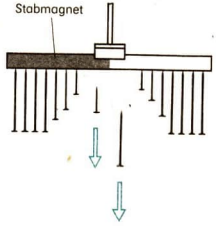


Bild 14/2

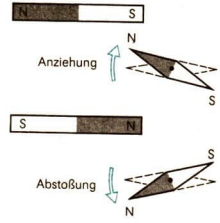


Bild 14/3

Stromdurchflossene Leiter in der Nähe von Magneten. Wir wissen, daß zwischen Magneten Kräfte auftreten und daß stromdurchflossene Leiter magnetische Wirkungen zeigen. Treten auch zwischen Magneten und stromdurchflossenen Leitern Kräfte auf?

3 ▼ Ein Leiterstück wird zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten so befestigt, daß es frei schwingen kann (Bild 14/4). Die Enden des Leiters werden mit einer Spannungsquelle verbunden. Sobald durch den Leiter ein elektrischer Strom fließt, wird er aus seiner Ruhelage ausgelenkt. Benutzen wir an Stelle des Dauermagneten einen Elektromagneten, so können wir den gleichen Effekt feststellen.

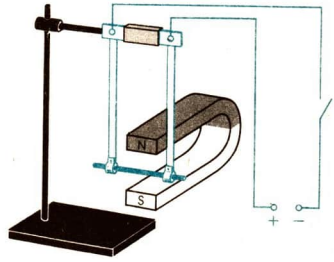


Bild 14/4 Experimentieranordnung

Zwischen einem Magneten und einem stromdurchflossenen Leiter treten Kräfte auf. Dabei muß beachtet werden, daß Kräfte nur in bestimmten Lagen des stromdurchflossenen Leiters in bezug auf den Magneten auftreten.

▶ **Dauer- und Elektromagnete haben einen Nord- und einen Südpol, die sich nicht voneinander trennen lassen.**
Zwischen Magneten und Körpern aus ferromagnetischen Stoffen treten stets anziehende Kräfte, zwischen Magneten treten entweder anziehende oder abstoßende Kräfte auf.

① ② ③

Eigenschaften und Beschreibungen magnetischer Felder

Das magnetische Feld. Wir konnten feststellen, daß zwischen stromdurchflossenen Leitern, Magneten und Körpern aus ferromagnetischen Stoffen Kräfte auftreten, ohne daß die Körper einander berühren. Wie ist das möglich? Wir erinnern uns: Auch zwischen elektrisch geladenen Körpern wirken Kräfte, ohne daß die Körper einander berühren. Wir konnten diese Erscheinung durch das Vorhandensein eines *elektrischen Feldes* zwischen elektrisch geladenen Körpern erklären. Es liegt deshalb nahe, daß wir das Bestehen eines **magnetischen Feldes** im Raum um Magnete und stromdurchflossene Leiter annehmen.
Magnetische Felder können wir mit unseren Sinnen nicht wahrnehmen, wir können sie aber mit geeigneten Hilfsmitteln nachweisen und untersuchen.

Ausrichten von Magneten im Magnetfeld. Wir beobachten, wie sich kleine Magnete (Magnetnadeln) im Magnetfeld verhalten.

4 ▼ Wir bringen in das Magnetfeld eines Stabmagneten eine kleine, drehbar gelagerte Magnetnadel. Wir stellen dabei fest, daß sie sich an jeder Stelle des Feldes in bestimmter Weise einstellt (Bild 15/1).

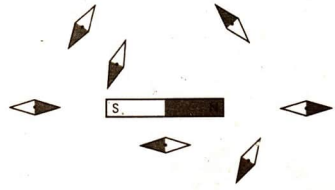


Bild 15/1 Ausrichten von Magnetnadeln im Magnetfeld eines Stabmagneten

5 ▼ Wir bringen in das Magnetfeld eines vertikalen stromdurchflossenen Leiters Magnetnadeln. Wieder beobachten wir eine Ausrichtung (Bild 15/2).

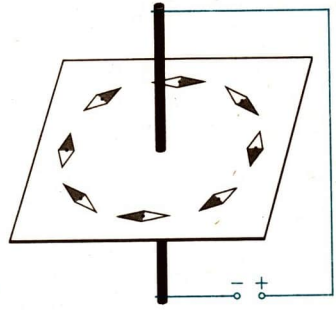


Bild 15/2 Ausrichten von Magnetnadeln im Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

Die Experimente zeigen: In einem Magnetfeld richtet sich eine Magnetnadel in bestimmter Weise aus.

---

① Wie können Sie ohne Hilfsmittel feststellen, welcher von zwei äußerlich gleichen Stäben (Stabmagnet und unmagnetischer Eisenstab) der Stabmagnet ist?
② Um das Getriebeöl beim Trabant vom Metallabrieb zu reinigen, ist die Ölablaßschraube mit einem Keramikmagneten versehen. Erläutern Sie die Wirkungsweise dieser Anordnung!
③ Schranktüren sind oft mit Magnetschlössern versehen. Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise dieser Anordnung!

Beeinflussung von ferromagnetischen Stoffen im Magnetfeld. Wie wird ein Körper aus ferromagnetischem Stoff, z. B. ein drehbar gelagerter Eisenstab, in einem Magnetfeld beeinflußt?

6

▼ Wir bringen einen drehbar gelagerten Eisenstab, dessen Enden gekennzeichnet sind, in das Feld eines Magneten. Wir beobachten eine Ausrichtung des Eisenstabes.

Weitere Untersuchungen zeigen: Körper aus ferromagnetischen Stoffen werden im Magnetfeld selbst zu Magneten. Drehbar gelagerte Körper aus ferromagnetischen Stoffen richten sich im Magnetfeld aus. ①

Magnetische Werkstoffe. Für viele technische Geräte und Anlagen werden magnetische Werkstoffe benötigt. In Abhängigkeit von ihrem Verwendungszweck müssen diese verschiedene Eigenschaften haben.
Für die Herstellung von Dauermagneten werden Werkstoffe benötigt, die ihren Magnetismus beibehalten.

■ Solche Werkstoffe werden in dem VEB Keramische Werke Hermsdorf hergestellt. Bild 16/1 zeigt verschiedene *keramische Magnete.* Sie werden z. B. in Fahrraddynamos, elektrischen Meßgeräten, Lautsprechern und als Haftmagnete verwendet.
Bei Relais, Transformatoren und Elektromagneten werden Materialien benötigt, die sich zwar leicht magnetisieren lassen, ihren Magnetismus aber auch schnell wieder verlieren. Dieses Material wird als *Weicheisen* bezeichnet.

Bild 16/1 Keramische Magnete

Energie des magnetischen Feldes. In den Experimenten 4 bis 6 wurde gezeigt, daß Körper im Magnetfeld bewegt werden. Die dazu notwendige Arbeit entstammt der Energie, die im Magnetfeld gespeichert ist. Bei diesen Vorgängen findet also eine Umwandlung von Energie des magnetischen Feldes in mechanische Energie statt.
Auch beim Aufbau eines Magnetfeldes erfolgt eine Energieumwandlung.
So wird z. B. beim Einschalten eines Elektromagneten ein Teil der elektrischen Energie in Energie des magnetischen Feldes umgewandelt. Beim Ausschalten des Elektromagneten steht diese Energie für weitere Umwandlungen zur Verfügung.

▶ **Im Raum um Dauermagnete und stromdurchflossene Leiter besteht ein magnetisches Feld. Es ist eine real existierende Erscheinung und läßt sich durch das Ausrichten magnetischer Körper und durch eine magnetische Beeinflussung unmagnetischer Körper aus ferromagnetischen Stoffen erkennen.**
Das magnetische Feld ist Träger von Energie.

②

Das Feldlinienbild des magnetischen Feldes. Durch das Feldlinienbild kann ein magnetisches Feld modellhaft dargestellt werden. Wir entwickeln Feldlinienbilder aus der Anordnung von Eisenfeilspänen im magnetischen Feld.

7 ▼ Ein Hufeisenmagnet wird mit einem Blatt Zeichenkarton bedeckt. Auf den Karton werden Eisenfeilspäne gestreut. Die Eisenteilchen ordnen sich zu Ketten.

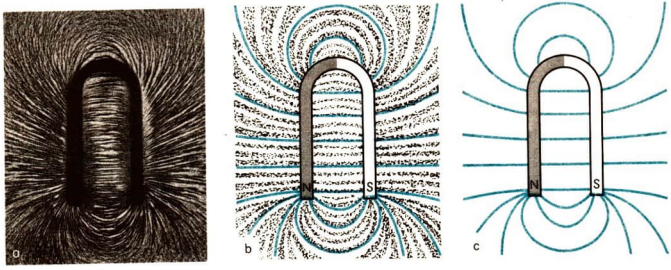


Bild 17/1 Entwicklung eines Feldlinienbildes: a) Anordnung von Eisenfeilspänen im Feld eines Hufeisenmagneten, b) Auswahl einiger Ketten, c) Feldlinienbild

Wir übertragen den Verlauf der einzelnen Ketten in eine Zeichnung (Bild 17/1). Die Gesamtheit der gezeichneten Linien bildet, ähnlich wie beim elektrischen Feld, das Feldlinienbild.

▶ **Das Feldlinienbild des Magnetfeldes ist ein Modell des real existierenden Feldes.**

In den Bildern 17/2 bis 17/4 sind die Feldlinienbilder verschiedener Anordnungen dargestellt.

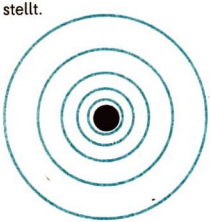


Bild 17/2 Feldlinienbild eines stromdurchflossenen Leiters. Der Leiter steht senkrecht auf der Ebene der Feldlinien.

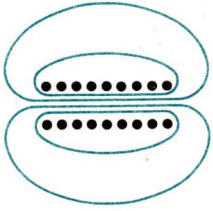


Bild 17/3 Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule

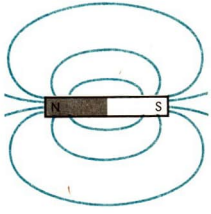


Bild 17/4 Feldlinienbild eines Stabmagneten

① Erläutern Sie, warum Eisen von einem Magneten angezogen wird!
② Begründen Sie, warum das Magnetfeld Träger von Energie ist!

Was sagen uns diese Feldlinienbilder?

- Sie geben an, wie sich eine Magnetnadel an den verschiedenen Punkten im magnetischen Feld ausrichtet.
- Sie geben Auskunft über die Stärke des Feldes: Dort, wo die Stärke des Feldes größer ist, liegen die Feldlinien dichter. Wie beim elektrischen Feld unterscheidet man *homogene* und *inhomogene* Felder.

■ Das magnetische Feld im Innern einer stromdurchflossenen Spule ist annähernd homogen, in der Umgebung ist es inhomogen (Bild 17/3).

Vergleicht man die Form der Feldlinienbilder einer stromdurchflossenen Spule und eines Stabmagneten miteinander (Bilder 17/3 und 17/4), so ist festzustellen:

▶ **Die magnetischen Felder in der Umgebung einer stromdurchflossenen Spule und in der Umgebung eines Stabmagneten haben die gleiche Form.**

① ② ③

Das Magnetfeld der Erde. Die Erde ist ein Magnet. Ein magnetischer Pol liegt im Südpolargebiet, der andere in Nordkanada. Den ungefähren Verlauf der Feldlinien des erdmagnetischen Feldes zeigt Bild 18/1.
Schon seit langem werden zur Überwachung der Form und Stärke des magnetischen Feldes der Erde ständig Messungen durchgeführt. Dabei ergab sich, daß Form und Stärke zeitlich und örtlich schwanken. In der DDR befindet sich ein magnetisches Observatorium in Niemegk bei Potsdam. Das Magnetfeld der Erde wird auch mittels Satelliten erkundet.
Das Magnetfeld der Erde ermöglicht die Verwendung eines *Magnetkompasses*.

④

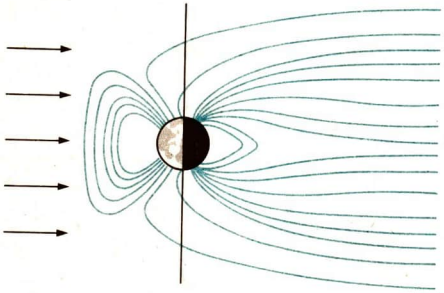


Bild 18/1 Feldlinienbild des Magnetfeldes der Erde. Durch den „Sonnenwind" (Pfeile) ist das Magnetfeld stark deformiert (blaue Linien).

Kraft auf einen Körper im Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Der wesentliche Teil eines Elektromagneten ist eine Spule. Wovon ist die Kraft abhängig, die auf einen Körper im Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule wirkt?

8

Aufgabe

Untersuchen Sie die Kraft F auf einen Dauermagneten im Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule in Abhängigkeit von der Erregerstromstärke I und der Windungsanzahl N der Spule!

Vorbereitung

1. Bereiten Sie ein Protokoll vor!
2. Entwerfen Sie je eine Meßwertetabelle für die Untersuchung
   a) der Abhängigkeit der Kraft F von der Erregerstromstärke I,
   b) der Abhängigkeit der Kraft F von der Windungsanzahl N!

   Geben Sie für jede der beiden Untersuchungen an, welche physikalische Größe jeweils konstant gehalten werden muß!

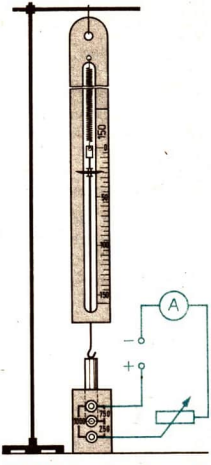


Bild 19/1 Experimentieranordnung

Durchführung

1. Bauen Sie die Experimentieranordnung nach Bild 19/1 auf! Beachten Sie: Bei jeder Messung muß der Dauermagnet durch Verschieben des Federkraftmessers so eingestellt werden, daß er jeweils gleich tief in die Spule eintaucht!
2. Messen Sie die Abhängigkeit der Kraft F von der Erregerstromstärke I bei einer Windungsanzahl $N = 1000$!
   Verwenden Sie die Buchsenkombination 0–12!
   Die Erregerstromstärke soll 0 A, 0,2 A, 0,4 A und 0,6 A betragen.
3. Messen Sie die Abhängigkeit der Kraft F von der Windungsanzahl N bei einer Erregerstromstärke von $I = 0{,}6$ A!
   Verwenden Sie die Buchsenkombination 0–12!
   Es stehen Spulen mit einer Windungsanzahl von 500, 750 und 1000 zur Verfügung.

Auswertung

1. Zeichnen Sie das F-I-Diagramm! Geben Sie in Worten an, welcher Zusammenhang zwischen der Kraft F auf den Körper und der Erregerstromstärke I besteht!
2. Zeichnen Sie das F-N-Diagramm! Geben Sie in Worten an, welcher Zusammenhang zwischen der Kraft F und der Windungsanzahl N der Spule besteht!

Das Ergebnis des Experiments 8 ist im Merksatz (↗ S. 21) angegeben.

Außer der Erregerstromstärke I und der Windungsanzahl N kann auch der Stoff verändert werden, der sich in der Spule befindet. Im Experiment 8 befand sich in der Spule Luft. Wie verändert sich die Kraft, wenn wir die Spule mit einem Eisenkern versehen?

---

① Woran erkennt man das Vorhandensein eines magnetischen Feldes? Woran erkennt man das Vorhandensein eines elektrischen Feldes? Vergleichen Sie!

② Skizzieren Sie die Feldlinienbilder des magnetischen Feldes eines Stabmagneten und einer stromdurchflossenen Spule! Vergleichen Sie diese miteinander! Wählen Sie fünf Punkte im Feld einer stromdurchflossenen Spule aus und geben Sie an, wie sich dort eine Magnetnadel ausrichtet!

③ In der Nähe eines „schwarzen Kastens" nehmen Magnetnadeln die gezeichneten Stellungen ein (Bild 19/2). Was läßt sich über den Inhalt des Kastens aussagen?

④ Erläutern Sie, warum ein Kompaß, der auf einem Tisch aus Eisen liegt, falsch anzeigt!

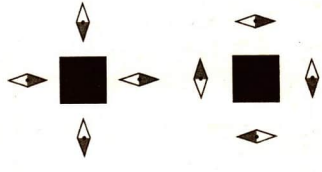


Bild 19/2

9

Wir untersuchen die Kraft auf einen Körper bei einer stromdurchflossenen Spule. Wir unterscheiden

a) ohne Eisenkern,
b) mit einem I-Kern,
c) mit einem U-Kern so, daß der untersuchte Körper den Kern „schließt".

Dieses Experiment und weitere zeigen: Die Kraft einer stromdurchflossenen Spule auf einen Körper aus ferromagnetischem Stoff wird wesentlich größer, wenn die Spule einen Eisenkern besitzt.

Der Elektromagnet

Aufbau eines Elektromagneten. Ein Elektromagnet besteht aus einer Spule mit Eisenkern (Bild 20/1). Die Gestalt des Eisenkerns hängt vom Verwendungszweck des Elektromagneten ab.

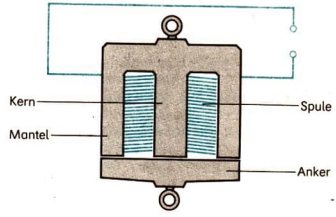


Bild 20/1 Aufbau eines Elektromagneten

Wirkungsweise eines Elektromagneten. Fließt durch die Spule ein elektrischer Strom, so wird die Spule mit Eisenkern zu einem kräftigen Magneten. Die magnetische Polung hängt dabei von der Richtung des Erregerstromes ab. Mit einem solchen Elektromagneten kann man wesentlich stärkere Felder und damit größere Kräfte auf Körper aus ferromagnetischen Stoffen erzeugen als mit einem Dauermagneten. Außerdem hat ein Elektromagnet gegenüber einem Dauermagneten den Vorteil, daß durch eine Änderung der Erregerstromstärke die Kraft auf ferromagnetische Körper verändert werden kann. Schaltet man den Strom aus, so wirkt auch keine Kraft. ① ②

Anwendungen von Elektromagneten. In Stahlwerken und auf Schrottplätzen werden häufig *Lastenhebemagnete* eingesetzt (↗ Bild 13/1). An Stelle eines Greifers besitzen sie einen Elektromagneten. Wenn durch die Spule ein Strom fließt, so können mit dem Kran Eisenteile gehoben und transportiert werden.
Das *Relais* (Bild 20/2) ist ein fernbedienter elektromagnetischer Schalter, der in der Automatisierungstechnik vielfach Anwendung findet (↗ ESP, LB Kl. 9).

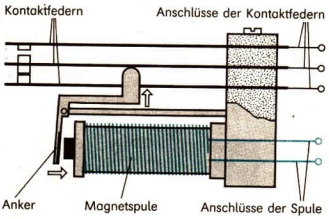


Bild 20/2 Relais

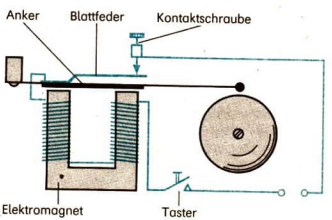


Bild 20/3 Elektrische Klingel

Bei der *elektrischen Klingel* (Bild 20/3) wird ein Metallklöppel durch einen Elektromagneten, dessen Erregerstrom durch Selbststeuerung periodisch ein- und ausgeschaltet wird, in Schwingungen versetzt. ③ ④

Die Kraft auf einen Körper aus ferromagnetischem Stoff im Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ist um so größer, je größer die Erregerstromstärke und die Windungsanzahl der Spule sind. Die Kraft ist größer, wenn die Spule einen Eisenkern besitzt. Eine praktisch wichtige Anwendung sind Elektromagnete. Sie bestehen aus einer Spule mit Eisenkern.

Der Gleichstrommotor

Elektromotoren dienen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen, Straßenbahnen und elektrischen Lokomotiven. Auch im Haushalt finden wir in sehr vielen Geräten Elektromotoren.

Aufbau eines Gleichstrommotors. Ein Gleichstrommotor besteht aus einem *Feldmagneten*, zwischen dessen Polen sich eine drehbar gelagerte Spule mit Eisenkern, der Anker, befindet (Bild 21/1). Auf der Ankerwelle ist der *Kollektor* angebracht. Er besteht im einfachsten Fall aus zwei gegeneinander isolierten Halbringen, die mit jeweils einem Ende der Ankerspule verbunden sind. Auf dem Kollektor schleifen zwei *Kohlebürsten*, über die die Stromzuführung zur Ankerspule erfolgt.

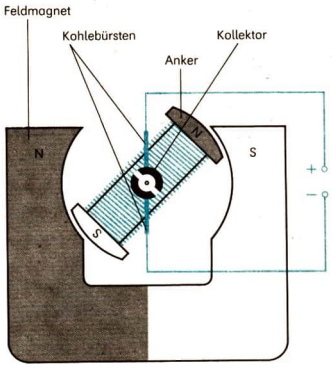


Bild 21/1 Schematischer Aufbau eines Gleichstrommotors

Wirkungsweise eines Gleichstrommotors. Die zwei Kohlebürsten werden mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Über sie fließt Strom durch die Ankerspule. Dadurch wirkt der Anker als Elektromagnet mit der in Bild 22/1a angegebenen Polung. Zwischen den Magnetpolen des Feldmagneten und den Magnetspulen des Ankers treten Kräfte

---

① Nennen Sie Möglichkeiten, wie man die Kraft eines Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule auf einen Körper aus Eisen erhöhen kann!
② Erläutern Sie, warum als Kern eines Elektromagneten nur bestimmte Stoffe verwendet werden können!
③ Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise der elektrischen Klingel!
④ Nennen Sie Beispiele für die Anwendung des Elektromagneten!
Informieren Sie sich dabei bei den Betreuern im polytechnischen Unterricht, in Fachbüchern und in Lexika!

auf. Dadurch dreht sich der Anker in der angegebenen Richtung, bis sich die ungleichnamigen Pole gegenüberstehen.
Jetzt würde der Anker stehenbleiben; die Konstruktion des Kollektors sorgt aber dafür, daß dies nicht geschieht. Zu diesem Zeitpunkt wird der Stromfluß kurzzeitig unterbrochen, da sich die Kohlebürsten gerade auf den Isolierschichten befinden (Bild 22/1b). Der Anker rotiert infolge seiner Trägheit weiter. Die Kohlebürsten gelangen in Kontakt mit dem jeweils anderen Halbring des Kollektors (Bild 22/1c).Der Strom fließt nun in umgekehrter Richtung durch die Ankerspule; die magnetische Polung des Ankers kehrt sich um. Dadurch wird der Anker in der gleichen Richtung weiter angetrieben (Bilder 22/1c und d).
Der in den Bildern 22/1a bis d beschriebene Vorgang wiederholt sich ständig.

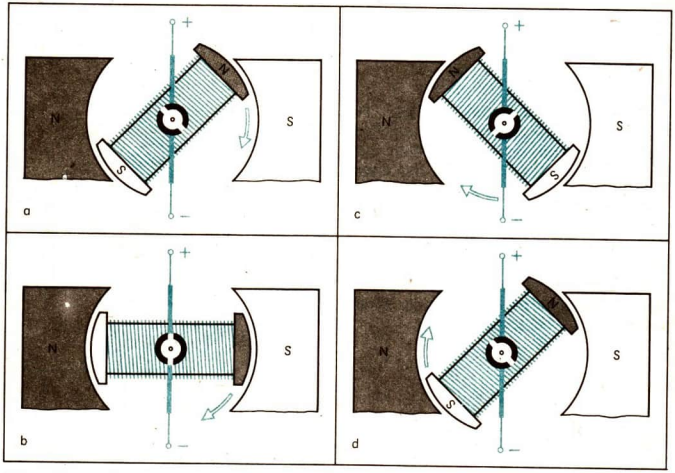


Bild 22/1 Zur Wirkungsweise eines Gleichstrommotors

Für die Anwendung in der Praxis ist eine solche einfache Anordnung wenig brauchbar. Um ein sicheres Anlaufen des Motors, einen gleichmäßigen Lauf und einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, werden z. B. Trommelanker mit vielen versetzt angeordneten Spulen verwendet. Meist wird als Feldmagnet ein Elektromagnet statt eines Dauermagneten eingesetzt (Bild 23/1).
Da sich die Drehzahl von Gleichstrommotoren leicht verändern läßt, werden sie vor allem zum Antrieb von Bahnen und Aufzügen genutzt.

Ein Gleichstrommotor besteht aus einem Feldmagneten, einem Anker, einem Kollektor und zwei Kohlebürsten. Seine Wirkungsweise beruht auf den periodisch gesteuerten anziehenden und abstoßenden Kräften zwischen den Magnetpolen des Feldmagneten und den Magnetpolen des Ankers.

① ② ③

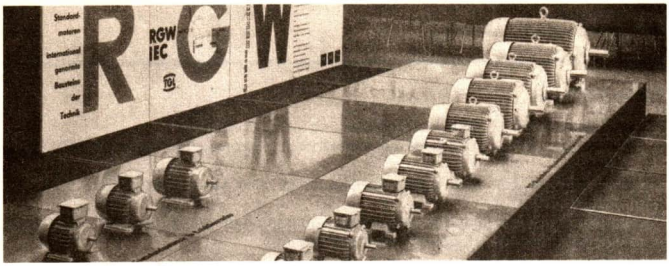


Bild 23/1 Elektromotoren

Zusammenfassung zum elektrischen und magnetischen Feld

Elektrische und magnetische Felder haben folgende Gemeinsamkeiten:
- **Sie bestehen real im Raum.**
- **Ihr Vorhandensein erkennt man an Kräften auf geeignete Körper.**
- **Sie lassen sich durch Feldlinienbilder veranschaulichen.**

Sie haben folgende Unterschiede:

	elektrisches Feld	magnetisches Feld
Das Feld besteht im ...	... Raum zwischen elektrisch geladenen Körpern.	... Raum um Dauermagnete und stromdurchflossene Leiter.
Das Feld hat seinen Ursprung in ...	... ruhenden elektrischen Ladungen.	... Dauermagneten und elektrischen Strömen.
Das Vorhandensein des Feldes ist zu erkennen an ...	... der Kraft auf elektrisch geladene Körper.	... der Ausrichtung von Magnetnadeln; der Kraft auf Eisenkörper und stromdurchflossene Leiter.

① Sagen Sie anhand der Bilder 22/1a bis d voraus, was geschehen würde, wenn sich die Richtung des durch die Ankerspule fließenden Stromes nicht ändern würde!
② Ein Elektromotor hat einen Wirkungsgrad von 90%. Was besagt diese Angabe?
③ Nennen Sie Beispiele für die Verwendung von Elektromotoren in der Technik und im Haushalt!

Elektrisches Feld

1. Eine Glühlampe für 18 V hat eine Leistung von 5,0 W.
   a) Wie groß ist die Stromstärke des elektrischen Stromes, der durch die Glühlampe fließt?
   b) In welcher Zeit wird durch die Glühlampe eine elektrische Ladung von 1,0 C transportiert?
2. Welche Aussagen über das elektrische Feld kann man den in den Bildern 24/1 und 24/2 dargestellten Feldlinienbildern entnehmen?

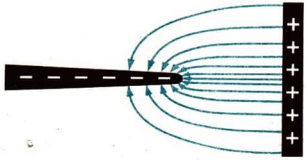


Bild 24/1

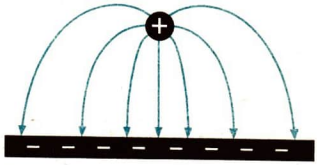


Bild 24/2

3. Übernehmen Sie Bild 24/3 ins Heft und zeichnen Sie die Kräfte ein, die auf die elektrisch geladenen Körper im elektrischen Feld wirken! Alle Körper im Feld tragen eine gleich große elektrische Ladung.

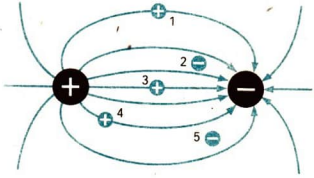


Bild 24/3

Magnetisches Feld

4. Nennen und beschreiben Sie Grunderscheinungen des Magnetismus!
5. Woran erkennt man das Vorhandensein eines magnetischen Feldes?
6. Nennen Sie Unterschiede zwischen dem magnetischen Feld und dem Feldlinienbild des magnetischen Feldes!
7. Wie kann man das Feldlinienbild eines magnetischen Feldes gewinnen? Welche Aussagen kann man dem Feldlinienbild entnehmen?
8. Beschreiben Sie den Aufbau eines Gleichstrommotors und erklären Sie dessen Wirkungsweise!
9. Nennen Sie die Energieumwandlungen, die sich beim Elektromotor vollziehen!
10. Eiserne Zäune, Ofenrohre und andere Körper aus Eisen sind ständig im Magnetfeld der Erde. In welchem magnetischen Zustand müßten sich diese Körper befinden? Wie könnten Sie Ihre Annahme überprüfen?
11. Körper aus Eisen, Kupfer und Aluminium seien mit einem Farbüberzug versehen. Nennen Sie Möglichkeiten, um die Körper aus Eisen herauszufinden!
12. Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede bestehen zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld?

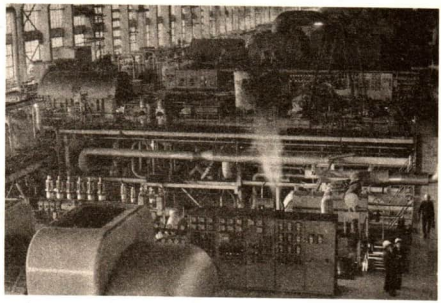
Elektromagnetische Induktion

1843 fand in Paris auf dem Place de la Concorde ein Schauspiel besonderer Art statt. Dieser mitten in der Stadt gelegene große Platz war eines Abends hell erleuchtet. Das erfolgte durch eine elektrisch betriebene Kohlebogenlampe, die vier Stunden lang in Betrieb war. Die Zuschauer waren von der Helligkeit begeistert. Doch welcher Aufwand war notwendig! Für die Lichtquelle wurden 200 galvanische Elemente benötigt. Nach jeweils einer Stunde mußte bei der Hälfte der Elemente die Säure ausgewechselt werden, damit die für die Lampe notwendige Energie zur Verfügung stand.

Mit galvanischen Elementen konnte nur wenig elektrische Energie bereitgestellt werden. Deshalb waren sie für den Betrieb elektrischer Geräte mit höherem Energiebedarf ungeeignet.

Die physikalischen Grundlagen für die Erzeugung großer Mengen Elektroenergie fand Michael Faraday. Wenn elektrische Ströme Magnetfelder erzeugen, sagte er, dann müßten auch mit Magnetfeldern elektrische Ströme hervorgerufen werden können. Von diesem Gedanken ausgehend, entdeckte Faraday nach mehrjährigen intensiven Untersuchungen im Jahre 1831 die *elektromagnetische Induktion*. Diese ist eine entscheidende Grundlage unserer heutigen Elektrotechnik.

In den Generatoren der Kraftwerke, den Generatoren der Kraftfahrzeuge (Lichtmaschinen) und der Fahrräder (Dynamos) wird elektrische Spannung erzeugt, die auch als Induktionsspannung bezeichnet wird. Bei geschlossenem Stromkreis fließt ein elektrischer Strom, der Induktionsstrom.
Unter welchen Bedingungen entsteht eine Induktionsspannung, und wovon ist deren Betrag abhängig?



Bedingungen für die elektromagnetische Induktion

In einem Fahrraddynamo wird durch Drehung eines Magneten in einer Spule eine Spannung hervorgerufen. Wir wollen untersuchen, ob beliebige Bewegungen zwischen einer Spule und einem Magneten eine Spannung bewirken.

Bewegung zwischen Spule und Magnet. Führt bereits eine einfache Hin- und Herbewegung zwischen einer Spule und einem Magneten zu einer Spannung?

10

Aufgabe
Untersuchen Sie, ob bei der Bewegung zwischen einer Spule und einem Dauermagneten in der Spule eine Spannung induziert wird!

Durchführung
1. Eine Spule ($N = 1000$) wird mit einem Spannungsmesser (Meßbereich 1 V) verbunden (Bild 26/2). Der Zeiger des Spannungsmessers wird in Mittelstellung gebracht.
   Bewegen Sie den Dauermagneten in die Spule hinein und aus der Spule heraus! Beobachten Sie dabei den Spannungsmesser!
2. Der Dauermagnet wird hochkant gestellt. Die Spule wird auf den Magneten zu und vom Magneten weg bewegt. Beobachten Sie dabei den Spannungsmesser!

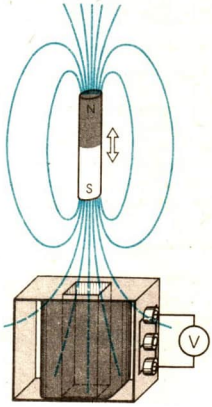


Bild 26/2 Experimentieranordnung

Das gleiche Ergebnis erhalten wir, wenn wir statt eines Dauermagneten einen Elektromagneten verwenden (Bild 27/1). ①

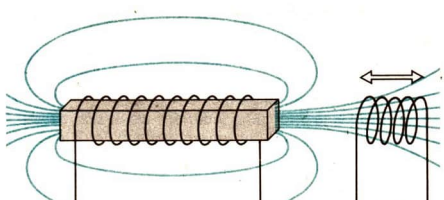


Bild 27/1 Experimentieranordnung

Wird nun aber bei jeder Bewegung zwischen Spule und Magnet eine Spannung induziert?

11 ▼ Eine Spule wird in einem homogenen Magnetfeld in verschiedener Weise bewegt (Bild 27/2). Zur Vereinfachung sind jeweils nur das Feldlinienbild des Magnetfeldes und eine Leiterschleife gezeichnet.

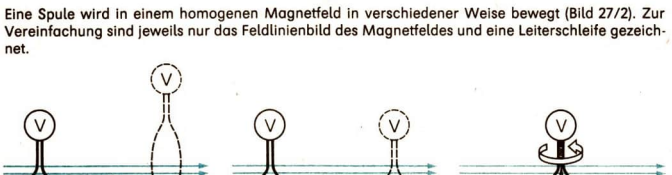


Bild 27/2 a) Bei der Bewegung einer Spule aus einem Magnetfeld hinaus wird eine Spannung induziert.

b) Bei der Bewegung einer Spule innerhalb eines homogenen Magnetfeldes wird keine Spannung induziert.

c) Bei der Drehung einer Spule im Magnetfeld wird eine Spannung induziert.

Das Experiment 11 zeigt, daß nicht bei jeder Bewegung eine Spannung induziert wird. Um die Unterschiede zwischen den Teilexperimenten (↗ Bild 27/2) zu erfassen, vergleichen wir den vom Spulenquerschnitt (Leiterschleife) umfaßten räumlichen Anteil des Magnetfeldes jeweils am Beginn und am Ende der Bewegung. Dabei nutzen wir das Feldlinienbild des Magnetfeldes. Es gilt: Eine Änderung der Anzahl der Feldlinien, die von der Spule umschlossen werden, bedeutet eine Änderung des von der Spule umfaßten Magnetfeldes, d. h. des umfaßten räumlichen Anteils. ② ③

---

① Beschreiben Sie den Aufbau eines Elektromagneten! Nennen Sie Beispiele für die Anwendung von Elektromagneten!

② Welche Aussagen über ein magnetisches Feld kann man einem Feldlinienbild entnehmen? Verdeutlichen Sie das an einem selbstgewählten Beispiel!

③ Vergleichen Sie in den Bildern 27/2a und b jeweils die Anzahl der von der Spule (Leiterschleife) umschlossenen Feldlinien für die Anfangs- und die Endstellung der Spule (Leiterschleife)! Welche Schlußfolgerungen lassen sich bezüglich der Änderung des von der Spule (Leiterschleife) umfaßten Magnetfeldes ziehen?

Vergleicht man unter diesem Gesichtspunkt die Teilexperimente miteinander, so ergibt sich:

- Es wird eine Spannung induziert, wenn sich bei der Bewegung zwischen Spule und Magnet die Anzahl der umschlossenen Feldlinien und damit das von der Spule umfaßte Magnetfeld ändern.
- Es wird keine Spannung induziert, wenn sich bei der Bewegung zwischen Spule und Magnet die Anzahl der umschlossenen Feldlinien und damit das von der Spule umfaßte Magnetfeld nicht ändern. ① ②

Wir können feststellen:
In einer Spule wird eine Spannung induziert, solange sich durch Bewegung zwischen Spule und Magnet der räumliche Anteil des von der Spule umfaßten Magnetfeldes ändert.

Veränderung der Stärke eines Magnetfeldes. Ist es auch möglich, eine Spannung zu induzieren, wenn Spule und Magnet sich nicht zueinander bewegen?

12 ▼ Eine Spule steht dicht neben einem Elektromagneten (Bild 28/1). Die Stärke seines Magnetfeldes wird durch Änderung der Erregerstromstärke verändert. Der Spannungsmesser zeigt einen Ausschlag.

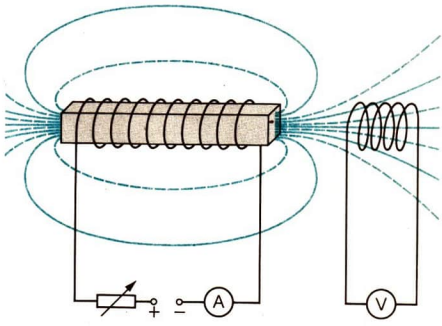


Bild 28/1 Bei Erhöhung der Erregerstromstärke wird das Magnetfeld des Elektromagneten stärker.
Im Feldlinienbild vergrößert sich die Anzahl der Feldlinien (gestrichelt gezeichnet).

Auch in diesem Falle wird also in der Spule eine Spannung induziert. Es erfolgt zwar keine Bewegung zwischen den Geräten, aber durch die Veränderung der Stärke des Magnetfeldes des Elektromagneten verändert sich auch das von der Spule umfaßte Magnetfeld. Es gilt:
In einer Spule wird eine Spannung induziert, solange sich durch Veränderung der Stärke des Magnetfeldes eines Elektromagneten das von der Spule umfaßte Magnetfeld ändert. ③ ④

Fassen wir die Ergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen zusammen, so ergibt sich:

▶ **In einer Spule wird eine Spannung induziert, solange sich das von der Spule umfaßte Magnetfeld ändert.**

Diese Änderung kann sowohl den umfaßten räumlichen Anteil als auch die Stärke des Magnetfeldes betreffen. ⑤

Betrag der Induktionsspannung

Für technische Anwendungen der elektromagnetischen Induktion ist es wichtig zu wissen, wovon der Betrag der induzierten Spannung abhängig ist. Bei der Untersuchung beachten wir: Wollen wir einen physikalischen Zusammenhang zwischen zwei Größen erkennen, so müssen während des Experiments alle anderen Bedingungen konstant gehalten werden.

Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Bewegung zwischen Spule und Magnet.
Wir untersuchen den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Bewegung zwischen Spule und Magnet und der Spannung. ⑥

13 ▼ Mit der Experimentieranordnung nach Bild 27/2 werden folgende Experimente durchgeführt:
1. Teilexperiment: Die Spule wird zweimal bei gleicher Zeitdauer bewegt, so daß sich einmal der räumliche Anteil des von ihr umfaßten Magnetfeldes nur geringfügig ändert und das andere Mal deutlich mehr.
2. Teilexperiment: Die letztgenannte Bewegung wird zweimal so durchgeführt, daß die gleiche Änderung auftritt, aber einmal in einer kurzen und einmal in einer längeren Zeit.
Die Ausschläge des Spannungsmessers werden verglichen.

Das Experiment ergibt, daß die induzierte Spannung um so größer ist,
- je größer die Änderung des räumlichen Anteils des von der Spule umfaßten Magnetfeldes in der gleichen Zeit ist,
- je kürzer die Zeit ist, in der die gleiche Änderung erfolgt.

Zusammenfassend formulieren wir diese Ergebnisse so:
Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller sich der räumliche Anteil des von der Spule umfaßten Magnetfeldes ändert. ⑦

Damit haben wir eine Teilaussage des Induktionsgesetzes erarbeitet.

---

① Geben Sie eine weitere Möglichkeit der Bewegung zwischen Spule und Magnet an, bei der a) eine Spannung induziert wird, b) keine Spannung auftritt!
Begründen Sie Ihre Voraussagen!

② Welche Aussagen lassen sich anhand der Bilder 26/2 und 27/1 über die Anzahl der von der Spule umschlossenen Feldlinien treffen, wenn Spule und Magnet a) aufeinander zu, b) voneinander weg bewegt werden?

③ Welche Möglichkeiten gibt es, die Stärke des Magnetfeldes eines Elektromagneten zu verändern? Entwerfen Sie Experimente, bei denen Spule und Elektromagnet nicht zueinander bewegt werden, trotzdem aber eine Spannung induziert wird!

④ Eine Spule befindet sich neben einem Elektromagneten. Welche Aussagen lassen sich bezüglich der Induktionsspannung treffen, wenn
a) der Stromkreis des Elektromagneten geschlossen wird,
b) im Stromkreis des Elektromagneten ein Strom konstanter Stärke fließt,
c) der Stromkreis des Elektromagneten geöffnet wird?
Begründen Sie Ihre Aussagen!

⑤ Erläutern Sie die Bedingungen, unter denen eine Induktionsspannung entsteht, an selbstgewählten Beispielen!

⑥ Welche Bedingungen dürfen bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Geschwindigkeit der Bewegung zwischen Spule und Magnet und der Induktionsspannung nicht verändert werden?

⑦ Wenn ein Dauermagnet mit der Geschwindigkeit v in eine Spule eingeführt wird, so beträgt die Induktionsspannung U. Welche Aussagen lassen sich über die Induktionsspannungen treffen, wenn die Geschwindigkeit a) größer als v, b) kleiner als v, c) Null ist? Begründen Sie Ihre Aussagen!

Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Veränderung der Stärke eines Magnetfeldes. Die Stärke des Magnetfeldes eines Elektromagneten kann durch Veränderung der Erregerstromstärke verändert werden. Dies kann in verschiedener Weise erfolgen.

14

Mit der Experimentieranordnung nach Bild 30/1 werden folgende Experimente durchgeführt:
1. Teilexperiment: Die Erregerstromstärke und damit die Stärke des Magnetfeldes wird in gleichen Zeiten einmal geringfügig und einmal mehr geändert.
2. Teilexperiment: Eine gleiche Änderung der Erregerstromstärke und damit eine gleiche Änderung des Magnetfeldes erfolgt einmal in einer kurzen und einmal in einer längeren Zeit.

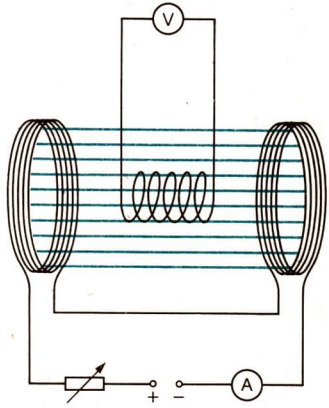


Bild 30/1 Experimentieranordnung

Das Experiment ergibt, daß die Spannung um so größer ist,
- je größer die Änderung der Stärke des Magnetfeldes in der gleichen Zeit ist,
- je kürzer die Zeit ist, in der die gleiche Änderung der Stärke des Magnetfeldes erfolgt.

Zusammenfassend formulieren wir diese Ergebnisse so:
Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller sich die Stärke des von der Spule umfaßten Magnetfeldes ändert.
Damit haben wir eine weitere Teilaussage des Induktionsgesetzes erarbeitet. ① ②

Zusammenfassung der Teilergebnisse zum Induktionsgesetz

▶ **In einer Spule wird eine Spannung induziert, solange sich das von der Spule umfaßte Magnetfeld ändert. Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller diese Änderung erfolgt.**

③

Einfluß des Baus der Spule auf die Induktionsspannung

Spulen können unterschiedliche Windungsanzahlen, Querschnitte und Längen sowie einen Eisenkern haben. Welchen Einfluß hat das auf die induzierte Spannung?

Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Windungsanzahl der Spule. Wenn wir diese Abhängigkeit experimentell untersuchen wollen, müssen die übrigen Bedingungen konstant sein.

15

Aufgabe

Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Windungsanzahl der Spule!

Durchführung

1. Bauen Sie eine Experimentieranordnung entsprechend Bild 31/1 auf! Benutzen Sie die Buchsenkombination 0–3! Der Zeiger des Spannungsmessers (Meßbereich 1 V) ist in Mittelpunktslage zu bringen!
2. Bestimmen Sie die Induktionsspannung bei verschiedener Windungsanzahl der Spule ($N = 1000$, $N = 750$, $N = 250$)! Eine jeweils gleiche Änderung der Stärke des Magnetfeldes des Elektromagneten wird durch Ein- bzw. Ausschalten des Stromes am Stromversorgungsgerät erreicht.

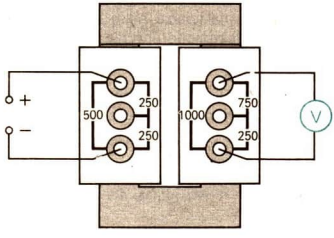


Bild 31/1 Experimentieranordnung

Auswertung

Vergleichen Sie die Spannungen bei verschiedener Windungsanzahl der Spule!
Formulieren Sie das Ergebnis des Experiments in Worten!

Abhängigkeit der Induktionsspannung von weiteren Bedingungen. Mit Hilfe der in Bild 30/1 dargestellten Experimentieranordnung können wir untersuchen, wovon die Induktionsspannung noch abhängig ist. Experimente zeigen, daß sich bei sonst unveränderten Bedingungen mit Vergrößerung des Querschnitts der Spule die Spannung vergrößert.

Die Spannung wird auch dann größer, wenn die Spule einen Eisenkern besitzt. Dagegen hat die Länge der Spule keinen Einfluß auf die Spannung.

Zusammenfassend können wir feststellen:

Die Induktionsspannung ist um so größer, je größer die Windungsanzahl der Spule ist. Sie ist auch abhängig vom Vorhandensein eines Eisenkerns und vom Querschnitt der Spule, aber unabhängig von deren Länge.

④

---

① Eine Spule befindet sich neben einem Elektromagneten. Die Stromstärke eines Stromes durch den Elektromagneten wird in 2 s a) von Null auf 0,5 A, b) von Null auf 3 A, c) von 2,5 A auf Null, d) von 2 A auf 3 A verändert. Vergleichen Sie die in der Spule induzierten Spannungen miteinander!

② Eine Spule befindet sich neben einem Elektromagneten.
Eine Änderung der Stromstärke von Null auf 1 A erfolgt a) in 5 s, b) in 1/5 s, c) in 10^{-2} s, d) in 0,1 s!
Vergleichen Sie die in der Spule induzierten Spannungen miteinander!

③ Erläutern Sie das Induktionsgesetz anhand von Beispielen!

④ In einer Spule soll eine möglichst hohe Spannung induziert werden. Geben Sie Möglichkeiten an, wie das erreicht werden kann!

Energieumwandlungen bei der elektromagnetischen Induktion

Auch bei der elektromagnetischen Induktion gilt, daß Energie nicht neu entsteht, sondern nur von einem Körper auf einen anderen übergehen oder sich von einer Energieform in eine andere umwandeln kann.
So wird beispielsweise beim Drehen einer Spule in einem Magnetfeld mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. In einem geschlossenen Stromkreis fließt ein Induktionsstrom. Damit die Spule in Bewegung bleibt, muß mechanische Arbeit verrichtet werden.
Auch bei der Hin- und Herbewegung zwischen einem Magneten und einer Spule erfolgt eine solche Energieumwandlung.

16 ▼ Ein Stabmagnet schwingt an einer Feder (Bild 32/1) und taucht dabei in eine Spule ein.
Es zeigt sich, daß bei geschlossenem Stromkreis, also beim Fließen eines Induktionsstromes, die Bewegung des Magneten gehemmt wird.

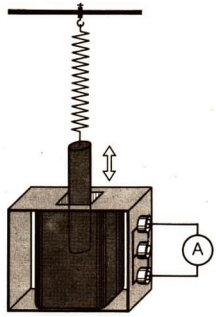


Bild 32/1 Experimentieranordnung

Im Experiment wird die kinetische Energie des schwingenden Magneten in elektrische Energie umgewandelt.
Der russische Physiker H. E. Lenz (1804 bis 1865) hat die Zusammenhänge zwischen den Ursachen der Entstehung eines Induktionsstromes und dessen Richtung genauer untersucht und ein Gesetz gefunden, das als **Lenzsches Gesetz** bezeichnet wird:

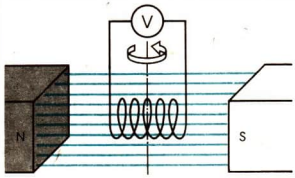
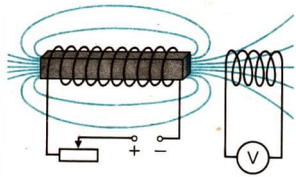
▶ **Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.**

Beim Drehen einer Spule in einem Magnetfeld ist die Ursache für die Entstehung eines Induktionsstromes die Drehbewegung. Der Induktionsstrom ist demzufolge so gerichtet, daß das durch ihn hervorgerufene Magnetfeld die Drehbewegung hemmt. Wäre dies nicht der Fall, so hätten wir ein perpetuum mobile vor uns. ①

Das Lenzsche Gesetz ist Ausdruck der Gültigkeit des Gesetzes von der Erhaltung der Energie bei der elektromagnetischen Induktion.

Zusammenfassung

Induktionsgesetz
In einer Spule wird eine Spannung induziert, solange sich das von der Spule umfaßte Magnetfeld ändert. Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller diese Änderung erfolgt.

Die Änderung des von der Spule umfaßten Magnetfeldes kann erfolgen	
durch Bewegung (Drehung) einer Spule im konstanten Magnetfeld.	durch Änderung der Stärke des Magnetfeldes eines Elektromagneten bei nicht zueinander bewegten Geräten.
Dabei ändert sich der räumliche Anteil des von der Spule umfaßten Magnetfeldes.	Dabei ändert sich die Stärke des von der Spule umfaßten Magnetfeldes.
	
Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller sich der räumliche Anteil des von der Spule umfaßten Magnetfeldes ändert.	Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller sich die Stärke des von der Spule umfaßten Magnetfeldes ändert.

Die Induktionsspannung ist außerdem vom Bau der Spule abhängig. Sie ist um so größer, je größer die Windungsanzahl und der Querschnitt der Spule sind. In einer Spule mit Eisenkern wird bei sonst gleichen Bedingungen eine größere Spannung induziert als in einer Spule ohne Eisenkern.
Gesetz von der Erhaltung der Energie für Induktionsvorgänge (Lenzsches Gesetz):
Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.

① Erklären Sie mit Hilfe des Lenzschen Gesetzes, warum die Bewegung eines schwingenden Magneten (Bild 32/1) gehemmt wird!

Michael Faraday

Michael Faraday (Bild 34/1) lebte in einer Zeit großer gesellschaftlicher Veränderungen. Die schnelle Entwicklung des Kapitalismus, insbesondere die sich um 1800 in England vollziehende und in anderen Ländern beginnende industrielle Revolution, führten zu neuen Anforderungen an Wissenschaft und Technik. Michael Faraday konnte als Sohn eines englischen Schmiedes nur eine Elementarschule besuchen und dort lediglich geringe Kenntnisse im Lesen, Schreiben und Rechnen erwerben. Mit 14 Jahren wurde er Lehrling bei einem Buchbinder. Er band die Bücher nicht nur, sondern las sie auch und besuchte außerdem eine naturwissenschaftliche Abendschule.

Bild 34/1 Michael Faraday (1791 bis 1867)

Seit 1813 konnte er als Assistent bei dem berühmten Chemiker Davy arbeiten. 1827 wurde er zum Professor für Chemie berufen. Immer intensiver beschäftigte er sich in dieser Zeit mit physikalischen Problemen (Bild 34/2). Faraday war ein ausgezeichneter Experimentator. In umfangreichen und systematischen Untersuchungen mit einfachsten Hilfsmitteln erkannte er den engen Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen. Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion im Jahre 1831 ist eine seiner größten wissenschaftlichen Leistungen. Faraday war aber auch erfolgreich auf anderen Gebieten tätig. Er fand grundlegende Gesetze der Elektrochemie, beschäftigte sich eingehend mit dem Verhalten von Stoffen in elektrischen und in magnetischen Feldern, erforschte die magnetischen Eigenschaften von Stoffen und untersuchte optische Erscheinungen. Begriffe wie Feld, Feldlinien, Elektrolyt oder Ion wurden von Faraday in die Wissenschaft eingeführt. Michael Faraday war einer der hervorragenden Naturwissenschaftler des 19. Jahrhunderts.

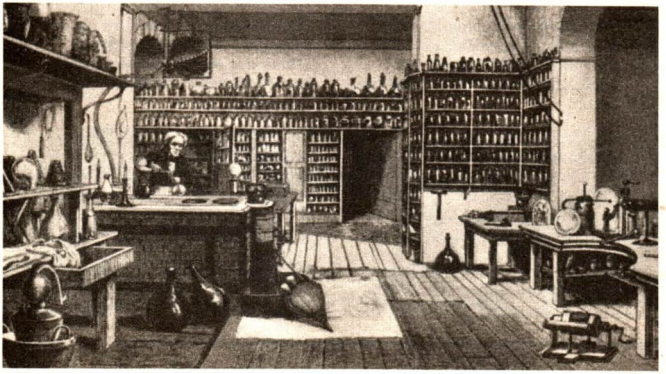
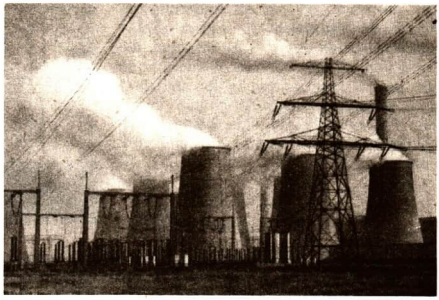


Bild 34/2 Michael Faraday in seinem Laboratorium

In Kraftwerken wandeln *Generatoren* mechanische Energie in elektrische Energie um. Diese gelangt über *Transformatoren* und Fernleitungen zu Industriebetrieben und Haushalten. Wie arbeiten Generatoren und Transformatoren?



Erzeugen von Wechselspannungen

Wir wissen, daß beim Drehen einer Spule in einem Magnetfeld eine Spannung induziert wird. Was für eine Spannung entsteht, wenn die Spule gleichmäßig gedreht wird?

17

Eine drehbar gelagerte Spule wird über zwei Schleifringe mit einem Spannungsmesser verbunden (Bild 35/2). Die Spule wird in einem Magnetfeld langsam gedreht. Der Zeiger des angeschlossenen Spannungsmessers bewegt sich abwechselnd nach beiden Seiten.

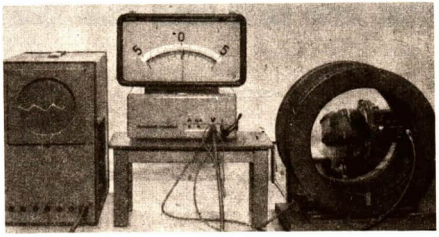


Bild 35/2
Experimentieranordnung

Aus der Bewegung des Zeigers ist zu schließen, daß sich die Polarität der Induktionsspannung in einem bestimmten Rhythmus ändert. Man nennt eine solche Spannung **Wechselspannung**.

Die Entstehung einer Wechselspannung wollen wir näher untersuchen. Dazu wird eine Spule gleichmäßig im homogenen Magnetfeld gedreht. Dabei ändert sich ständig das von der Spule umfaßte Magnetfeld, hier sein räumlicher Anteil.

Diese Änderung soll unter Nutzung des Feldlinienbildes betrachtet werden (Bild 36/1). Bei einer Drehung von 0° bis 20° – also um 20° – ist die Änderung der Anzahl der Feldlinien, die von der Spule umfaßt werden, gering. Dreht man die Spule von 80° auf 100°, also wiederum um 20°, so ist diese Änderung (im Bild 36/1 grau gekennzeichnet) beträchtlich. Im ersten Fall entsteht nur eine kleine Induktionsspannung, im zweiten Fall eine größere. ①

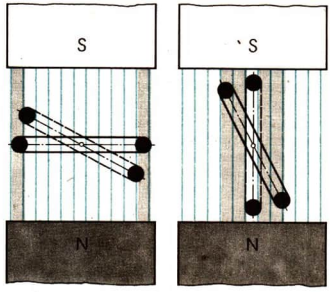


Bild 36/1

Eine ausführliche Betrachtung zeigt, daß die Induktionsspannung bei 90° ihren Maximalwert erreicht, danach wieder geringer wird und bei 180° den Wert Null annimmt. Im Experiment konnten wir beobachten, daß bei 180° die Polarität der Induktionsspannung wechselt. Dreht man die Spule weiter (von 180° auf 360°), so erfolgt die Änderung der Spannung in gleicher Weise wie von 0° auf 180°. Wegen der entgegengesetzten Polarität werden aber diese Spannungswerte unterhalb der Abszissenachse aufgetragen (Bild 36/2). Nach jeder vollen Umdrehung der Spule wiederholt sich der Vorgang. ②

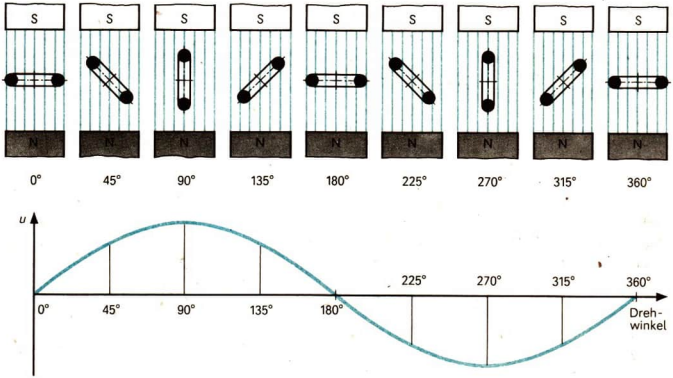


Bild 36/2 Induktionsspannung in Abhängigkeit vom Drehwinkel der Spule

Führt die Drehung eines Magneten vor einer Spule auch zur Induktion einer Wechselspannung?

18 ▼ Ein Magnet rotiert vor einer feststehenden Spule, an die ein Spannungsmesser angeschlossen ist (Bild 37/1).
Beim langsamen Drehen des Magneten schlägt der Zeiger abwechselnd nach beiden Seiten aus. In der Spule wird eine Wechselspannung induziert. ③

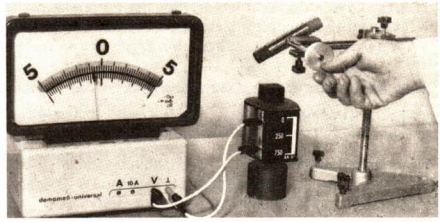


Bild 37/1
Experimentieranordnung

Eine Wechselspannung wird in einer Spule induziert, wenn
a) die Spule in einem Magnetfeld rotiert oder
b) ein Magnet vor einer feststehenden Spule rotiert.

Wechselspannung und Wechselstromstärke

Wie wir erkannt haben, wird beim Drehen der Spule im Magnetfeld keine konstante Spannung induziert. Sie ändert sich periodisch, wie mit Hilfe eines Oszillographen (↗ Abschnitt 10) sichtbar gemacht werden kann (Bild 37/2). ④

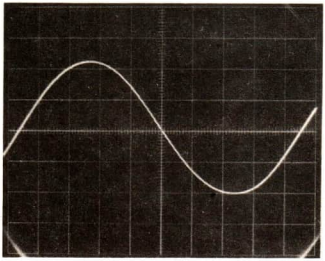


Bild 37/2 Zeitlicher Verlauf der Wechselspannung auf dem Bildschirm eines Oszillographen

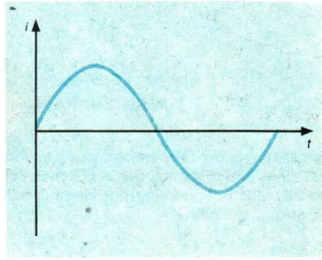


Bild 37/3 *i*-*t*-Diagramm

Die Anzahl der Perioden in der Zeiteinheit wird als Frequenz *f* bezeichnet und in der Einheit ein Hertz, 1 Hz = 1 Periode/Sekunde, gemessen (nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz). Die Stromstärke ändert sich gleichermaßen periodisch (↗ Bild 37/3). Die Momentanwerte von Wechselspannung und Wechselstromstärke werden in den Formelzeichen durch Kleinbuchstaben *u* und *i* ausgedrückt.

---

① Begründen Sie, wie es zu diesen unterschiedlichen Induktionsspannungen kommt!
② Erklären Sie die Entstehung einer Induktionsspannung beim Drehen einer Spule im Magnetfeld!
③ Erklären Sie die Induktion der Wechselspannung!
④ Wie verändert sich die Wechselspannungskurve, wenn man im Experiment 18 einen stärkeren Magneten verwendet?

In vielen Ländern ist festgelegt, daß die Frequenz der Wechselspannung für Industrie und Haushalt 50 Hz beträgt. Das bedeutet also, daß die Spannung 50mal in der Sekunde den positiven und den negativen Maximalwert erreicht. ①

Effektivwerte der Wechselspannung und der Wechselstromstärke.

19

Eine Spule ist drehbar in einem Magnetfeld gelagert. An die Spule sind ein Drehspulspannungsmesser (vgl. Bild 35/2) und ein Oszillograph angeschlossen.

Wir beobachten: Bei kleinen Drehzahlen schlägt der Zeiger des Drehspulspannungsmessers abwechselnd nach beiden Seiten aus. Bei großen Drehzahlen zeigt der Drehspulspannungsmesser keinen Zeigerausschlag mehr, obwohl auf dem Oszillographen erkennbar ist, daß in der Spule eine Wechselspannung induziert wird. Wechselt man den Drehspulspannungsmesser gegen ein für Messungen von Wechselspannungen vorgesehenes Meßgerät aus, so zeigt dieses bei konstanter Drehzahl einen konstanten Zeigerausschlag.

Dieser Meßwert wird als **Effektivwert** U (effektiv = betriebswirksam) der Wechselspannung bezeichnet. Er ist kleiner als der Maximalwert u_{max} (Bild 38/1).

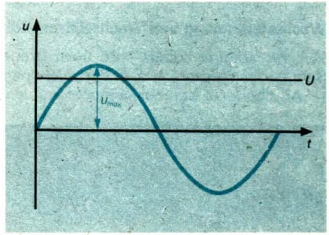


Bild 38/1 u-t-Diagramm

Effektivwerte der Wechselspannung und der Wechselstromstärke entsprechen den Werten eines Gleichstroms, der in gleicher Zeit die gleiche Wärme abgibt. Die im Haushalt gebräuchliche Spannung hat einen Effektivwert von U = 220 V, der Maximalwert beträgt u_{max} = 311 V.

20

Aufgabe

Messen Sie im einfachen Stromkreis mit a) einer Glühlampe (6 V/0,1 A) und b) einem Widerstand (R = 100 Ω) Wechselspannung und Wechselstromstärke!

Vorbereitung

Entwickeln Sie einen Schaltplan!

Durchführung

Bauen Sie die Schaltung auf! Verwenden Sie jeweils die Buchsenkombination 2–8 und 8–12! Schalten Sie den Meßwertschalter auf Wechselstrom (~)! Führen Sie nach Kontrolle der Schaltung durch den Lehrer die erforderlichen Messungen durch! Beachten Sie, daß die Meßwerte an der roten Skale (V, A~) abzulesen sind!

Wechselstromgenerator

Der Wechselstromgenerator hat die Aufgabe, mechanische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Es werden Wechselströme erzeugt. Er kann auf den auf Seite 37 genannten beiden Möglichkeiten beruhen. In der Gegenwart hat sich die *Innenpolmaschine* durchgesetzt.

Aufbau eines Wechselstromgenerators. Im Wechselstromgenerator sind die Spulen feststehend im *Stator* angeordnet. Im Innern ist als *Rotor* ein Elektromagnet drehbar gelagert. Er erhält Strom über Schleifringe. (Bilder 39/1 und 39/2)

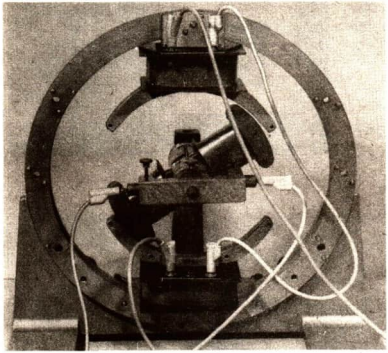


Bild 39/1 Modell eines Wechselstromgenerators

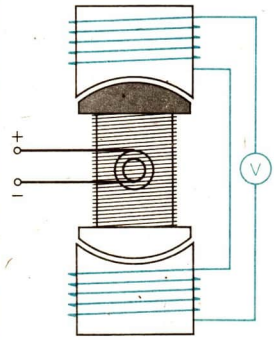


Bild 39/2 Wechselstromgenerator (Schematische Darstellung)

Wirkungsweise eines Wechselstromgenerators. Durch das Drehen des Rotors wird seine Stellung zu den Induktionsspulen des Stators laufend geändert. Damit ändert sich das von den Spulen umfaßte Magnetfeld des Rotors periodisch. In den feststehenden Spulen wird eine Wechselspannung induziert.
Der konstruktive Vorteil der Innenpolmaschine besteht darin, daß die induzierten Ströme, die sehr große Stromstärken aufweisen können, über feste Kontakte geleitet werden. Schleifringe sind hierzu nicht notwendig. Diese sind aber für die Stromzuführung zum Rotor unentbehrlich; die dazu erforderlichen Stromstärken sind jedoch relativ klein. Somit wird insgesamt der Verschleiß an den Schleifringen durch Funkenbildung und Abrieb niedrig gehalten.
Solche Generatoren werden für die Versorgung des Landes mit Elektroenergie verwendet (↗ LB ESP Kl. 9). ②

Der Transformator

In der Praxis werden unterschiedliche Spannungen und Stromstärken benötigt; bei der elektrischen Modelleisenbahn z. B. etwa 18 V. In Schweißgeräten beträgt die Spannung einige Volt, die Stromstärke mehrere 100 A. Wechselstromgeneratoren in Kraftwerken liefern eine Spannung von 6 kV. Für die Fernleitung elektrischer Energie verwendet man Wechselspannungen von 220 kV oder 380 kV. Die Wandlungen der Wechselspannungen und Wechselstromstärken erfolgt im **Transformator**.

---

① Wie groß ist die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden positiven Maximalwerten bei einer Frequenz von 50 Hz?
② Begründen Sie, warum in der Technik Innenpolmaschinen verwendet werden!

Aufbau eines Transformators. Auf einem geschlossenen Eisenkern befinden sich zwei Spulen: die Primärspule (felderzeugende Spule) und die Sekundärspule (Induktionsspule) (Bild 40/1). Zwischen beiden Spulen besteht keine elektrisch leitende Verbindung.

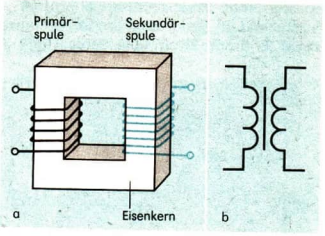


Bild 40/1 a) Aufbau eines Transformators
b) Schaltzeichen für einen Transformator

Wirkungsweise eines Transformators.

21 An die Sekundärspule eines Transformators sind ein Spannungsmesser und ein Oszillograph angeschlossen (Bild 40/2). Wir beobachten das Entstehen einer Wechselspannung in der Sekundärspule beim Anlegen einer Wechselspannung an die Primärspule.

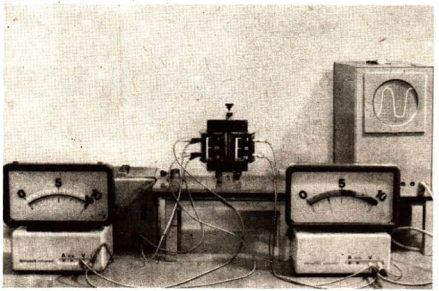


Bild 40/2
Experimentieranordnung

Beim Anlegen einer Wechselspannung an die Primärspule fließt durch diese ein Wechselstrom. Der Wechselstrom in der Primärspule ruft ein Magnetfeld hervor, das sich entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Wechselstroms ständig ändert. Beim geschlossenen Eisenkern wird fast das gesamte von der Primärspule erzeugte Magnetfeld von der Sekundärspule umfaßt; in ihr wird damit eine Wechselspannung induziert.

Spannungsübersetzung beim idealen Transformator. Wir wollen untersuchen, wovon die Sekundärspannung eines Transformators abhängt. Dabei soll die Leerlaufspannung gemessen werden, d. h., der Sekundärkreis ist nicht geschlossen, der Transformator ist unbelastet.

22 **Aufgabe**

Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Sekundärspannung U_2 eines unbelasteten Transformators
a) von der Primärspannung U_1
b) von der Windungsanzahl N_2 der Sekundärspule
c) von der Windungsanzahl N_1 der Primärspule!

Vorbereitung

1. Wiederholen Sie das Induktionsgesetz! Wovon hängt die induzierte Spannung ab?
2. Entwickeln Sie einen Schaltplan! Berücksichtigen Sie dabei, daß auch die Primärspannung gemessen werden soll!
3. Übernehmen Sie folgende Tabelle in das Protokoll und ergänzen Sie!

Untersuchte Abhängigkeit	Wir verändern	Wir lassen konstant
a) U_2 von U_1		
b) U_2 von N_2		
c) U_2 von N_1		

Bereiten Sie folgende Meßwertetabelle vor!

Messung	N_1	N_2	U_1 in V	U_2 in V	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{U_1}{U_2}$
1						
2						
⋮						
⋮						
⋮						
9						

Durchführung
Bauen Sie die Schaltung auf! Führen Sie die Messungen durch!
Tragen Sie die Meßwerte in die Meßwertetabelle ein!

Auswertung
Berechnen Sie die Quotienten $\frac{N_1}{N_2}$ und $\frac{U_1}{U_2}$!
Vergleichen Sie diese Quotienten miteinander!
Formulieren Sie das Ergebnis in einer Gleichung und in Worten!

Bei Messungen an verschiedenen Transformatoren wird immer wieder festgestellt, daß der Quotient $\frac{U_1}{U_2}$ nur annähernd gleich dem Quotienten $\frac{N_1}{N_2}$ ist. Die Abweichungen sind nicht allein auf Meßfehler zurückzuführen, sondern auch auf unerwünschte Energieumwandlungen am Transformator.
Bei der Formulierung der Gesetze des Transformators geht man von einem gedachten, verlustfrei arbeitenden Transformator aus. Diesen bezeichnet man als *idealen Transformator.*

▶ **Beim unbelasteten idealen Transformator verhalten sich die Spannungen wie die Windungsanzahlen.**

Es gilt: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ **(Leerlauf)**

① ②

---

① Bei gleichbleibender Primärspannung eines Transformators wird die Windungsanzahl der Sekundärspule verdoppelt. Wie ändert sich die Sekundärspannung?
② Bei einem Transformator wird die Primärspannung verdoppelt. Wie ändert sich die Sekundärspannung?

Einfluß der Belastung eines Transformators auf die Sekundärspannung und die Primärstromstärke. In der Praxis werden Transformatoren meist belastet, d. h., im Sekundärkreis fließt ein Strom. Schließt man ein Bauelement mit kleinem elektrischem Widerstand an die Sekundärspule an, so tritt im Sekundärkreis eine große Stromstärke auf, der Sekundärkreis ist stark belastet. Bei einem großen Widerstand ist der Sekundärkreis gering belastet.

Welchen Einfluß hat die Belastung eines Transformators auf die Sekundärspannung?

23 ▼ Im Sekundärkreis eines Transformators wird die Stromstärke (und damit die Belastung) durch einen stellbaren Widerstand geändert (Bild 42/1). Die Stromstärke und die Spannung werden jeweils gemessen.

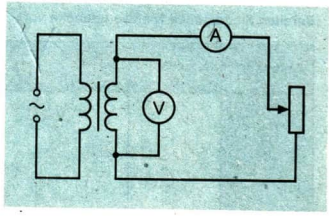


Bild 42/1 Schaltplan der Experimentieranordnung

Es ist festzustellen:
Mit wachsender Belastung, d. h. mit wachsender Sekundärstromstärke, wird die Sekundärspannung des Transformators kleiner.
Beim Transformator tritt die gleiche Erscheinung auf, die wir schon an Spannungsquellen, z. B. an Taschenlampenbatterien, beobachtet haben. Deren Klemmenspannung hängt von der Belastung ab und ist stets kleiner als die Leerlaufspannung.
Welchen Einfluß hat die Änderung der Belastung auf die Primärstromstärke?

Wir verändern das Experiment 23 so, daß auch die Primärstromstärke gemessen werden kann.

24 ▼ Im Sekundärkreis eines Transformators wird die Stromstärke durch einen stellbaren Widerstand geändert (Bild 42/2). Die Stromstärken im Sekundär- und Primärkreis werden gemessen.

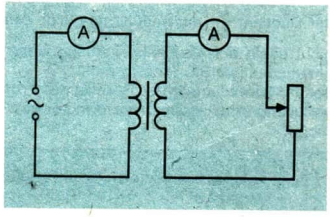


Bild 42/2 Schaltplan der Experimentieranordnung

Es ist festzustellen:
Eine Erhöhung der Belastung, d. h. der Sekundärstromstärke, bei einem Transformator bewirkt auch eine Erhöhung der Primärstromstärke.

Stromstärkeübersetzung beim idealen Transformator (hohe Belastung). Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Stromstärken und den Windungsanzahlen eines Transformators? Zur Untersuchung dieser Frage verwenden wir einen Transformator, dessen Sekundärkreis stark belastet ist. Die höchste Belastung wird in einem Transformator erreicht, dessen Sekundärspule kurzgeschlossen ist.

25

Wir messen für verschiedene Windungsanzahlen im Sekundärstromkreis eines Transformators die Kurzschlußstromstärke (Bild 43/1). Im Primärstromkreis wird mit Hilfe eines stellbaren Widerstandes immer die gleiche Primärstromstärke eingestellt.

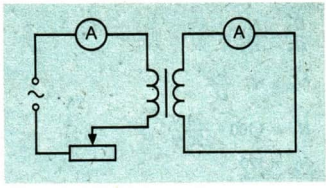


Bild 43/1 Schaltplan der Experimentieranordnung

Aus den Meßwerten ergibt sich:

▶ **Beim stark belasteten idealen Transformator verhalten sich die Stromstärken umgekehrt wie die Windungsanzahlen.**

Es gilt: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ **(hohe Belastung)**

① ②

■ Eine Glühlampe zum Betrieb eines Projektors für 24 V/10 A soll über einen Transformator an die Netzwechselspannung von 220 V angeschlossen werden. Die Windungsanzahl der Primärspule beträgt 1100.
Wie groß ist die Primärstromstärke bei verlustfreier Energieumwandlung?

Analyse:

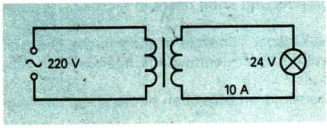


Bild 43/2

Gesucht: N_2
I_1

Gegeben: $N_1 = 1100$
$U_1 = 220\ V$
$U_2 = 24\ V$
$I_2 = 10\ A$

Plan zur Lösung:

1. Die Windungsanzahl der Sekundärspule wird nach der Gleichung $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ berechnet.

2. Die Primärstromstärke wird nach der Gleichung $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ berechnet.

Da I_1 und N_2 in der Gleichung $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ unbekannt sind, wird zuerst N_2 nach der Gleichung $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ berechnet.

---

① Geben Sie für die Gleichungen $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ und $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ die jeweils zwischen zwei Größen bestehenden Zusammenhänge an! Kennzeichnen Sie jeweils die konstant zu haltenden Größen!

② Der Sekundärkreis eines Transformators ($N_2 = 10$) ist kurzgeschlossen. Im Primärkreis ($N_1 = 750$) fließt bei einer Spannung von 220 V ein Strom von 2 A.
Wie hoch kann die Stromstärke im Sekundärkreis maximal sein?
Warum wird diese Stromstärke in der Praxis nicht erreicht?

Lösung:

1. $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$

$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}$

$N_2 = 1100 \cdot \frac{24\ \text{V}}{220\ \text{V}}$

$\underline{\underline{N_2 = 120}}$

2. $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

$I_1 = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1}$

$I_1 = 10\ \text{A} \cdot \frac{120}{1100}$

$I_1 = 1{,}09\ \text{A}$

$\underline{\underline{I_1 \approx 1{,}1\ \text{A}}}$

Ergebnis: Die Windungsanzahl der Sekundärspule beträgt 120. Bei einer Primärspannung von 220 V, einer Sekundärspannung von 24 V und einer Sekundärstromstärke von 10 A beträgt die Primärstromstärke bei verlustfreier Energieumwandlung 1,1 A. Sie ist also bedeutend niedriger als die der Glühlampe.

Energieumwandlungen beim realen Transformator. Bei allen Experimenten wurden reale Transformatoren verwendet. Die dem Primärkreis zugeführte elektrische Energie konnte nicht vollständig in nutzbare elektrische Energie des Sekundärkreises umgewandelt werden.
Worauf ist das zurückzuführen?
Primär- und Sekundärspulen haben einen elektrischen Widerstand. Beim Stromdurchfluß wird ein Teil der elektrischen Energie in thermische Energie umgewandelt.
Das vom Primärstrom erzeugte Magnetfeld verläuft nicht vollständig im Eisenkern, es durchsetzt auch nicht vollständig die Sekundärspule und kann deshalb nicht voll für den Induktionsvorgang wirksam werden.
Durch die unerwünschte Umwandlung von elektrischer Energie in thermische Energie, durch die Streuung des Magnetfeldes und weitere Energieumwandlungen ist der Wirkungsgrad von Transformatoren stets kleiner als 1.
Die in der Volkswirtschaft eingesetzten Transformatoren erreichen heute einen sehr hohen Wirkungsgrad von etwa 96%.

Anwenden des Transformators. In vielen elektrischen Geräten werden Transformatoren genutzt, um die Netzwechselspannung von 220 V in niedrigere Wechselspannung umzuwandeln, wie z. B. in Radioapparaten, Tonbandgeräten und Fernsehgeräten (Bild 44/1).

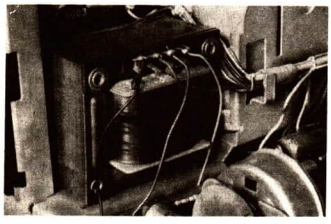


Bild 44/1 Netztransformator eines Fernsehapparates

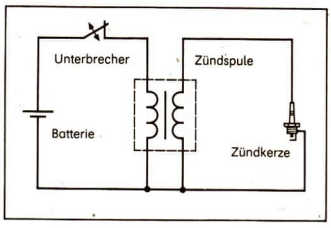
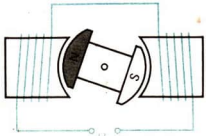
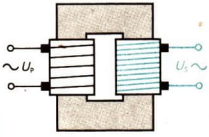


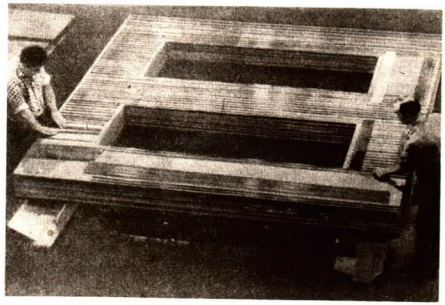
Bild 44/2 Schaltplan der Zündanlage eines Kraftfahrzeuges

Im *Schülerstromversorgungsgerät* wird die Netzwechselspannung auf 12 V transformiert, um die Schüler vor der lebensgefährlichen Netzspannung zu schützen.
Auch zur Erzeugung von Hochspannungen werden Transformatoren verwendet. Die *Zündspule* in Kraftfahrzeugen arbeitet als Transformator (Bild 44/2). Sie liefert die Hochspannung von etwa 6 kV bis 15 kV, um einen Funkenüberschlag an den Elektroden der Zündkerze zu ermöglichen.
Bei der Energieübertragung vom Kraftwerk in Haushalte und Produktionsstätten werden *Hochspannungstransformatoren* verwendet. Eine weitere Anwendung findet der Transformator beim elektrischen Schweißen.

Zusammenfassung

	Generator	Transformator
Aufbau		
Wirkungsweise	Ein Elektromagnet rotiert zwischen feststehenden Spulen. ↓ Änderung des von den Induktionsspulen umfaßten Magnetfeldes ↓ Induktionsspannung in den Spulen	Primärspule und Sekundärspule werden nicht bewegt. Durch Wechselstrom in der Primärspule wird ein veränderliches Magnetfeld erzeugt. ↓ Änderung des von der Sekundärspule umfaßten Magnetfeldes ↓ Induktionsspannung in der Sekundärspule
Am idealen Transformator gelten:	**Spannungsübersetzung**	**Stromstärkeübersetzung**
Gleichung	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$
Gültigkeitsbedingung	**Sekundärstromkreis offen (Leerlauf)**	**Sekundärstromkreis stark belastet**

Bei Transformatoren, Generatoren und Elektromotoren bestehen die Eisenkerne stets aus gegeneinander isolierten Blechen, die Eisenkerne sind geblättert. Warum verwendet man solche in der Herstellung aufwendige Kerne?



Wirbelströme

26 ▼ Eine Glühlampe wird über einen Transformator an das Wechselstromnetz angeschlossen. Bei gleicher Primärspannung und gleichen Windungsanzahlen von Primär- und Sekundärspule besteht der Kern des Transformators entweder
a) aus einem geblätterten Eisenkern oder
b) aus einem Volleisenkern.
Es ist festzustellen: Beim Transformator mit geblättertem Eisenkern leuchtet die Lampe hell. Beim Transformator mit Volleisenkern leuchtet sie erheblich schwächer; der Volleisenkern erwärmt sich stark.

Wie kommt es zu dieser Erwärmung? Bei den Experimentieranordnungen sind nur die Kerne unterschiedlich. Diese Kerne befinden sich in dem veränderlichen Magnetfeld der Primärspule. Ähnlich wie in den Windungen einer kurzgeschlossenen Spule, die ein veränderliches Magnetfeld umfassen, entstehen auch im Eisenkern Induktionsströme. Diese nennt man wegen ihres Verlaufs **Wirbelströme** (Bild 46/2). Die Wirbelströme bewirken die starke Erwärmung des Kerns. Elektrische Energie wird in thermische Energie umgewandelt.

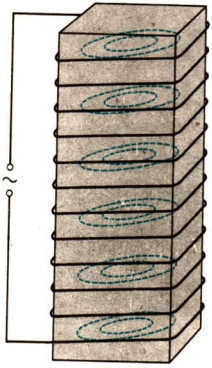


Bild 46/2 Wirbelströme in einem Eisenkern

■ Die Erwärmung massiver Metallteile durch Wirbelströme wird in der Technik z. B. beim Härten von Werkstücken genutzt (Bild 47/1).
Wirbelströme entstehen auch, wenn massive Leiter in konstanten Magnetfeldern bewegt werden.

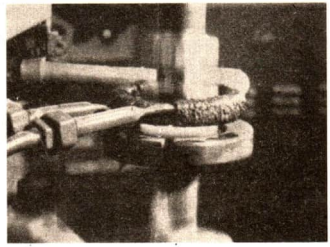


Bild 47/1 Einrichtung zum Induktionshärten
Durch die um das Werkstück gelegte Spule fließt Wechselstrom. Im Werkstück werden Wirbelströme induziert, die das Werkstück zum Glühen bringen.

27
▼ Ein Pendel mit einer Aluminiumscheibe als Pendelkörper schwingt zwischen den Polen eines Elektromagneten (Bild 47/2).
Es ist zu beobachten: Die Aluminiumscheibe schwingt zunächst gleichmäßig. Beim Einschalten des Elektromagneten wird die Bewegung der Aluminiumscheibe stark gebremst.

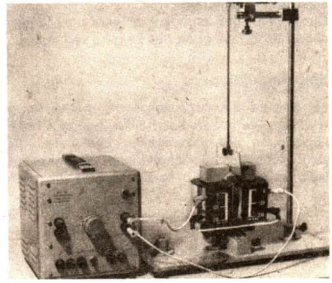


Bild 47/2 Experimentieranordnung

Bei der Bewegung der Scheibe durch das Magnetfeld werden in der Scheibe Wirbelströme induziert (Bild 47/3a).
Das Abbremsen der Scheibe läßt sich mit dem Lenzschen Gesetz erklären. Die Wirbelströme sind so gerichtet, daß sie ihrer Ursache, also der Bewegung, entgegenwirken.
Durch Schlitzen der Scheibe (Bild 47/3b) wird die Bremswirkung vermindert. ①

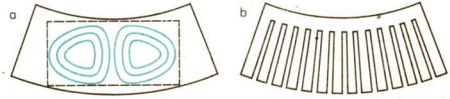


Bild 47/3 a) Wirbelströme in der Aluminiumscheibe des Pendels
b) Geschlitzte Aluminiumscheibe

▶ **Wirbelströme werden in Metallkörpern induziert, die sich in einem veränderlichen Magnetfeld befinden oder in einem konstanten Magnetfeld bewegt werden.**
Durch Blätterung der Metallkörper wird die Ausbildung von Wirbelströmen behindert.

① Begründen Sie, warum in elektrischen Maschinen geblätterte und nicht Volleisenkerne verwendet werden!

■ Die im Experiment 27 beobachtete Bremswirkung kann technisch genutzt werden, z. B. bei Wirbelstrombremsen in Waagen und Meßgeräten (Bild 48/1). ①

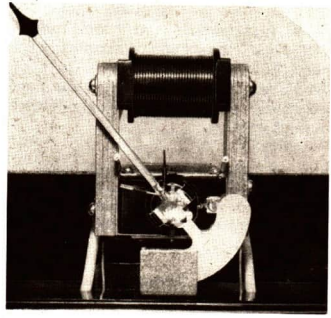


Bild 48/1 Wirbelstromdämpfung bei einem elektrischen Meßgerät
Durch den Hufeisenmagneten wird eine länger dauernde Schwingung des Zeigers verhindert.

Selbstinduktion

28

Bei der im Bild 48/2 dargestellten Schaltung wird das Verhalten der beiden Lampen beim Einschalten des Stromkreises beobachtet. Es zeigt sich: Beim Einschalten des Stromkreises leuchtet die Lampe L_2 später auf als die Lampe L_1.

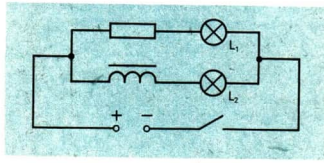


Bild 48/2 Experimentieranordnung

Bisher wurden Induktionsvorgänge nur in Spulen betrachtet, die ein Magnetfeld eines Dauer- oder Elektromagneten umfassen. Jetzt wird der Vorgang untersucht, der in der stromdurchflossenen Spule selbst abläuft. Durch Einschalten des Stromes ändert sich die Stärke des Magnetfeldes von Null bis zum endgültigen Wert (↗ S. 30). Dieses sich ändernde Magnetfeld wird auch von der Spule selbst umfaßt. Dadurch wird auch in der Spule eine Spannung induziert. Diesen Vorgang nennt man *Selbstinduktion*.

Der im geschlossenen Stromkreis entstehende Induktionsstrom ist nach dem Lenzschen Gesetz seiner Ursache, hier der Änderung der elektrischen Stromstärke, entgegen gerichtet. Deshalb erreicht die Stromstärke in der Lampe L_2 später ihren endgültigen Wert.
Die Lampe L_2 leuchtet später auf als die Lampe L_1.

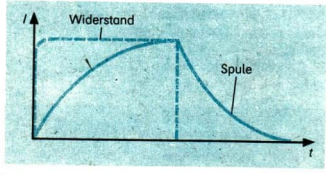


Bild 48/3

Bild 48/3 zeigt das *I-t*-Diagramm für den Ein- und Ausschaltvorgang eines Stromkreises mit einer Spule bzw. mit einem Widerstand.

Was geschieht, wenn in einem Stromkreis mit Spule der Stromfluß unterbrochen wird?

29

Parallel zu einer Spule mit geschlossenem Eisenkern wird eine Glimmlampe geschaltet (Bild 49/1). Diese zündet erst bei einer Spannung von etwa 100 V. An die Spule wird über einen Schalter eine Spannung von 4 V gelegt. Durch Öffnen des Schalters wird der Stromkreis unterbrochen.
Es ist zu beobachten: Beim Öffnen des Schalters leuchtet die Glimmlampe kurz auf. Es ist also eine Spannung von mindestens 100 V induziert worden.

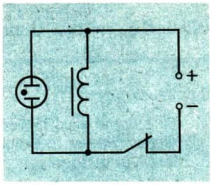


Bild 49/1 Experimentieranordnung

Die hohe Spannung ist auf die schnelle Änderung des Magnetfeldes beim Ausschalten zurückzuführen.

▶ **Als Selbstinduktion bezeichnet man die elektromagnetische Induktion in einer Spule, die durch die Änderung der Stromstärke in ihr selbst hervorgerufen wird.**

■ Das Auftreten von hohen Spannungen infolge der Selbstinduktion wird z. B. genutzt, um Leuchtstofflampen mit Hilfe einer Spule zu zünden. Im Betriebszustand liegt an der Lampe nur eine Spannung von etwa 100 V an. Zum Zünden ist kurzzeitig eine Spannung von über 300 V erforderlich.

■ Es treten aber auch unerwünschte Erscheinungen auf. Beim Abschalten von Stromkreisen mit eisenerfüllten Spulen können beispielsweise die entstehenden hohen Spannungen zu Funken bzw. Lichtbogen am Schalter führen. ②

Zusammenfassung

Wirbelströme entstehen,

wenn massive elektrisch leitende Körper sich in einem veränderlichen Magnetfeld befinden.

wenn massive elektrisch leitende Körper in einem (konstanten) Magnetfeld bewegt werden.

Technische Anwendung der Wirbelströme

bei der Induktionserwärmung

bei der Dämpfung von Zeigerbewegungen in Meßgeräten

Selbstinduktion ist die elektromagnetische Induktion, die durch Änderung der Stromstärke in der Spule selbst auftritt.
Die Selbstinduktion verzögert das Anwachsen der Stromstärke beim Einschalten und führt beim Abschalten von Stromkreisen mit Spulen zu hohen Induktionsspannungen.

① Begründen Sie, warum sich eine bewegte kammartig geschlitzte Aluminiumscheibe beim Einschalten des Elektromagneten anders verhält als eine nicht geschlitzte Aluminiumscheibe!
② Erklären Sie die Wirkung der Selbstinduktion beim Unterbrechen eines Stromkreises mit einer Spule! Nutzen Sie dazu das Induktionsgesetz und das Lenzsche Gesetz!

Induktionsgesetz

1. Eine Spule wird in verschiedener Weise in einem Magnetfeld bewegt (Bild 50/1). Geben Sie an, in welchem Falle eine Induktionsspannung entsteht! Begründen Sie Ihre Voraussage!

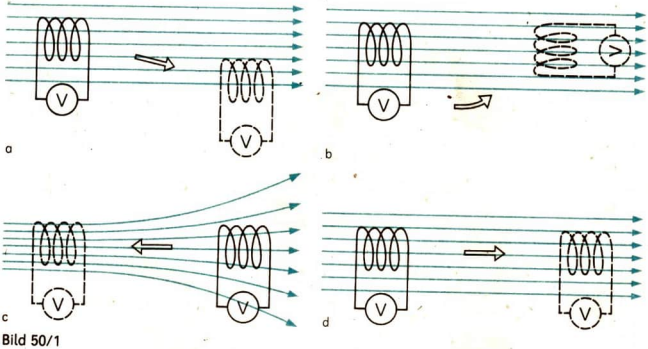


Bild 50/1

2. Mit einer Experimentieranordnung (Bild 50/2) werden verschiedene Experimente durchgeführt. Geben Sie an, welche der nachfolgenden Aussagen wahr sind! Begründen Sie Ihre Entscheidung! In Spule 2 entsteht eine Induktionsspannung,

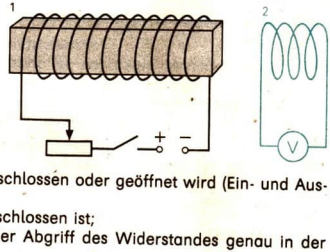


Bild 50/2

a) wenn der Stromkreis der Spule 1 geschlossen oder geöffnet wird (Ein- und Ausschalten);
b) wenn der Stromkreis der Spule 1 geschlossen ist;
c) wenn bei geschlossenem Schalter der Abgriff des Widerstandes genau in der Mitte steht;
d) wenn bei geschlossenem Schalter der Abgriff des Widerstandes hin- und hergeschoben wird.

3. Zur Erzeugung von Induktionsspannungen werden ein, zwei oder drei Stabmagnete mit jeweils gleicher Geschwindigkeit in Spulen unterschiedlicher Windungsanzahl und gleichen Querschnitten eingeführt. Ordnen Sie die entstehenden Induktionsspannungen nach ihren Beträgen!

Anzahl der Stabmagnete	Windungsanzahl	Induktionsspannung
1	1000	U_1
2	1000	U_2
3	1000	U_3
1	500	U_4
1	250	U_5

4. Begründen Sie mit Hilfe des Feldlinienbildes (Bild 51/1), warum bei bestimmter Änderung der Stärke des magnetischen Feldes die Induktionsspannung in der Spule mit dem größeren Querschnitt größer ist!

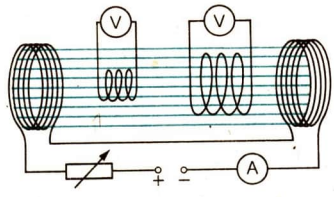


Bild 51/1

Wechselstromgenerator und Transformator

5. Beschreiben Sie den Aufbau des Wechselstromgenerators und erklären Sie seine Wirkungsweise!
6. Beim Bremsen von Straßenbahnen kann man den Motor von der Oberleitung trennen und mit einem Widerstand verbinden. Der Motor arbeitet dann als Generator. Erklären Sie die Bremswirkung! Wenden Sie dabei das Lenzsche Gesetz an!
7. Nennen Sie die beim Wechselstromgenerator auftretenden Energieumwandlungen! Vergleichen Sie diese mit den Energieumwandlungen beim Elektromotor!
8. Beschreiben Sie den Aufbau eines Transformators! Erklären Sie die Wirkungsweise eines Transformators!
9. Mit einem Transformator soll eine Wechselspannung von 220 V auf etwa 36 V transformiert werden. Für seinen Aufbau stehen ein Eisenkern und Spulen mit $N = 250$ (500, 750, 1000, 1500, 3000) zur Verfügung.
   a) Geben Sie mehrere Möglichkeiten an, mit welchen Spulen dieser Transformator aufgebaut werden kann!
   b) Begründen Sie Ihre Entscheidung!
10. Ist es möglich, mit einem Transformator eine Gleichspannung von 12 V auf eine Gleichspannung von 6 V zu transformieren? Begründen Sie Ihre Antwort!
11. Der Transformator für den Betrieb einer Kohlebogenlampe gibt eine Spannung von 44 V ab. Bei einer Netzspannung von 220 V fließt ein Sekundärstrom mit einer Stromstärke von 10 A. a) Welche Stromstärke ist in der Primärspule im Idealfall zu erwarten? b) Wird diese Stromstärke in einem realen Transformator größer oder kleiner sein? Begründen Sie!
12. An einem Transformator werden im Leerlauf eine Primärspannung von 220 V und eine Sekundärspannung von 8,8 V gemessen. Bei Kurzschluß beträgt die Primärstromstärke 0,1 A. Wie groß sind das Verhältnis der Windungsanzahlen und die Kurzschlußstromstärke im Sekundärkreis?
13. Nennen Sie Geräte und Anlagen, in denen Transformatoren verwendet werden! Nutzen Sie Ihre Erfahrungen in der sozialistischen Produktion! Ordnen Sie die Transformatoren nach ihrer Wirkungsweise!

Wirbelströme und Selbstinduktion

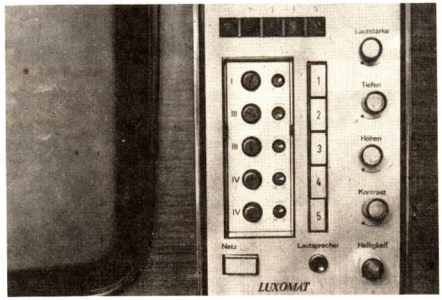
14. Nennen Sie nutzbringende und störende Einflüsse von Wirbelströmen! Geben Sie jeweils Beispiele an!
15. Erklären Sie die Wirkung der Selbstinduktion beim Einschalten eines Stromkreises mit einer Spule! Nutzen Sie dazu das Induktionsgesetz und das Lenzsche Gesetz!

Elektrische Leitungsvorgänge

In der Industrie, im Verkehrswesen, in der Medizin, in der Militärtechnik und in vielen anderen Bereichen unseres Lebens werden elektrische Geräte und Anlagen verwendet. Sie gewährleisten die Energieversorgung, ermöglichen die Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Informationen, erleichtern dem Menschen die Arbeit und sichern eine hohe Arbeitsproduktivität. In allen diesen Geräten und Anlagen befinden sich Bauelemente, deren Wirkungsweise auf elektrischen Leitungsvorgängen in festen Körpern, in Flüssigkeiten, in Gasen und im Vakuum beruht. In den letzten Jahren hat die Anwendung der Elektronik, insbesondere der Mikroelektronik, zu tiefgreifenden Umwälzungen in Wissenschaft, Technik und Produktion geführt. Beispiele dafür sind die umfangreiche Nutzung der elektronischen Datenverarbeitung und die Entwicklung der Robotertechnik.

Die Anwendung der Elektronik ist zu einem entscheidenden Faktor des wissenschaftlich-technischen Fortschritts geworden.

Rundfunkgeräte, Kassettenrecorder, Fernsehapparate und viele andere Geräte arbeiten mit einer bestimmten Betriebsspannung. Für die Einstellung z. B. von Lautstärke, Helligkeit oder Kontrast muß aber die Spannung an einzelnen Teilen der Geräte verändert werden. Wie kann das geschehen?



Gesetze des unverzweigten und des verzweigten Stromkreises

Uns sind bereits verschiedene Gesetze des unverzweigten und des verzweigten Stromkreises bekannt. Diese sind in der Zusammenfassung (↗ S. 59) enthalten. ① ② ③ ④

In vielen Fällen ist es wichtig, den Gesamtwiderstand bei der Reihen- oder Parallelschaltung von Bauelementen zu kennen. Wir wissen schon, daß sich der Gesamtwiderstand vergrößert, wenn zu einem Bauelement ein zweites in Reihe geschaltet wird. Dagegen wird der Gesamtwiderstand kleiner, wenn zu einem Bauelement ein zweites parallel geschaltet wird. Wie läßt sich der Gesamtwiderstand exakt ermitteln?
Aus den uns bereits bekannten Gesetzen kann hergeleitet werden, wie groß der Gesamtwiderstand bei der Reihen- und Parallelschaltung zweier Bauelemente ist.

① Unter welchen Bedingungen gilt a) das Ohmsche Gesetz und b) das Widerstandsgesetz?

② Von verschiedenen Geräten sind folgende Größen bekannt:

	a	b	c	d	e	f	g	h
U in V	2	220			40	380		4,6
I in mA	300	400	40	2			0,1	
R in Ω			1000	50	25	0,2	2,8	51

Berechnen Sie die fehlenden Größen!

③ Wie verändert sich der elektrische Widerstand in einem Stromkreis, wenn in diesem ein Kupferdraht durch einen Aluminiumdraht gleicher Länge und gleichen Querschnitts ersetzt wird?

④ Zwei Drähte unterscheiden sich nur in ihrer Länge. Der erste Draht ist dreimal so lang wie der zweite Draht. Vergleichen Sie die elektrischen Widerstände beider Drähte! Begründen Sie Ihre Aussage!

Es ergibt sich:

Für den unverzweigten Stromkreis gilt $R = R_1 + R_2$.

Für den verzweigten Stromkreis gilt $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

① ②

Spannungsverteilung an zwei in Reihe geschalteten Bauelementen

Im unverzweigten Stromkreis (Bild 54/1) gilt für die Spannung die Gleichung $U = U_1 + U_2$. In welchem Verhältnis stehen nun die beiden Spannungen U_1 und U_2 zueinander, und wovon hängt dieses Verhältnis ab?

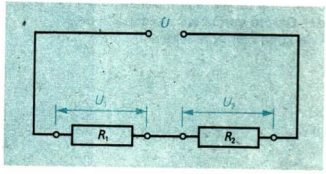


Bild 54/1 Unverzweigter Stromkreis mit zwei Bauelementen

30

Aufgabe

Untersuchen Sie die Aufteilung der Klemmenspannung der Spannungsquelle auf zwei in Reihe geschaltete Bauelemente (technische Widerstände)!

Vorbereitung

Bereiten Sie ein Protokoll mit Schaltplan (Bild 54/2) und folgender Meßwertetabelle vor:

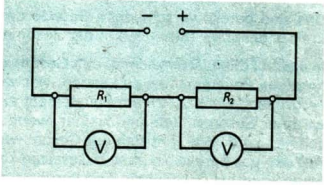


Bild 54/2 Schaltplan der Experimentieranordnung

R_1 in Ω	R_2 in Ω	U_1 in V	U_2 in V	$\frac{U_1}{U_2}$	$\frac{R_1}{R_2}$
51	51				
51	100				
100	100				
100	10000				
25	100				

Durchführung

1. Bauen Sie die Schaltung nach dem Schaltplan auf! Verwenden Sie die Buchsenkombination 0–8!
2. Führen Sie die Messungen durch! Einen Widerstand mit 25 Ω erhalten Sie, wenn Sie den Abgriff des Drehwiderstandes (50Ω) in Mittelstellung bringen.

Auswertung

1. Berechnen Sie die Quotienten $\frac{U_1}{U_2}$ und $\frac{R_1}{R_2}$!
2. Versuchen Sie, die Ergebnisse Ihrer Messungen als Gleichung zu formulieren! Vergleichen Sie dazu die Quotienten

   $\frac{U_1}{U_2}$ und $\frac{R_1}{R_2}$!
3. Welche Gerätefehler und welche persönlichen Fehler können das Ergebnis des Experiments beeinflussen?

Das Ergebnis des Schülerexperiments bestätigt den in der Zusammenfassung (↗ S. 59) genannten Zusammenhang.

■ Das Gesetz über die Spannungsverteilung auf zwei in Reihe geschaltete Bauelemente wird beispielsweise genutzt, um bei Rundfunkgeräten die Lautstärke einzustellen, bei Fernsehgeräten Helligkeit und Kontrast zu regulieren oder um Geräte mit einer bestimmten Betriebsspannung an eine Spannungsquelle mit anderer Spannung anschließen zu können.

■ Eine Glühlampe für 4,5 V soll an eine Autobatterie (Klemmenspannung 12 V) angeschlossen werden. Die Glühlampe hat einen elektrischen Widerstand von 15 Ω. Wie groß muß der Vorwiderstand gewählt werden, der mit der Glühlampe in Reihe zu schalten ist?

Analyse

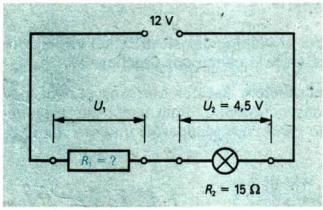


Bild 55/1

Gesucht: R_1 (in Ω)

Gegeben: $U = 12$ V
$U_2 = 4{,}5$ V
$R_2 = 15\ \Omega$

Plan zur Lösung: Der elektrische Widerstand R_1 wird mit Hilfe der Gleichung $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ berechnet.

Die Teilspannung U_1 am Vorwiderstand muß erst noch mit Hilfe des Gesetzes für die Spannung im unverzweigten Stromkreis berechnet werden.

---

① Wie verändern sich Gesamtwiderstand und Stromstärke in einem Stromkreis, wenn bei U = konstant zu einem Bauelement mit dem elektrischen Widerstand R_1 ein Bauelement mit einem
   a) halb so großen,
   b) doppelt so großen,
   c) fünfmal so großen elektrischen Widerstand R_2 in Reihe geschaltet wird?

② Zu einem Bauelement mit dem elektrischen Widerstand von 50 Ω wird ein Bauelement mit einem elektrischen Widerstand von 10 Ω parallel geschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?

Lösung: Aus $U = U_1 + U_2$ folgt: $U_1 = U - U_2$

$$U_1 = 7{,}5\ \text{V}$$

Aus $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ ergibt sich durch Umstellung nach R_1 die Gleichung $R_1 = R_2 \cdot \frac{U_1}{U_2}$

$$R_1 = 15\ \Omega \cdot \frac{7{,}5\ \text{V}}{4{,}5\ \text{V}}$$

$$\underline{\underline{R_1 = 25\ \Omega}}$$

Ergebnis: Wenn eine Glühlampe mit den Kenndaten 4,5 V/15 Ω an eine Autobatterie von 12 V angeschlossen werden soll, so muß ein Vorwiderstand mit 25 Ω in Reihe geschaltet werden. ① ② ③ ④

Meßfehler und ihre Bedeutung

Arten von Meßfehlern. Wir wissen, daß jede physikalische Messung mit Fehlern behaftet ist. Neben persönlichen Fehlern treten Fehler der Meßgeräte und Fehler durch die Experimentieranordnung auf. Dadurch weichen Meßwerte und genaue Werte voneinander ab. Meßwerte sind also immer Näherungswerte. ⑤

Bei der Bestimmung von Konstanten oder bei der Ermittlung des elektrischen Widerstandes von Bauelementen ist es oft wichtig zu wissen, wie genau das Ergebnis ist.

Fehler bei der Messung mit elektrischen Meßgeräten. Bei der Messung elektrischer Größen können die Fehler durch die Experimentieranordnung relativ leicht sehr klein gehalten werden. Wir betrachten deshalb nur die Fehler der Meßgeräte und die beim Ablesen entstehenden Fehler.

Auf elektrischen Meßgeräten ist angegeben, wie genau das jeweilige Gerät ist (Bild 56/1). Eine Angabe von 2,5 bedeutet: Der Gerätefehler beträgt unabhängig vom abgelesenen Meßwert maximal 2,5% des Meßbereichsendwertes. Dieser Fehler ist insbesondere bei Messungen im Gleichstromkreis häufig geringer. Bei Fehlerbetrachtungen müssen wir aber mit dem maximal möglichen Fehler rechnen.

Hinzu kommen Fehler beim Ablesen. Als Fehler darf hier die Hälfte der kleinsten Skalenteilung angenommen werden.
Die Summe aus Gerätefehler und Ablesefehler ergibt den größtmöglichen Fehler.

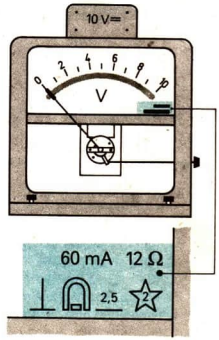


Bild 56/1

- Bei einem Meßbereichsendwert von 10 V beträgt der Gerätefehler maximal ±0,25 V. Hinzu kommt bei der betrachteten Skale (Bild 56/1) ein Ablesefehler von ebenfalls ±0,25 V. Der größtmögliche Fehler beträgt damit ±0,50 V.
  Werden am Meßgerät 8,0 V abgelesen, so ist der Gerätefehler auch höchstens ±0,25 V und der Ablesefehler ±0,25 V. Der größtmögliche Fehler beträgt ebenfalls ±0,50 V. Der genaue Wert liegt damit zwischen 7,5 V und 8,5 V.
  Bei einem Meßwert von 1,0 V ist der größtmögliche Fehler wieder ±0,5 V. Der genaue Wert liegt hierbei also zwischen 0,5 V und 1,5 V.

- Wie groß sind die prozentualen Fehler verschiedener Meßwerte bei dem von uns betrachteten Meßgerät?

Meßwert	prozentualer Fehler
8,0 V	$\frac{0{,}50\ \text{V}}{8{,}0\ \text{V}} \cdot 100\% = 6{,}3\%$
5,0 V	$\frac{0{,}50\ \text{V}}{5{,}0\ \text{V}} \cdot 100\% = 10\%$
1,0 V	$\frac{0{,}50\ \text{V}}{1{,}0\ \text{V}} \cdot 100\% = 50\%$

Daraus ist ersichtlich, daß der Fehler beim Messen im ersten Teil der Skale sehr groß sein kann. Um den Fehler gering zu halten, beachten wir folgende Regel:
An Strom- und Spannungsmessern ist der Meßbereich möglichst so zu wählen, daß die zu messenden Werte im letzten Drittel der Skale liegen.

---

① Wie verändert sich die Spannung an der Glühlampe (Bild 57/1), wenn der Schleifkontakt des Schiebewiderstandes a) in Richtung A, b) in Richtung B verschoben wird? Begründen Sie ihre Aussagen!

② Bei zwei in Reihe geschalteten Bauelementen (Bild 57/2) ist der elektrische Widerstand R_1 a) genau so groß, b) halb so groß, c) doppelt so groß, d) zehnmal so groß wie der elektrische Widerstand R_2.
Welche Aussagen kann man über die Spannungen an den Bauelementen treffen?

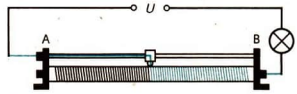


Bild 57/1

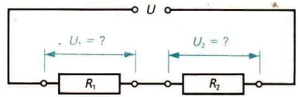


Bild 57/2

③ Zwei in Reihe geschaltete Bauelemente sind an eine Spannungsquelle angeschlossen. Es sind folgende Größen bekannt:

	a	b	c	d	e
R_1 in Ω	12		0,2	1250	
R_2 in Ω	34	846		325	7,0
U_1 in V	6,2	12,3	7		120
U_2 in V		24,6	5	35,4	60

Berechnen Sie die fehlenden Größen!

④ An eine Spannungsquelle mit der Klemmenspannung $U = 6{,}0$ V sind zwei Bauelemente mit $R_1 = 75\,\Omega$ und $R_2 = 17\,\Omega$ angeschlossen. Wie groß sind die Spannungen U_1 und U_2?

⑤ Wie lauten die Regeln für das Rechnen mit Näherungswerten?

Wird aber z. B. ein Diagramm aufgenommen, so ist es zweckmäßig, alle Messungen in einem Meßbereich durchzuführen.

Einfluß der Fehler auf das Ergebnis. Durch Spannungs- und Stromstärkemessung soll der elektrische Widerstand eines Bauelements bestimmt werden (Bild 58/1).

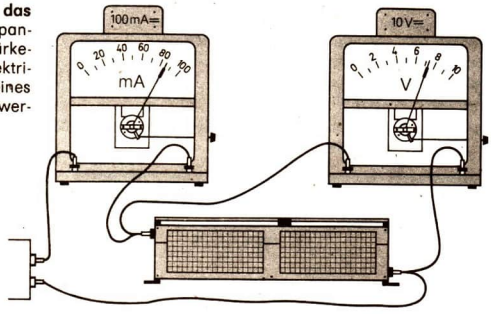


Bild 58/1

■ Aus den Meßwerten $U = 7{,}3$ V und $I = 85$ mA (Bild 58/1) ergibt sich für den elektrischen Widerstand des Bauelements $R = \frac{7{,}3\ \text{V}}{0{,}085\ \text{A}} = 86\ \Omega$. Wie groß ist nun der Fehler des berechneten elektrischen Widerstandes?

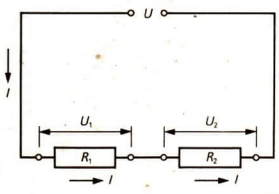
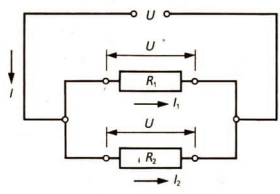
Wir betrachten die Genauigkeit der Stromstärke- und der Spannungsmessung:

	Spannung	Stromstärke
Meßwert **Meßbereich**	7,3 V 10 V	85 mA 100 mA
Gerätefehler **Ablesefehler**	2,5% ≙ 0,25 V 0,25 V	2,5% ≙ 2,5 mA 2,5 mA
Größtmöglicher Fehler **Prozentualer Fehler**	0,50 V 6,8%	5,0 mA 5,9%

Es gilt:
Für einen Quotienten und ein Produkt zweier Größen addieren sich deren prozentuale Fehler. Damit erhalten wir als prozentualen Fehler für den elektrischen Widerstand 6,8% + 5,9% = 12,7%. Das sind 10,9 Ω.
Wir können damit schreiben: $R = 86\ \Omega \pm 11\ \Omega$.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich als wichtige Schlußfolgerung:
Die Genauigkeit eines Ergebnisses ist von der Genauigkeit der Messung jeder einzelnen Größe abhängig.
Demzufolge sind die Anforderungen an die Genauigkeit des Ergebnisses ausschlaggebend dafür, welche Genauigkeit die Meßgeräte haben müssen, die für eine Messung ausgewählt werden.

Zusammenfassung

Unverzweigter Stromkreis	Verzweigter Stromkreis
	
I = konstant	$I = I_1 + I_2$
$U = U_1 + U_2$	U = konstant
$R = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
Am Bauelement mit dem größeren elektrischen Widerstand liegt die größere Spannung. Es gilt: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$	An beiden Bauelementen liegt die gleiche Spannung.

Unabhängig von der Art der Schaltung gilt:

Ohmsches Gesetz $I = \frac{U}{R}$ $R = \frac{U}{I}$ $U = R \cdot I$

(Gültigkeitsbedingung: T = konstant)

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

(Gültigkeitsbedingung: T = konstant)

① ②

① Eine 125-V-Lampe eines Projektionsapparates mit einer Stromstärke von 3,2 A soll an die Spannung 220 V angeschlossen werden. Wie groß muß der erforderliche Vorwiderstand sein?

② In einem Stromkreis sind eine Glühlampe und ein Strommesser in Reihe geschaltet. An der Glühlampe liegt eine Spannung von 6V an, die Stromstärke beträgt 0,4 A.

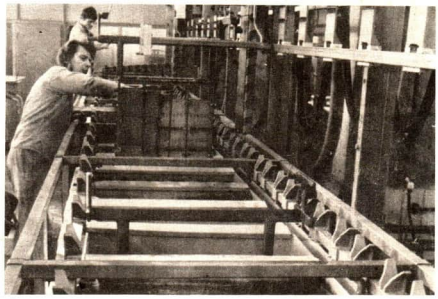
a) Welche Spannung liegt am Strommesser an, wenn dessen elektrischer Widerstand 0,5Ω beträgt?

b) Wie groß ist die Klemmenspannung der Spannungsquelle?

Elektrische Leitungsvorgänge in Metallen und in leitenden Flüssigkeiten

9

Außer Metallen leiten auch zahlreiche Flüssigkeiten den elektrischen Strom. Dies wird beispielsweise in der chemischen Industrie zur Herstellung von Natronlauge oder beim Verchromen von Metallteilen genutzt. Unter welchen Voraussetzungen fließt überhaupt in Metallen und in Flüssigkeiten ein elektrischer Strom? Was geht dabei vor sich?



Voraussetzungen für elektrische Leitungsvorgänge

Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern. Von metallischen Leitern wissen wir:

- Ein Teil der Elektronen ist nicht an bestimmte Atome gebunden. Sie werden als frei bewegliche oder als *wanderungsfähige Elektronen* bezeichnet.
- Beim Anlegen einer Spannung, also beim *Vorhandensein eines elektrischen Feldes* wirken auf die Elektronen Kräfte. Die wanderungsfähigen Elektronen bewegen sich im Leiter gerichtet. Es fließt ein elektrischer Strom (Bild 60/2). ① ②

Bild 60/2

In welchen Flüssigkeiten fließt ein elektrischer Strom?

31 ▼ In ein Becherglas (Bild 60/3) werden nacheinander verschiedene Flüssigkeiten gebracht, z. B. destilliertes Wasser, Kochsalzlösung, Spiritus und verdünnte Schwefelsäure. Der Zeiger des Strommessers wird beobachtet.

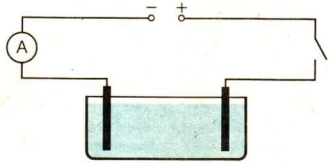


Bild 60/3

Das Experiment zeigt: Wäßrige Lösungen von Säuren, Basen und Salzen leiten den elektrischen Strom.
Das können wir mit Hilfe unseres Wissens erklären: In wäßrigen Lösungen von Säuren, Basen und Salzen gibt es *wanderungsfähige Ionen* (Bild 61/1).

Diese entstehen durch Dissoziation. Beim Anlegen einer Spannung, also beim *Vorhandensein eines elektrischen Feldes,* bewegen sich die positiv und negativ geladenen Ionen gerichtet. Es fließt ein elektrischer Strom. ③

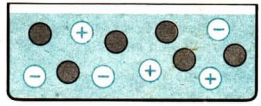


Bild 61/1 Aufbau einer leitenden Flüssigkeit

Zusammenfassend ergibt sich:

Voraussetzungen für elektrische Leitungsvorgänge in Metallen und in leitenden Flüssigkeiten sind das Vorhandensein wanderungsfähiger Ladungsträger und eines elektrischen Feldes.

Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge

Um den Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge zu erklären, betrachten wir wieder metallische Leiter und leitende Flüssigkeiten (Bilder 61/2 und 61/3). ④

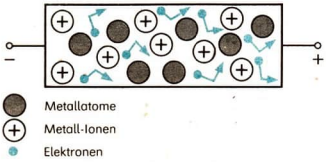


Bild 61/2 Elektrischer Strom in einem metallischen Leiter

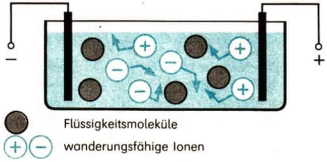
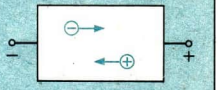


Bild 61/3 Elektrischer Strom in einer leitenden Flüssigkeit

Beim Vorhandensein eines elektrischen Feldes wirken auf die elektrisch geladenen Teilchen Kräfte. Die wanderungsfähigen Ladungsträger bewegen sich deshalb zusätzlich längs der Feldlinien.

Bei elektrischen Leitungsvorgängen bewegen sich die wanderungsfähigen Ladungsträger im elektrischen Feld gerichtet.



---

① Welche Wirkungen hat der elektrische Strom? Nennen Sie Beispiele für die Nutzung der einzelnen Wirkungen in der Praxis!

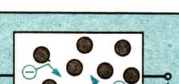
② Wie kann man nachweisen, daß in einem Stromkreis ein elektrischer Strom fließt? Nennen und erläutern Sie zwei Möglichkeiten!

③ In welche Ionen dissoziieren folgende Stoffe in wäßriger Lösung: Natriumchlorid (NaCl), Schwefelsäure (H_2SO_4), Kalziumhydroxid ($Ca(OH)_2$) und Kupfer(II)-sulfat ($CuSO_4$)?

④ Beschreiben Sie anhand der Bilder 61/2 und 61/3 den Aufbau von Metallen und von leitenden Flüssigkeiten!

Bei ihrer gerichteten Bewegung treten sie mit den anderen Teilchen der Stoffe in Wechselwirkung, werden dadurch abgebremst und anschließend durch das Feld wieder beschleunigt. Es stellt sich eine durchschnittliche Wanderungsgeschwindigkeit ein, die bei Metallen kleiner als 1 $\frac{mm}{s}$ ist.

Bei elektrischen Leitungsvorgängen wird die gerichtete Bewegung der wanderungsfähigen Ladungsträger durch Wechselwirkungen mit anderen Teilchen der Stoffe behindert. Die Stoffe haben einen elektrischen Widerstand.



① ②

Durch die Wechselwirkungen mit den wanderungsfähigen Ladungsträgern erhöht sich die Heftigkeit der Bewegung der anderen Teilchen. Das bedeutet: Die thermische Energie des Leiters wird größer, seine Temperatur erhöht sich. Der Leiter gibt Wärme ab. Es wird also elektrische Energie in kinetische Energie der wanderungsfähigen Ladungsträger und diese in thermische Energie des Leiters umgewandelt. Schematisch können wir das so schreiben:

$E_{el} \Longrightarrow E_{kin} \Longrightarrow E_{th}$

Diese Energieumwandlungen vollziehen sich im gesamten Stromkreis.
Bisher haben wir elektrische Leitungsvorgänge in metallischen Leitern und in leitenden Flüssigkeiten betrachtet. Untersuchungen in anderen Stoffen und im Vakuum haben ergeben, daß sich einige Aussagen treffen lassen, die für alle elektrischen Leitungsvorgänge zutreffen. Diese sind in der folgenden Zusammenfassung dargestellt.

Zusammenfassung

Voraussetzungen für elektrische Leitungsvorgänge:
- **Vorhandensein wanderungsfähiger Ladungsträger**
- **Vorhandensein eines elektrischen Feldes**

Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge:
- **Die wanderungsfähigen Ladungsträger bewegen sich gerichtet im elektrischen Feld.**
- **Es erfolgt eine Behinderung der gerichteten Bewegung der wanderungsfähigen Ladungsträger in Stoffen (elektrischer Widerstand).**
- **Es wird elektrische Energie in andere Energieformen umgewandelt.**

③

① Erläutern Sie anhand des Aufbaus eines metallischen Leiters (Bild 61/2) das Zustandekommen eines elektrischen Widerstandes bei Stromfluß!
② Wie ist es zu erklären, daß trotz der kleinen Wanderungsgeschwindigkeit der Elektronen in Metallen eine Glühlampe bei Betätigung des Schalters sofort aufleuchtet, unabhängig davon, wie weit der Schalter von der Glühlampe entfernt ist?
③ Wenden Sie die Aussagen über elektrische Leitungsvorgänge zur Erklärung des Leitungsvorganges in metallischen Leitern und in leitenden Flüssigkeiten an!

Naturerscheinungen wie Blitz und Donner riefen bei den Menschen viele Jahrtausende lang Angst und Schrecken hervor. Wir wissen heute, daß Blitze eine Form des elektrischen Ladungsausgleichs sind, bei der kurzzeitig in Luft sehr starke elektrische Ströme fließen. Luft und andere Gase sind aber in der Regel gute Isolatoren. Unter welchen Bedingungen kann trotzdem in ihnen ein elektrischer Strom fließen?

Voraussetzungen für elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum

Gase und Gasgemische, wie z. B. die Luft, bestehen aus Gasmolekülen. Diese sind elektrisch neutral. Verringert man den Druck in einem gasgefüllten Raum, so verringert sich die Dichte des Gases und damit die Anzahl der Gasmoleküle in diesem Raum. Bei sehr geringem Gasdruck spricht man auch vom Vakuum. Vereinfacht nehmen wir an, daß im Vakuum keine Gasmoleküle vorhanden sind. ①

Damit in Gasen und im Vakuum ein elektrischer Strom fließen kann, müssen wanderungsfähige Ladungsträger und ein elektrisches Feld vorhanden sein. Wie können wanderungsfähige Ladungsträger bereitgestellt werden?

Ionisation. In Gasen können durch verschiedene äußere Einflüsse wanderungsfähige Ladungsträger erzeugt werden.

32 ▼ Ein Plattenkondensator, zwischen dessen Platten sich Luft befindet, wird aufgeladen (Bild 63/2a). Die elektrische Ladung der Platten verringert sich nur sehr langsam. Wird in den Raum zwischen den Platten eine glühende Heizwendel gebracht (Bild 63/2b) oder dieser Raum mit starker radioaktiver Strahlung bestrahlt (Bild 63/2c), so entlädt sich der Kondensator schnell. ②

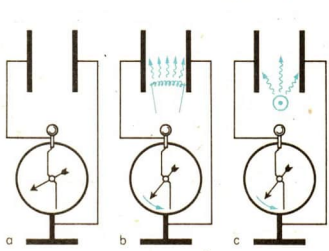


Bild 63/2 Experimentieranordnung

① Welche Gase sind die wichtigsten Bestandteile von Luft?
② Begründen Sie, warum beim Experimentieren 32 (a) kein oder nur ein sehr kleiner Strom fließt!

Wird einem Gas Wärme zugeführt oder wird es radioaktiver Strahlung ausgesetzt, so werden durch die Energiezufuhr Elektronen von einigen der elektrisch neutralen Gasmoleküle abgetrennt (Bild 64/1). Es entstehen positiv geladene Ionen und Elektronen als wanderungsfähige Ladungsträger. Diesen Vorgang des Aufspaltens von neutralen Gasmolekülen in Elektronen und positiv geladenen Ionen durch Energiezufuhr nennt man *Ionisation*.

Ionisation kann auch im Gas selbst hervorgerufen werden. Durch die ständig vorhandene radioaktive Strahlung gibt es in jedem Gas Elektronen, die von Gasmolekülen abgetrennt wurden. In einem starken elektrischen Feld können diese Elektronen große Geschwindigkeiten erreichen. Stoßen sie auf neutrale Gasmoleküle, so können von diesen Elektronen abgespalten werden (Bild 64/2). Dieser Vorgang wiederholt sich und entwickelt sich lawinenartig. Er wird als *Stoßionisation* bezeichnet. ① ②

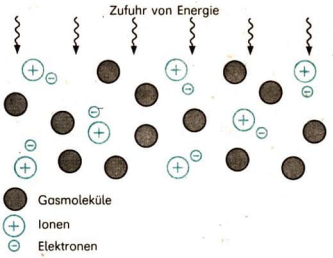


Bild 64/1 Ionisation eines Gases

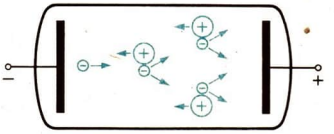


Bild 64/2 Stoßionisation

Glühemission. Im Inneren einer Vakuumröhre (Bild 64/3) sind keine wanderungsfähigen Ladungsträger vorhanden. Wenn ein elektrischer Strom in der Vakuumröhre fließen soll, müssen durch geeignete Maßnahmen wanderungsfähige Ladungsträger in den Raum hineingebracht werden. Wie kann das geschehen?

33 ▼ Wird an eine Vakuumröhre eine Spannung gelegt, so fließt kein Strom, da keine Ladungsträger vorhanden sind (Bild 64/3). Wird die mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundene Elektrode (Katode) elektrisch aufgeheizt, dann zeigt der Strommesser einen deutlichen Ausschlag (Bild 64/4).

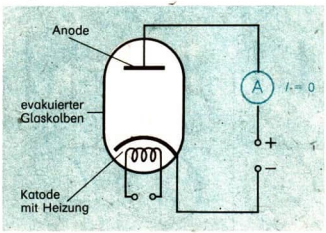


Bild 64/3 Vakuumröhre (Diode)

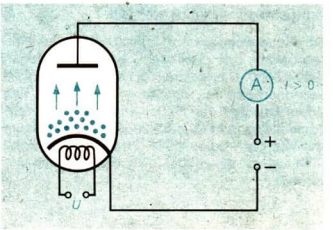


Bild 64/4

Bei Temperaturerhöhung nimmt die Energie der Elektronen in der Katode zu. Sie wird schließlich so groß, daß Elektronen aus der Katode austreten können oder, wie man auch sagt, emittiert werden. Diesen Vorgang des Austritts von Elektronen aus Stoffen bei Energiezufuhr nennt man *Emission*. In dem betrachteten Beispiel tritt die Emission bei

stark erhitzten, glühenden Katoden auf. Sie wird deshalb als *Glühemission* bezeichnet. ③ ④

Die Glühemission wurde von Thomas Alva Edison (1847 bis 1931) entdeckt und seit Beginn des 20. Jahrhunderts technisch genutzt, insbesondere bei Elektronenröhren (Bild 65/1). Mit der Erfindung der Röhrendiode und der Röhrentriode zu Beginn dieses Jahrhunderts wurden Bauelemente geschaffen, die eine entscheidende Grundlage für die schnelle Entwicklung der Elektronik, insbesondere der Nachrichtentechnik, waren. Heute sind Elektronenröhren zumeist durch Halbleiterbauelemente abgelöst; sie werden nur noch in speziellen Bereichen, z. B. als Senderöhren in Rundfunksendern, verwendet.

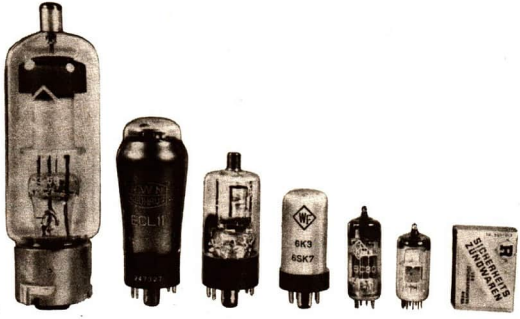


Bild 65/1
Verschiedene Typen von Elektronenröhren

Fotoemission. Neben der Glühemission gibt es eine weitere Art der Emission, die für die Bereitstellung von wanderungsfähigen Ladungsträgern sowohl in Gasen als auch im Vakuum von Bedeutung ist.

34

Eine Zinkplatte wird positiv aufgeladen und mit ultraviolettem Licht bestrahlt. Die elektrische Ladung der Platte bleibt erhalten (Bild 65/2).
Wird die Platte dagegen negativ aufgeladen und wieder mit ultraviolettem Licht bestrahlt, so verliert sie ihre negative Ladung (Bild 65/3).

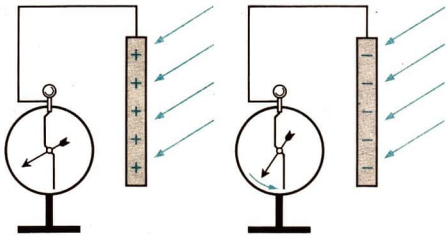


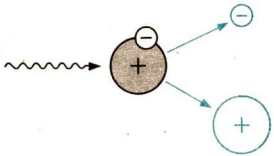
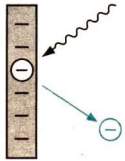
Bild 65/2, Bild 65/3

① Erläutern Sie verschiedene Möglichkeiten der Ionisation eines Gases!
② Vergleichen Sie die Ionisation bei Gasen mit der Dissoziation bei Flüssigkeiten! Worin besteht
a) die Gemeinsamkeit b) der Unterschied?
③ Erläutern Sie den Vorgang der Glühemission!
④ Wie wird sich die Anzahl der aus einer Katode austretenden Elektronen ändern, wenn die Temperatur der Katode erhöht wird? Begründen Sie Ihre Voraussage! Wie kann man die Voraussage experimentell prüfen?

Beim Experiment 34 müssen Elektronen die Zinkplatte verlassen haben. Das auffallende Licht überträgt auf die Elektronen in der Oberfläche der Platte Energie. Ist die Energie der Elektronen genügend groß, so können sie aus der Platte austreten. Da dieser Vorgang bei Bestrahlung mit Licht oder anderer energiereicher Strahlung auftritt, wird er als *Fotoemission* bezeichnet.

Zusammenfassung

Bereitstellung von wanderungsfähigen Ladungsträgern durch

Ionisation	**Emission**
Unter Ionisation versteht man die Aufspaltung von neutralen Gasmolekülen in Elektronen und positiv geladene Ionen.	**Unter Emission versteht man den Austritt von Elektronen aus Stoffen.**
Ionisation kann erfolgen bei Energiezufuhr durch **– Wärme** **– Strahlung (z. B. radioaktive Strahlung)** **– Stoß (Stoßionisation)**	**Emission kann erfolgen bei Energiezufuhr durch** **– Wärme (Glühemission)** **– Strahlung (Fotoemission)**
	
Als wanderungsfähige Ladungsträger werden Elektronen und positiv geladene Ionen bereitgestellt.	**Als wanderungsfähige Ladungsträger werden Elektronen bereitgestellt.**

Im Vakuum erfolgt die Bereitstellung von Ladungsträgern durch Emission, in Gasen durch Ionisation oder Emission.

① ②

Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge in Gasen

In Gasen werden die wanderungsfähigen Ladungsträger durch Ionisation oder Emission bereitgestellt. Wird durch Anlegen einer Spannung im Stromkreis ein elektrisches Feld aufgebaut, so bewegen sich die wanderungsfähigen Elektronen und Ionen gerichtet. Es fließt ein elektrischer Strom (Bild 67/1).

Bei ihrer gerichteten Bewegung treten Elektronen, Ionen und Moleküle in Wechselwirkung. Die gerichtete Bewegung der wanderungsfähigen Ladungsträger wird dadurch behindert.

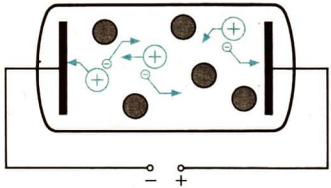


Bild 67/1 Elektrischer Strom in Gasen

▶ **In Gasen sind Elektronen und Ionen die wanderungsfähigen Ladungsträger. Bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes bewegen sich die Elektronen und Ionen gerichtet. Dabei treten Wechselwirkungen zwischen Gasmolekülen, Ionen und Elektronen auf.**

③

Die bei den Wechselwirkungen auftretenden Erscheinungen sind sehr vielfältig und kompliziert. Für viele Anwendungen ist wesentlich, daß hierbei Licht abgestrahlt und Wärme abgegeben wird.

Anwendungen elektrischer Leitungsvorgänge in Gasen. Die bei elektrischen Leitungsvorgängen in Gasen auftretenden Leuchterscheinungen werden bei *Lichtquellen* genutzt. Farbe und Intensität des abgestrahlten Lichtes sind vom Druck des Gases, von der Art des Gases und von anderen Faktoren abhängig.

■ Ein Beispiel für eine Lichtquelle ist die *Glimmlampe* (Bild 67/2). Sie wird beispielsweise als Kontrollampe in Spannungsprüfern verwendet. Glimmlampen sind meist mit einem Neon-Helium-Gemisch gefüllt. Der Gasdruck in ihnen beträgt etwa 1/50 des normalen Luftdrucks.

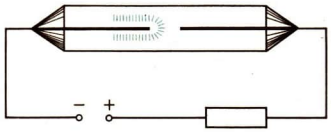


Bild 67/2 Schaltung einer Glimmlampe

Die beiden Elektroden können sehr verschieden geformt sein. Bei Gleichstrombetrieb leuchtet nur die Umgebung der mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundenen Elektrode auf. Zur Begrenzung der Stromstärke werden Glimmlampen mit einem Vorwiderstand betrieben. ④

Für Reklamezwecke werden *Leuchtröhren* verwendet. Das von ihnen ausgesendete verschiedenfarbige Licht kommt durch unterschiedliche Gasfüllungen und verschiedene Leuchtstoffe zustande.

---

① Vergleichen Sie Ionisation und Emission! Stellen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zusammen!

② Erläutern Sie die verschiedenen Möglichkeiten der Bereitstellung von Ladungsträgern in Gasen und im Vakuum!

③ Erklären Sie den elektrischen Leitungsvorgang in Gasen! Gehen Sie dabei von den Aussagen zu den Voraussetzungen und zum Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge aus!

④ Eine Glimmlampe (Zündspannung 100 V, Betriebsspannung 20 V) soll an eine Spannungsquelle von 220 V angeschlossen werden. Wie groß muß der Vorwiderstand sein, damit die Betriebsstromstärke von 0,1 mA nicht überschritten wird?

Für Beleuchtungszwecke haben *Leuchtstofflampen* große Bedeutung. Sie geben bei gleicher zugeführter elektrischer Energie wesentlich mehr Licht ab als Glühlampen.
Für Straßenbeleuchtung werden meist *Quecksilberdampflampen* oder die gelbes Licht aussendenden *Natriumdampflampen* verwendet. An der Erhöhung des Wirkungsgrades dieser Lichtquellen wird ständig weiter gearbeitet.

Wirkungsgrad einiger Lichtquellen

Lichtquelle	Wirkungsgrad
Glühlampe	etwa 3%
Leuchtstofflampe	etwa 10%
Natriumdampflampe	etwa 20%

①

Auch in der Natur können wir Leuchterscheinungen beobachten, die durch Leitungsvorgänge in der Luft hervorgerufen werden.
Ein Beispiel dafür sind *Blitze* (↗ Bild 63/1). Durch diese erfolgt ein Ladungsausgleich zwischen zwei Wolken oder zwischen einer Wolke und der Erde. Dabei fließt in einem nur 10 cm bis 20 cm breiten Entladungskanal ein elektrischer Strom mit mehreren tausend Ampere. Durch die sehr kurze Dauer eines Blitzes beträgt die transportierte Ladung im Durchschnitt nur 10 C bis 20 C. Trotzdem kann die Wirkung eines Blitzes erheblich sein, da Energie in sehr kurzer Zeit freigesetzt wird. ②

In der Technik wird neben den Leuchterscheinungen auch die bei Leitungsvorgängen in Gasen entstehende Wärme genutzt.

Beim *Elektroschweißen* bewirkt ein Lichtbogen das Schmelzen des Materials und damit eine sichere Verbindung zwischen Werkstücken.

Bei *Elektroöfen*, die beispielsweise bei der Herstellung von Karbid verwendet werden, erfolgt die Erhitzung des Schmelzgutes ebenfalls durch einen Lichtbogen.

▶ **Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen werden vorwiegend in der Beleuchtungstechnik und zur Erhitzung von Materialien genutzt.**

③

Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge im Vakuum

Wenn im Vakuum ein elektrischer Strom fließen soll, müssen durch Glühemission oder Fotoemission Ladungsträger in den Raum eingebracht werden. Als wanderungsfähige Ladungsträger stehen damit Elektronen zur Verfügung.

Legen wir an eine Vakuumröhre (Bild 68/1) eine Spannung an, dann wird im Stromkreis ein elektrisches Feld aufgebaut. In diesem elektrischen Feld bewegen sich die Elektronen gerichtet. Im Unterschied zu Metallen, Flüssigkeiten und Gasen wird aber die Bewegung der Elektronen nicht behindert. Dadurch erreichen sie sehr hohe Geschwindigkeiten.

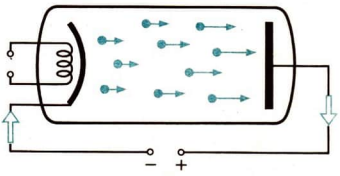


Bild 68/1 Elektrischer Strom im Vakuum

■ Liegt an einer Vakuumröhre eine Spannung von 1 V, dann beträgt die maximale Geschwindigkeit der Elektronen etwa 600 km/s. An einer Fernsehbildröhre liegt eine Spannung von etwa 15 kV. Die Elektronen erreichen dort eine Geschwindigkeit von etwa 70000 km/s.

▶ **Im Vakuum sind Elektronen die wanderungsfähigen Ladungsträger. Bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes bewegen sich die Elektronen gerichtet und unbehindert.**

④

Elektronenstrahlröhren

Elektrische Leitungsvorgänge im Vakuum finden vor allem in *Elektronenstrahlröhren* Anwendung. Elektronenstrahlröhren werden als Bildröhren in Fernsehgeräten sowie als Anzeigeröhren in Oszillographen, bei Radaranlagen und in der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) verwendet.

Aufbau einer Elektronenstrahlröhre. Unabhängig von ihrem Verwendungszweck haben Elektronenstrahlröhren den gleichen prinzipiellen Aufbau (Bild 69/1). Das System zur Erzeugung eines dünnen Elektronenstrahls besteht aus Katode, Anode und Wehnelt-Zylinder.

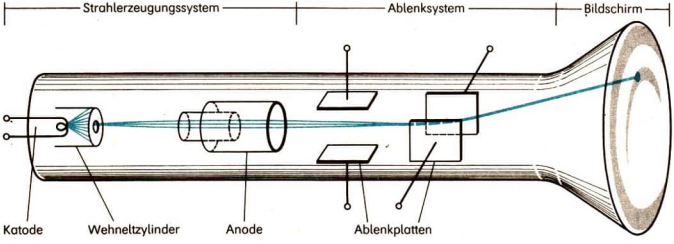


Bild 69/1 Aufbau einer Elektronenstrahlröhre

Als Ablenksystem werden zwei senkrecht zueinander angeordnete Platten oder auch entsprechend angeordnete Spulenpaare verwendet. Der Bildschirm ist innen mit Leuchtstoff beschichtet. Bei Fernsehbildröhren verwendet man dafür meist Zink-Kadmium-Sulfide. Alle Teile der Röhre befinden sich in einem evakuierten Glaskolben.

---

① Vergleichen Sie den Wirkungsgrad verschiedener Lichtquellen! Welche Schlußfolgerungen lassen sich aus der Sicht der rationellen Nutzung von Energie ableiten?

② Durch einen Blitz wird eine Ladung von 15 C transportiert. Die durchschnittliche Stromstärke betrage 10^4 A. Wie lange dauert der Blitz? (Beachten Sie, daß damit nur eine grobe Abschätzung der Dauer eines Blitzes möglich ist!)

③ Stellen Sie Beispiele für das Auftreten bzw. für die Anwendung elektrischer Leitungsvorgänge in Gasen aus Natur und Technik zusammen!

④ Erklären Sie den elektrischen Leitungsvorgang im Vakuum! Gehen Sie dabei von den Aussagen zu Voraussetzungen und Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge aus!

Wirkungsweise einer Elektronenstrahlröhre. Aus der Katode treten infolge Glühemission Elektronen aus. Diese werden im elektrischen Feld zwischen Katode und Anode beschleunigt. Danach bewegen sie sich näherungsweise gleichförmig und geradlinig in Richtung Bildschirm weiter. Durch die Form der Anode wird der Elektronenstrahl so gebündelt, daß auf dem Bildschirm ein „scharfer" Leuchtfleck entsteht.
Der Wehnelt-Zylinder, so benannt nach dem deutschen Physiker Arthur Wehnelt (1871 bis 1944), dient der Steuerung der Intensität des Elektronenstrahls und damit der Veränderung der Helligkeit des Leuchtflecks auf dem Bildschirm. Wie geht das vor sich? Zwischen Katode und Wehnelt-Zylinder besteht ein veränderbares elektrisches Feld. Dieses ist dem elektrischen Feld zwischen Katode und Anode entgegengerichtet. Es hemmt also die beschleunigte Bewegung der Elektronen. Je nach der Stärke dieses Feldes gelangen mehr oder weniger Elektronen durch den Wehnelt-Zylinder. Der Leuchtfleck ist damit heller oder weniger hell.

Wird an die waagerecht und senkrecht angeordneten Plattenpaare eine Spannung angelegt, so kann der Elektronenstrahl in verschiedenen Richtungen abgelenkt werden (Bild 70/1).

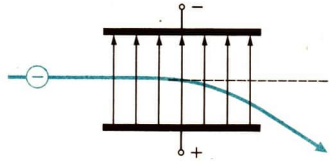


Bild 70/1 Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld

Die Ablenkung des Elektronenstrahls kann auch durch magnetische Felder erfolgen, da auf bewegte Ladungsträger im Magnetfeld eine Kraft ausgeübt wird. Die Magnetfelder werden durch Spulen hervorgerufen, die um den Glaskolben der Elektronenröhre herum angeordnet sind. Beim Auftreffen der Elektronen auf dem Bildschirm wird deren kinetische Energie in Licht umgewandelt. Die Stellen, an denen Elektronen auftreffen, leuchten auf. ① ② ③ ④

▶ **Eine Elektronenstrahlröhre besteht aus einem Strahlerzeugungssystem (Katode, Anode, Wehnelt-Zylinder), einem Ablenksystem (Plattenpaare oder Spulenpaare) und einem Bildschirm.**
Durch das Strahlerzeugungssystem erfolgt die Erzeugung und Bündelung des Elektronenstrahls sowie die Steuerung seiner Intensität.
Durch elektrische oder magnetische Felder wird der Elektronenstrahl abgelenkt.
Auf einem mit Leuchtstoff beschichteten Bildschirm leuchten die vom Elektronenstrahl getroffenen Stellen auf.

Anwendung von Elektronenstrahlröhren. In der Technik ist es häufig erforderlich, den zeitlichen Verlauf von Wechselspannung darzustellen. Dazu werden *Oszillographen* verwendet.
Das Bild 71/1 zeigt die prinzipielle Wirkungsweise eines Oszillographen. An den senkrecht angeordneten Platten der Elektronenstrahlröhre wird eine im Gerät erzeugte sägezahnförmige Spannung (Bild 71/1a) angelegt. Dadurch wandert der Leuchtfleck auf dem Bildschirm gleichmäßig von links nach rechts und springt bei der plötzlichen Spannungsverringerung wieder nach links (Bild 71/1b).

Dieser Vorgang wiederholt sich ständig. Nun wird gleichzeitig an die waagerecht angeordneten Platten eine zu untersuchende Wechselspannung angelegt (Bild 71/1c). Der Leuchtfleck wandert von links nach rechts und gleichzeitig infolge der anliegenden Wechselspannung nach oben oder nach unten. Auf dem Bildschirm ist eine Wechselspannungskurve zu sehen (Bild 71/1d). ⑤

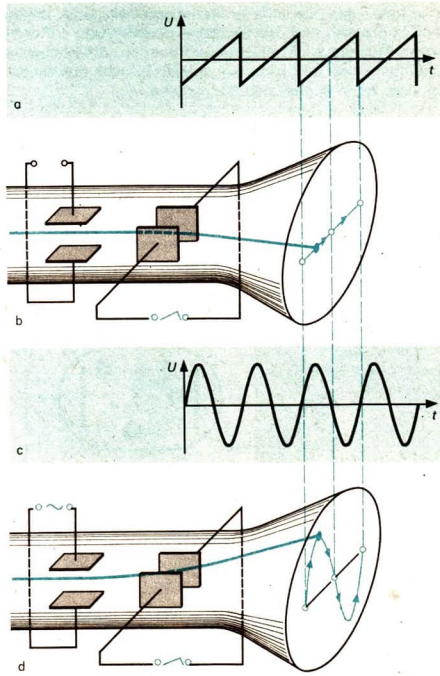


Bild 71/1 Wirkungsweise eines Oszillographen (a bis d)

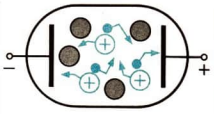
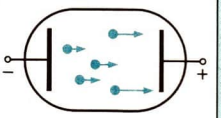
In der *Bildröhre eines Fernsehgerätes* sind die Vorgänge wesentlich komplizierter als beim Oszillographen. Der Elektronenstrahl in der Bildröhre wird durch die elektrischen Signale gesteuert, die von der Antenne empfangen werden. Der Elektronenstrahl „schreibt" in einer Sekunde 25 Bilder auf den Bildschirm, wobei jedes Bild aus 625 Zeilen

---

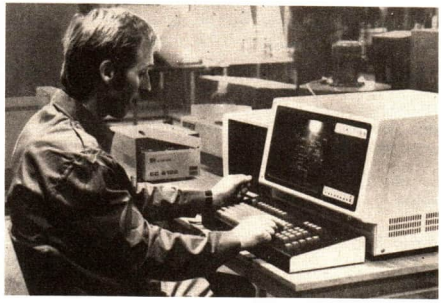
① Beschreiben Sie den Aufbau einer Elektronenstrahlröhre!
② Erläutern Sie die Steuerung der Intensität des Elektronenstrahls mit Hilfe des Wehnelt-Zylinders!
③ Erläutern Sie die Wirkungsweise einer Elektronenstrahlröhre!
④ Erklären Sie die Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld (Bild 70/1)!
⑤ Was für ein Bild wird auf dem Bildschirm eines Oszillographen (Bild 71/1) zu beobachten sein, wenn
   a) nur an die waagerecht angeordneten Platten eine Wechselspannung angelegt wird,
   b) nur an die senkrecht angeordneten Platten eine Wechselspannung angelegt wird,
   c) nur an die waagerecht angeordneten Platten eine Gleichspannung angelegt wird?
   Begründen Sie Ihre Antworten!

und jede Zeile aus einer großen Anzahl einzelner Bildpunkte zusammengesetzt ist. Bei Farbbildröhren sind drei Elektronenstrahlen und auf der Innenseite des Bildschirms drei verschiedene Leuchtschichten vorhanden, die entweder blau oder rot oder grün aufleuchten. Das Bild, das wir sehen, besteht aus einer großen Anzahl von winzigen blauen, roten und grünen Bildpunkten.

Zusammenfassung

	Gase	Vakuum
Bereitstellung wanderungsfähiger Ladungsträger	**durch Ionisation oder durch Emission (Glühemission, Fotoemission).**	**durch Emission (Glühemission, Fotoemission).**
Verlauf elektrischer Leitungsvorgänge	 **Elektronen und Ionen bewegen sich gerichtet.** **Es treten Wechselwirkungen zwischen Gasmolekülen, Ionen und Elektronen auf.** **Es wird Licht abgestrahlt und Wärme abgegeben.**	 **Elektronen bewegen sich gerichtet.** **Es treten keine Wechselwirkungen auf. Die Elektronen erreichen hohe Geschwindigkeiten.** **Die kinetische Energie der Elektronen wird in andere Energieformen umgewandelt.**
Anwendungen	**Lichtquellen (Glimmlampe, Leuchtstofflampe)** **Lichtbogen (Elektroschweißen, Elektroöfen)**	**Elektronenstrahlröhren (Oszillograph, Bildröhre)**

EDV-Anlagen, Roboter, Taschenrechner oder Quarzuhren sind das Ergebnis der stürmischen Entwicklung der Elektronik in den letzten Jahrzehnten. Entscheidend für die großen Fortschritte waren Erkenntnisse über den Aufbau und die elektrischen Leitungsvorgänge in Halbleitern. Was sind Halbleiter? Wie erfolgen die elektrischen Leitungsvorgänge in ihnen?



Aufbau von Halbleitern

Halbleiter sind Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der von Leitern und der von Isolatoren liegt. Zu ihnen gehören die chemischen Elemente Silizium, Germanium und Selen sowie verschiedene Verbindungen. Einer der für die Technik wichtigsten Halbleiter ist heute das Silizium. Die Siliziumatome sind regelmäßig in einem Kristallgitter angeordnet (Bild 73/2).

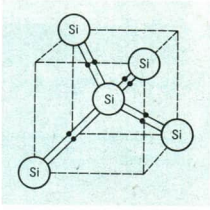


Bild 73/2 Räumliche Anordnung der Siliziumatome im Kristall

Nachfolgend betrachten wir zur Vereinfachung ebene Darstellungen.
In Bild 73/3 ist ein Ausschnitt aus einem Siliziumkristall in einer solchen ebenen Darstellung gezeichnet.
Jedes Siliziumatom hat vier Außenelektronen. Diese bilden mit den Außenelektronen benachbarter Atome Elektronenpaare. Zwischen den Atomen besteht also eine Atombindung. In reinem Silizium sind bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt alle Elektronen in den Atomhüllen gebunden (Bild 73/3). Bei Zimmertemperatur können einige Außenelektronen infolge ihrer Wärmebewegung die

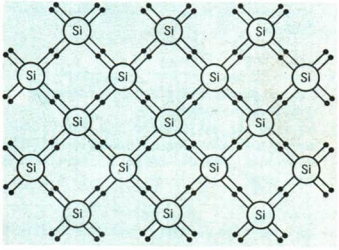


Bild 73/3 Ebene Darstellung eines Siliziumkristalls

Atomhülle verlassen. Sie stehen dann als wanderungsfähige Ladungsträger zur Verfügung. ① ②

Einfluß der Temperatur auf den Leitungsvorgang

Von Metallen wissen wir, daß ihr elektrischer Widerstand um so größer ist, je höher ihre Temperatur ist. Gilt das auch für Halbleiter? ③ ④

Diese Frage wollen wir am Beispiel eines Halbleiterwiderstandes untersuchen. Temperaturabhängige Halbleiterwiderstände werden als **Thermistoren** bezeichnet. Je nach der Art der Abhängigkeit ihres elektrischen Widerstandes von der Temperatur unterscheidet man zwischen *Heißleitern* und *Kaltleitern*. Wir verwenden für unsere Untersuchungen einen Heißleiter.

35

Aufgabe

Untersuchen Sie die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Heißleiters!

Vorbereitung

1. Bereiten Sie ein Protokoll mit Schaltplan (Bild 74/1) vor!
   Das Schaltzeichen für den Heißleiter ist im Schaltplan angegeben. Übernehmen Sie folgende Tabelle:

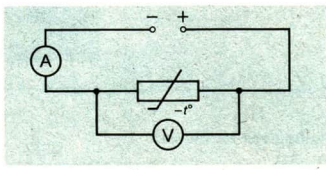


Bild 74/1 Schaltplan der Experimentieranordnung

Art des Widerstandes	Temperatur	U in V	I in mA	R in Ω
Metallischer Leiter	niedrig	3,2	450	
	hoch	3,5	380	
Heißleiter	niedrig			
	hoch			

2. Berechnen Sie die elektrischen Widerstände für den metallischen Leiter aus den gegebenen Größen!

Durchführung

1. Bauen Sie die Experimentieranordnung nach dem Schaltplan auf!
2. Messen Sie Spannung und Stromstärke am Heißleiter bei Zimmertemperatur! Benutzen Sie die Buchsenkombination 3–8!
3. Nehmen Sie den Heißleiter aus dem Grundbrett heraus! Erwärmen Sie ihn etwa 30 s lang in warmem Wasser! Trocknen Sie den Heißleiter ab! Messen Sie Spannung und Stromstärke am erwärmten Heißleiter bei der Buchsenkombination 3–8 und tragen Sie die Meßwerte in die Tabelle ein!

Auswertung

1. Berechnen Sie aus den gemessenen Größen die elektrischen Widerstände für den Heißleiter!
2. Vergleichen Sie die Veränderung des elektrischen Widerstandes von metallischen Leitern und von Heißleitern bei Erhöhung der Temperatur! Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede sind festzustellen?

Veränderung des elektrischen Widerstandes von Halbleitern bei Temperaturänderung. Wie ist die Verkleinerung des elektrischen Widerstandes von Halbleitern bei Temperaturerhöhung zu erklären?

Bei Temperaturerhöhung wird der elektrische Leitungsvorgang im Halbleiter durch zwei gegensätzliche Erscheinungen beeinflußt. Einerseits wird durch die heftigere Wärmebewegung der Teilchen des Stoffes die gerichtete Bewegung der Ladungsträger ähnlich wie in Metallen stärker behindert. Der elektrische Widerstand nimmt zu. Andererseits können infolge der Energiezufuhr mehr Elektronen ihre Bindung verlassen. Die Anzahl der wanderungsfähigen Ladungsträger vergrößert sich erheblich (Bilder 75/1 und 75/2). Damit vergrößert sich bei konstanter Spannung die Stromstärke. Das heißt: Der elektrische Widerstand nimmt ab! Insgesamt überwiegt bei den meisten Halbleitern die zuletzt beschriebene Erscheinung.

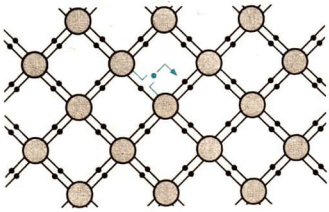


Bild 75/1 Halbleiter bei Zimmertemperatur

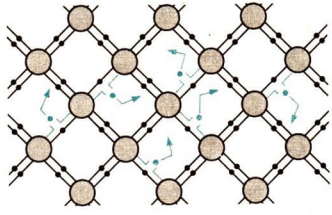


Bild 75/2 Halbleiter bei höherer Temperatur

Für solche Halbleiter gilt:

▶ **Je höher die Temperatur ist, desto kleiner ist der elektrische Widerstand von Halbleitern.**

Im Unterschied dazu wird bei Kaltleitern der elektrische Widerstand mit höherer Temperatur größer.
Dabei ist es gleichgültig, ob die Temperaturänderung durch Eigenerwärmung oder durch Fremderwärmung erfolgt. ⑤

Bedeutung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes bei Halbleitern. Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Halbleitern wird technisch genutzt.

---

① Stellen Sie mit Hilfe des Lehrbuches und des Tafelwerkes eine Übersicht über solche Leiter, Halbleiter und Isolatoren zusammen, die in der Praxis häufig verwendet werden!
② Beschreiben Sie den Aufbau von Silizium!
③ Erklären Sie, warum sich der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters bei Temperaturerhöhung vergrößert!
④ Stellen Sie Beispiele zusammen, bei denen die Eigenerwärmung metallischer Leiter a) genutzt wird, b) möglichst gering gehalten werden sollte!
⑤ Erläutern Sie die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Halbleitern! Vergleichen Sie mit Metallen!

■ In Halbleiterwiderstandsthermometern (Bild 76/1) wird als Meßfühler ein Heißleiter verwendet. Mit Hilfe des I-ϑ-Diagramms (Bild 76/2) kann jedem Wert des elektrischen Widerstandes eines Heißleiters eine bestimmte Temperatur zugeordnet werden. ①

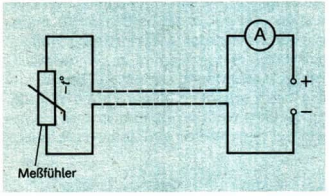


Bild 76/1 Aufbau eines Halbleiterwiderstandsthermometers

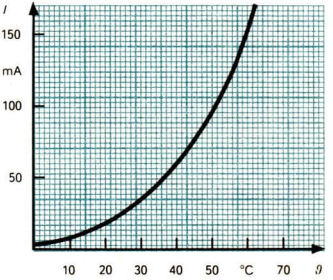


Bild 76/2 I-ϑ-Diagramm eines Heißleiters

Halbleiterwiderstandsthermometer werden beispielsweise zur Temperaturmessung an schwer zugänglichen Stellen von Motoren und Maschinen sowie zur Temperaturmessung in unzugänglichen, weit entfernten oder mit gesundheitsgefährdenden Materialien gefüllten Behältern, Rohrleitungen oder Räumen verwendet. Der Meßfühler kann dabei so klein wie ein Stecknadelkopf sein. ②

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Halbleitern ist in vielen Schaltungen eine unerwünschte Erscheinung. Durch die Reihenschaltung eines Heißleiters und eines metallischen Leiters kann erreicht werden, daß der elektrische Widerstand einer Schaltung weitgehend unabhängig von der jeweiligen Temperatur ist. ③ ④ ⑤

Interpretation von Diagrammen. In der Physik werden wichtige Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen häufig in Form von Diagrammen dargestellt. Um den physikalischen Inhalt eines Diagramms zu erfassen, muß es interpretiert werden. Bei der Interpretation von Diagrammen ist es zweckmäßig, in folgenden Schritten vorzugehen:

1. *Angeben der physikalischen Größen, die auf den Achsen abgetragen sind.*
2. *Nennen der Bedingungen, unter denen der dargestellte Zusammenhang gilt.*
3. *Angeben des zwischen den physikalischen Größen bestehenden Zusammenhangs.*
4. *Nennen eines Beispiels für den dargestellten Zusammenhang.*

Für ein bestimmtes Diagramm ist zu entscheiden, ob alle diese Schritte gegangen werden können oder ob eine Auswahl getroffen werden muß. Darüber hinaus ist zu beachten, daß bei manchen Diagrammen auch dem Anstieg des Graphen und der Fläche unter dem Graphen eine physikalische Bedeutung zukommt.

Für das I-ϑ-Diagramm eines Heißleiters bedeutet das:

- Im Diagramm ist der Zusammenhang zwischen der Stromstärke und der Temperatur angegeben.
- Der dargestellte Zusammenhang gilt unter den Bedingungen, daß die am Heißleiter anliegende Spannung U konstant ist.
- Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die Stromstärke. Es besteht aber keine direkte Proportionalität.
- Der Zusammenhang zeigt sich bei der Fremderwärmung eines Heißleiters, z. B. beim Halbleiterwiderstandsthermometer.

Einfluß von Licht auf den Leitungsvorgang

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes ist eine charakteristische Eigenschaft der meisten Halbleiter. Es gibt aber auch Halbleiter, bei denen der elektrische Leitungsvorgang durch Licht, Schall, elektrische und magnetische Felder oder mechanische Verformung beeinflußt werden kann.
Als Beispiel betrachten wir den Einfluß von Licht auf den Leitungsvorgang in Halbleitern.

■ Wenn es dunkel wird, schaltet sich die Straßenbeleuchtung automatisch ein. An vielen Aufzügen sind Lichtschranken eingebaut. Diese verhindern, daß sich die Türen schließen, wenn eine Person gerade ein- oder aussteigt. Wollen wir mit einem Fotoapparat richtig belichtete Aufnahmen machen, so ist es empfehlenswert, einen Belichtungsmesser zu verwenden.

In allen diesen Fällen werden Halbleiterbauelemente genutzt, bei denen der Leitungsvorgang durch Licht beeinflußt wird. Zu diesen Bauelementen gehören auch *Fotowiderstände* (Bild 77/1).

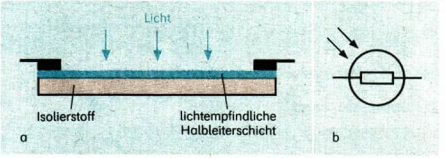


Bild 77/1 a) Aufbau eines Fotowiderstandes
b) Schaltzeichen für einen Fotowiderstand

Wird der Fotowiderstand nicht beleuchtet, so ist die Anzahl der wanderungsfähigen Ladungsträger gering. Das Bauelement hat einen hohen elektrischen Widerstand. Bei Beleuchtung des Fotowiderstandes verlassen infolge der Energiezufuhr mehr Elektronen ihre Bindung. Sie stehen als wanderungsfähige Elektronen zur Verfügung. Bei stärkerer Beleuchtung wächst die Anzahl der wanderungsfähigen Ladungsträger und damit die Stromstärke. Der elektrische Widerstand des Bauelements verringert sich.

▶ **Je stärker ein Fotowiderstand beleuchtet wird, um so kleiner wird sein elektrischer Widerstand.**

---

① Die an einem Heißleiter anliegende Spannung beträgt 6 V. Wie groß ist der elektrische Widerstand des Heißleiters bei einer Temperatur von a) 40°C, b) 60°C? Entnehmen Sie die zur Berechnung erforderlichen Größen dem Diagramm (Bild 76/2)!

② Begründen Sie, weshalb bei Halbleiterwiderständen zur Temperaturmessung mit möglichst kleinen Stromstärken im Meßfühlerkreis gearbeitet werden soll!

③ Informieren Sie sich anhand von Bedienungsanleitungen darüber, in welchen Temperaturbereichen Taschenrechner, Kofferradios, Quarzuhren, Fernsehgeräte und andere elektronische Geräte normal arbeiten!

④ Stellen Sie Beispiele dafür zusammen, wo die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Halbleitern a) genutzt wird, b) unerwünscht ist und vermieden werden muß!

⑤ Ein metallischer Leiter und ein Heißleiter sind in Reihe geschaltet.
Wie werden bei Temperaturerhöhung Stromstärke und elektrischer Widerstand a) durch den metallischen Leiter, b) durch den Heißleiter beeinflußt?
Begründen Sie Ihre Aussagen!

■ Fotowiderstände werden beispielsweise in Lichtschranken (Bild 78/1) verwendet. Wird das Licht, das von der Lichtquelle auf den Fotowiderstand fällt, durch eine Person oder einen Gegenstand unterbrochen, so verringert sich damit bei konstanter Spannung auch die Stromstärke. Dadurch wird z. B. ein Schalter, ein Zählwerk oder eine Alarmanlage ausgelöst. ① ② ③

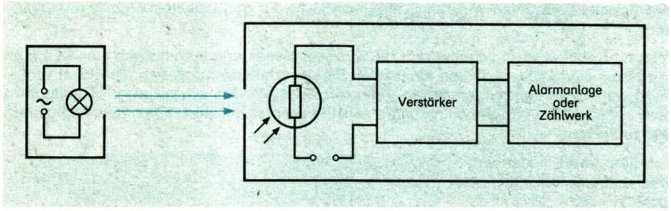
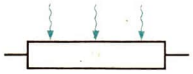


Bild 78/1 Aufbau einer Lichtschranke

Zusammenfassung

Beeinflussung elektrischer Leitungsvorgänge in Halbleitern

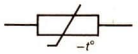
durch Wärme



Temperatur steigt ⇒ Elektrischer Widerstand sinkt

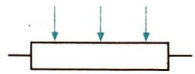
Beispiel: Heißleiter

Schaltzeichen:



Anwendung: Elektrische Temperaturmessung

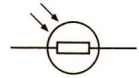
durch Licht



Beleuchtungsstärke steigt ⇒ Elektrischer Widerstand sinkt

Beispiel: Fotowiderstand

Schaltzeichen:



Anwendung: Lichtschranke

n- und p-leitende Halbleiter

Reine Halbleiter leiten bei Zimmertemperatur den elektrischen Strom nur schlecht. Praktische Bedeutung erlangten Halbleiter erst, als es technisch möglich wurde, ihre elektrische Leitfähigkeit gezielt zu beeinflussen.

Um das zu erreichen, wird mit Hilfe komplizierter technischer Verfahren zunächst hochreines Silizium hergestellt. Danach läßt man sehr geringe Mengen eines anderen Stoffes, z. B. Phosphordampf, in dieses reine Silizium hineindiffundieren. Diesen Vorgang nennt man *Dotieren*.
In einem dotierten Halbleiter entfällt beispielsweise auf etwa 100 Millionen Siliziumatome ein Phosphoratom.
Durch das Dotieren erhalten Halbleiter völlig neue und durch die Herstellung beeinflußbare elektrische Eigenschaften.
Wie sind solche dotierten Halbleiter aufgebaut? Wie erfolgt der Leitungsvorgang in ihnen?

n-leitende Halbleiter. Beim Einbau von fünfwertigem Phosphor in Silizium (Bild 79/1) werden vier der Außenelektronen durch benachbarte Siliziumatome gebunden. Das fünfte Elektron ist nur sehr lose gebunden und schon bei Zimmertemperatur wanderungsfähig. Wird eine Spannung angelegt, so bewegen sich die wanderungsfähigen Elektronen gerichtet, ähnlich wie in Metallen. Es fließt ein elektrischer Strom.

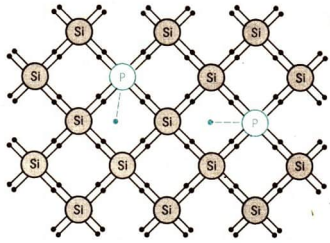


Bild 79/1 n-leitender Halbleiter

Da der Ladungstransport durch Elektronen erfolgt, werden solche Halbleiter als *n-leitend* (n von negativ) bezeichnet.

▶ **Durch Einbau von fünfwertigen Atomen in Silizium entstehen n-leitende Halbleiter. Die wanderungsfähigen Ladungsträger sind Elektronen.**

p-leitende Halbleiter. Durch Einbau von dreiwertigem Indium in Silizium (Bild 79/2) ist eine Stelle, an der sich sonst ein Elektron befindet, nicht besetzt. Es entsteht ein Loch oder, wie man auch sagt, ein Defektelektron.

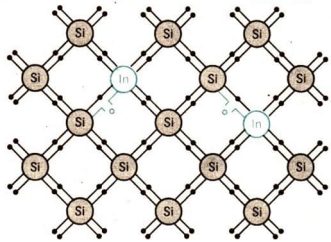


Bild 79/2 p-leitender Halbleiter

Wir wollen uns zunächst durch einen Vergleich mit einem Spielbrett verdeutlichen, wie in diesem Falle der elektrische Leitungsvorgang erfolgt.

---

① Erläutern Sie, warum sich der elektrische Widerstand eines Fotowiderstandes mit Veränderung der Beleuchtungsstärke verändert!
② Beschreiben Sie den Aufbau und erläutern Sie die Wirkungsweise einer Lichtschranke!
③ Stellen Sie Beispiele dafür zusammen, wo die Beeinflussung elektrischer Leitungsvorgänge durch Licht genutzt wird!

Auf einem Spielbrett (Bild 80/1) ist ein Teil der Felder mit schwarzen Steinen besetzt, einige Felder sind frei. Schieben wir einen schwarzen Stein nach rechts, so wandert das freie Feld nach links. Wiederholen wir das mehrmals, so wandern die schwarzen Steine nach rechts, die freien Felder nach links.

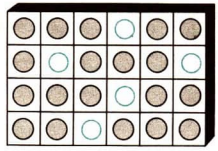


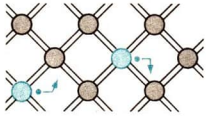
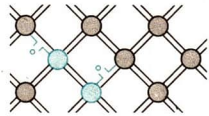
Bild 80/1

In ähnlicher Weise verläuft der Leitungsvorgang in einem p-leitenden Halbleiter. Beim Anlegen einer Spannung kann ein Elektron seinen Platz verlassen und ein Loch ausfüllen. An seinem ehemaligen Platz befindet sich nun ein Loch. Wie in dem Vergleich mit dem Spielbrett (Bild 80/1) wandert das Elektron unter dem Einfluß des elektrischen Feldes in die eine und damit das Loch in die andere Richtung. Dieser Vorgang geht im ganzen Halbleiter ständig vor sich. Es erfolgt also eine Bewegung von Elektronen in der einen und damit eine Bewegung von Löchern in der entgegengesetzten Richtung.
Für das Zustandekommen des elektrischen Stromes ist das Vorhandensein von Löchern entscheidend. Da sich die Löcher wie positive Ladungsträger verhalten, werden solche Halbleiter als *p-leitend* (p von positiv) bezeichnet.

▶ **Durch Einbau von dreiwertigen Atomen in Silizium entstehen p-leitende Halbleiter. Die wanderungsfähigen Ladungsträger sind Löcher (Defektelektronen).**

①

Zusammenfassung

Halbleiter	n-leitend	p-leitend
Aufbau	 Im Halbleiter sind wanderungsfähige Elektronen vorhanden.	 Im Halbleiter sind Löcher vorhanden.
Verlauf des Leitungsvorganges	Beim Anlegen einer Spannung bewegen sich die wanderungsfähigen Elektronen gerichtet (ähnlich wie bei Metallen).	Beim Anlegen einer Spannung springen Elektronen von Loch zu Loch. Der Leitungsvorgang kann durch die Wanderung von Löchern beschrieben werden.

Halbleiterdioden

Viele elektronische Geräte arbeiten mit Gleichspannung, häufig steht jedoch nur Wechselspannung zur Verfügung. Die Gleichrichtung der Wechselspannung erfolgt meist durch Halbleiterdioden. Wie sind Halbleiterdioden aufgebaut? Wie arbeiten sie?

Aufbau einer Halbleiterdiode. Eine Silizium-Halbleiterdiode besteht aus einem Siliziumkristall, der durch Einbau von Fremdatomen ein p-leitendes und ein n-leitendes Gebiet hat. An der Grenze zwischen diesen beiden Gebieten bildet sich ein sehr schmaler, an Ladungsträgern verarmter p-n-Übergang aus. Dieser nur Bruchteile eines Millimeters breite p-n-Übergang ist für den Leitungsvorgang in einer Halbleiterdiode von entscheidender Bedeutung.

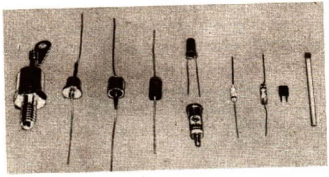


Bild 81/1 Halbleiterdioden

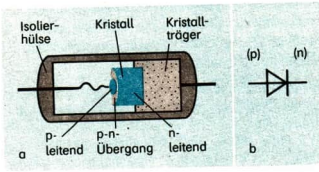


Bild 81/2 a) Aufbau einer Halbleiterdiode
b) Schaltzeichen für eine Halbleiterdiode

Wirkungsweise einer Halbleiterdiode. Was geschieht, wenn wir an eine Halbleiterdiode eine Gleichspannung anlegen?

36

Aufgabe
Untersuchen Sie den Stromfluß durch eine Halbleiterdiode in Abhängigkeit von der Polung der Spannungsquelle!

Durchführung
1. Bauen Sie die Experimentieranordnung nach Bild 81/3 auf! Verwenden Sie die Buchsenkombination 3–8! Beobachten Sie die Glühlampe!
2. Verändern Sie die Polung der Spannungsquelle! Beobachten Sie wiederum die Glühlampe!

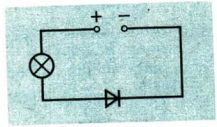


Bild 81/3 Schaltplan der Experimentieranordnung

Wie ist das Ergebnis zu erklären?
Wenn der Pluspol der Spannungsquelle mit dem p-leitenden Gebiet und der Minuspol mit dem n-leitenden Gebiet verbunden werden (Bild 81/4), dann bewegen sich die Elektronen und die Löcher im elektrischen Feld so, daß der p-n-Übergang mit Ladungsträgern überschwemmt wird. Damit sind in der gesamten Halbleiterdiode wanderungsfähige Ladungsträger vorhanden. Es fließt ein Strom. Die Halbleiterdiode ist in *Durchlaßrichtung* geschaltet.

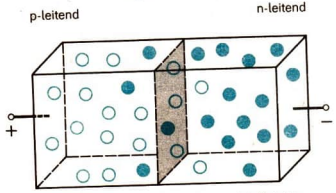


Bild 81/4 Halbleiterdiode in Durchlaßrichtung

① Erläutern Sie den elektrischen Leitungsvorgang in einem n-leitenden und in einem p-leitenden Halbleiter!

Wird die Spannungsquelle umgepolt (Bild 82/1), dann bewegen sich die Elektronen und die Löcher im elektrischen Feld so, daß der p-n-Übergang breiter wird. Im p-n-Übergang sind keine wanderungsfähigen Ladungsträger mehr vorhanden. Es kann demzufolge kein Strom fließen. Die Halbleiterdiode ist in *Sperrichtung* geschaltet. ①

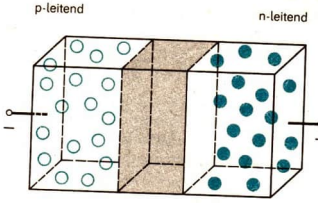


Bild 82/1 Halbleiterdiode in Sperrichtung

Anwendung von Halbleiterdioden. Aus der Eigenschaft der Halbleiterdioden, den Strom in der einen Richtung zu sperren und in der anderen Richtung hindurchzulassen, ergibt sich auch ihr Hauptanwendungsgebiet. Sie werden vorwiegend zur Gleichrichtung von Wechselströmen verwendet.

37

An eine Reihenschaltung von Diode und Widerstand (Bild 82/2) wird eine Wechselspannung gelegt. Der zeitliche Verlauf der Spannung wird mit Hilfe eines Oszillographen sichtbar gemacht. Es entstehen ein pulsierender Gleichstrom und eine entsprechende Gleichspannung. ② ③

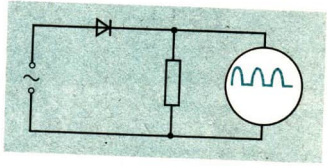


Bild 82/2 Einfache Gleichrichterschaltung

Zusammenfassung

Eine Halbleiterdiode besteht aus einem Halbleiterkristall mit einem p- und einem n-leitenden Gebiet. Zwischen diesen befindet sich ein an wanderungsfähigen Ladungsträgern verarmter p-n-Übergang.

Halbleiterdioden können in Durchlaß- oder in Sperrichtung geschaltet werden.

Durchlaßrichtung

(+) ——▷|—— (−)

Sperrichtung

(−) ——|◁—— (+)

Halbleiterdioden werden vorwiegend als Gleichrichter verwendet.

Transistoren

Die im Jahre 1948 erfundenen Transistoren gehören heute zu den wichtigsten Halbleiterbauelementen.
Als Verstärker oder Schalter sind sie Bestandteil der meisten elektronischen Geräte.
Wie sind Transistoren aufgebaut? Wie arbeiten sie?
Es gibt verschiedene Arten von Transistoren, die sich in Bauform und Wirkungsweise unterscheiden. Die zwei Hauptgruppen von Transistoren sind Bipolartransistoren und Feldeffekttransistoren.

Aufbau des npn-Silizium-Transistors. Ein weit verbreiteter Typ von Bipolartransistoren ist der npn-Silizium-Transistor. Er besteht aus einem Siliziumkristall, der durch Dotieren zwei n-leitende Gebiete und ein sehr schmales p-leitendes Gebiet hat. Zwischen dem p-leitenden Gebiet und den beiden n-leitenden Gebieten existieren, wie bei einer Halbleiterdiode, p-n-Übergänge.

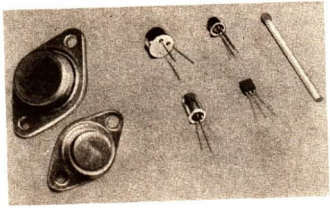


Bild 83/1 Einige Arten von Transistoren

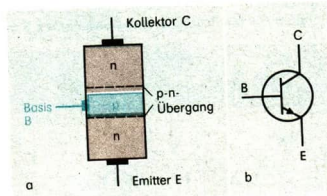


Bild 83/2 a) Aufbau eines npn-Silizium-Transistors
b) Schaltzeichen für einen npn-Transistor ④

Wirkungsweise des npn-Silizium-Transistors. Ein Transistor kann in verschiedener Weise geschaltet werden. Bild 83/3 zeigt eine Schaltmöglichkeit, die *Emitterschaltung*. Zwischen Basis und Emitter liegt die Spannung U_{BE}, der Strom in diesem Stromkreis heißt Basisstrom. Zwischen Kollektor und Emitter liegt die Spannung U_{CE}, der Strom in diesem Stromkreis wird als Kollektorstrom bezeichnet.

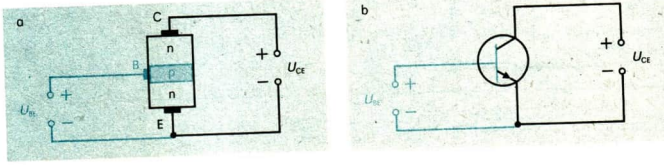


Bild 83/3 Transistor in Emitterschaltung

Vergleichen wir die Schaltung der p-n-Übergänge mit der bei einer Halbleiterdiode, so können wir feststellen:
Bei der Schaltung eines Transistors wird der p-n-Übergang zwischen Basis und Emitter in Durchlaßrichtung, der p-n-Übergang zwischen Basis und Kollektor in Sperrichtung betrieben. ⑤

---

① Erklären Sie die Gleichrichterwirkung einer Halbleiterdiode anhand der Vorgänge in diesem Bauelement!
② Beschreiben Sie den Aufbau und erläutern Sie die Wirkungsweise einer einfachen Gleichrichterschaltung!
③ Welches Bild ist auf dem Oszillographenschirm zu erwarten, wenn die Halbleiterdiode (Bild 82/2) a) überbrückt wird, b) umgepolt wird?
④ Beschreiben Sie den Aufbau eines npn-Silizium-Transistors!
⑤ Beschreiben Sie die Emitterschaltung eines Transistors!
Vergleichen Sie dabei die Schaltung der beiden p-n-Übergänge mit der Schaltung des p-n-Übergangs bei einer Diode!

Unter welchen Bedingungen fließen durch einen Transistor elektrische Ströme? Wie beeinflussen sich diese Ströme gegenseitig?

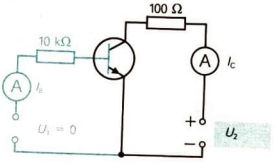
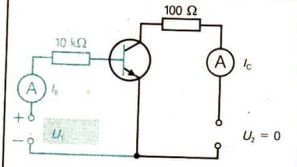
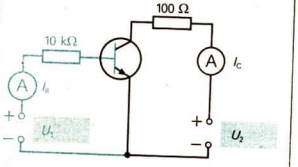
38

Aufgabe

Untersuchen Sie die Basisstromstärke I_B und die Kollektorstromstärke I_C eines Transistors!

Vorbereitung

Bereiten Sie ein Protokoll vor! Übernehmen Sie folgende Tabelle:

Untersuchter Fall	Bedingungen	I_B in mA	I_C in mA
	$U_1 = 0$ $U_2 \approx 10$ V (Stellung 2 am SVG)		
	$U_1 \approx 1{,}5$ V (Stellung 1,5 am SVG) $U_2 = 0$ $U_1 \approx 2$ V (Stellung 2 am SVG) $U_2 = 0$		
	$U_1 \approx 1{,}5$ V $U_2 \approx 10$ V $U_1 \approx 2$ V $U_2 \approx 10$ V		

Durchführung

1. Bauen Sie die Experimentieranordnung nach dem Schaltplan (siehe Vorbereitung) auf! Als Spannungsquelle wird das Zusatzteil zum Schülerstromversorgungsgerät (SVG) benutzt (für U_1 linke obere Buchsen, für U_2 rechte obere Buchsen)!
2. Messen Sie jeweils die Basisstromstärke I_B und die Kollektorstromstärke I_C unter den vorgegebenen Bedingungen (siehe Tabelle!)! Die Einstellung der jeweiligen Spannungen erfolgt mit Hilfe des stellbaren Widerstandes am Zusatzteil des Schülerstromversorgungsgerätes.

Auswertung

Vergleichen Sie die Basisstromstärke I_B und die Kollektorstromstärke I_C bei den verschiedenen Bedingungen! Formulieren Sie das Ergebnis in Worten!

Im Ergebnis dieses Experiments und weiterer Untersuchungen können wir bezüglich der Wirkungsweise des Transistors folgende wichtige Aussagen treffen:

Beim npn-Transistor fließt nur dann ein Kollektorstrom I_C, wenn auch ein Basisstrom I_B fließt.
Bei U_{CE} = konstant bewirkt eine kleine Änderung der Basisstromstärke I_B eine große Änderung der Kollektorstromstärke I_C. Der Kollektorstrom wird durch den Basisstrom gesteuert.

Eine Erklärung der Vorgänge im Transistor ist sehr kompliziert. Stark vereinfacht können wir uns diese Vorgänge folgendermaßen vorstellen: Aus dem in Durchlaßrichtung betriebenen p-n-Übergang zwischen Emitter und Basis gelangen wanderungsfähige Ladungsträger in den dicht benachbarten p-n-Übergang zwischen Basis und Kollektor. Diese Ladungsträger werden in Richtung Kollektor „abgesaugt". Es fließt somit ein Kollektorstrom. ①

Anwendung von Transistoren. Aus der Wirkungsweise und den Eigenschaften von Transistoren ergeben sich ihre Hauptanwendungsbereiche. Ein Transistor kann als kontaktloser elektronischer *Schalter* verwendet werden (↗ ESP Kl. 9). Durch einen Schalter können elektrische Stromkreise geöffnet oder geschlossen werden. Mit Hilfe eines Transistors kann das folgendermaßen geschehen:

Basisstromstärke $I_B = 0$	$\Longrightarrow$	Es fließt kein Kollektorstrom. (Schalter geöffnet)
Basisstromstärke $I_B > 0$	$\Longrightarrow$	Es fließt ein Kollektorstrom. (Schalter geschlossen)

Der Kollektorstromkreis wird also durch den Basisstromkreis geschaltet.
Außerdem werden Transistoren als *Verstärker* verwendet.

39 Die Spannung U_{CE} wird konstant gehalten, die Basisstromstärke I_B durch Veränderung von U_{BE} verändert (Bild 85/1). Die für I_B und I_C gemessenen Werte werden in einem Diagramm dargestellt (Bild 85/2).

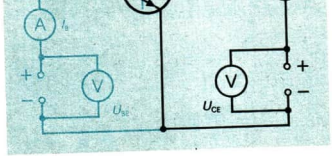


Bild 85/1 Schaltplan der Experimentieranordnung

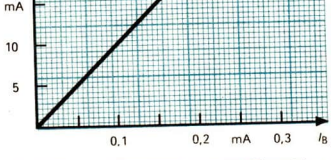


Bild 85/2 I_C-I_B-Diagramm eines npn-Transistors

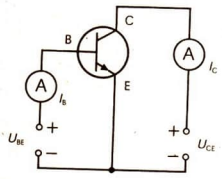
① Erläutern Sie die Steuerung des Kollektorstromes durch den Basisstrom bei einem npn-Transistor in Emitterschaltung!

Aus dem Diagramm ist ablesbar: Die Kollektorstromstärke I_C ist wesentlich größer als die Basisstromstärke I_B.
Eine kleine Änderung der Basisstromstärke bewirkt eine große Änderung der Kollektorstromstärke. Der Quotient aus der Kollektorstromstärke I_C und der entsprechenden Basisstromstärke I_B wird als Stromverstärkung bezeichnet. Im betrachteten Beispiel beträgt die Stromverstärkung $\frac{10\ \text{mA}}{0{,}1\ \text{mA}} = 100$. Sie kann auch größer oder kleiner sein. Das hängt vom Typ des Transistors und von seiner Schaltung ab. ① ② ③ ④

Zusammenfassung

Ein npn-Silizium-Transistor besteht aus einem Siliziumkristall mit zwei n-leitenden und einem schmalen p-leitenden Gebiet. Die drei Anschlüsse heißen Emitter E, Basis B und Kollektor C.

Emitterschaltung



Bei konstanter Kollektorspannung U_{CE} fließt nur dann ein Kollektorstrom, wenn auch ein Basisstrom fließt.

Die Kollektorstromstärke I_C ist wesentlich größer als die Basisstromstärke I_B.
Eine kleine Änderung von I_B bewirkt eine große Änderung von I_C. Der Kollektorstrom wird durch den Basisstrom gesteuert.

Transistoren werden als Schalter und als Verstärker verwendet.

Anwendungen elektronischer Bauelemente

Mehr als ein Vierteljahrhundert wurde die Elektronik durch die Elektronenröhren geprägt. Etwa Mitte der fünfziger Jahre begann deren Ablösung durch Halbleiterbauelemente. Diese wiesen gegenüber den Elektronenröhren entscheidende Vorteile auf.

Insbesondere hatten sie ein geringeres Volumen (Bild 86/2), eine kleinere Masse, eine höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie einen kleineren Energiebedarf. Wesentlich höher als bei Elektronenröhren waren allerdings die Anforderungen an die Herstellungstechnologien.

Bild 86/2 Elektronenröhren und Transistoren

Ausgelöst durch die Bedürfnisse der Raumfahrt, der Automatisierungs- und Rechentechnik sowie anderer Bereiche von Wissenschaft, Technik und Produktion nach immer leistungsfähigeren, zuverlässigeren und kleineren elektronischen Schaltungen entwickelte sich ab etwa 1960 eine neue Richtung der Elektronik, die Mikroelektronik. Mit Hilfe komplizierter Technologien wurde es möglich, die einzelnen Bauelemente immer mehr zu verkleinern und zu Bausteinen zusammenzufassen. Solche Bausteine werden als *integrierte Schaltkreise* bezeichnet (Bilder 87/1 und 87/2).

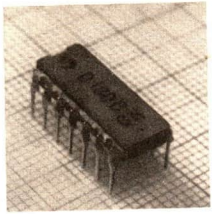


Bild 87/1 Integrierter Schaltkreis

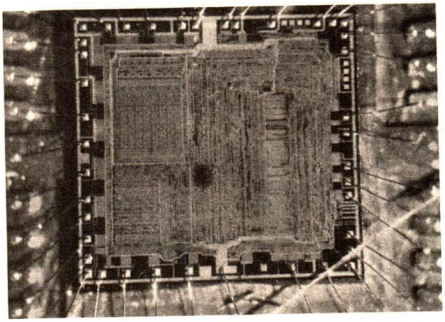


Bild 87/2 Teil eines integrierten Schaltkreises (im Vergleich dazu ein Haar)

Ein integrierter Schaltkreis kann die gleichen Funktionen wie komplizierte Schaltungen aus vielen einzelnen Bauelementen erfüllen.

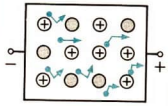
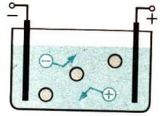
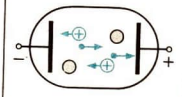
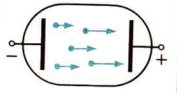
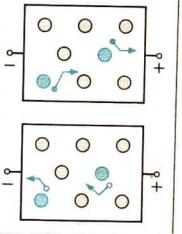
Die Mikroelektronik gewinnt für fast alle Bereiche unseres Lebens zunehmend an Bedeutung. Sie bewirkt die Umgestaltung vieler Arbeitsplätze, ermöglicht die umfassende Rationalisierung und Intensivierung der Produktion, entlastet die Menschen immer mehr von körperlich schwerer und eintöniger Arbeit und führt zur weiteren Verbesserung ihrer Arbeits- und Lebensbedingungen. Im Unterschied zu den imperialistischen Ländern werden in den sozialistischen Ländern die Errungenschaften von Wissenschaft und Technik ausschließlich zum Wohle der Menschen und zum Schutz des Friedens genutzt.

Beispiele für die Anwendung der Elektronik in verschiedenen Bereichen sind auf der zweiten Umschlagseite dargestellt. ⑤ ⑥

---

① Erläutern Sie die Anwendung eines Transistors als Schalter!
② Interpretieren Sie das I_C-I_B-Diagramm eines npn-Transistors (Bild 85/2)!
③ Erläutern Sie anhand des I_C-I_B-Diagramms (Bild 85/2) die Verstärkerwirkung eines Transistors!
④ Berechnen Sie aus den im Schülerexperiment gemessenen Werten die Stromverstärkung für den dort verwendeten Transistor!
⑤ Informieren Sie sich darüber, wo Halbleiterbauelemente angewendet werden! Nutzen Sie dabei neben dem Lehrbuch die Tagespresse und Zeitschriften wie „Technikus", „Jugend und Technik" oder „Urania"!
Bereiten Sie zum Thema „Nutzung von Halbleiterbauelementen" einen Kurzvortrag vor!
⑥ Berichten Sie anhand von Beispielen darüber, wie die Anwendung der Elektronik zu Veränderungen in den Arbeits- und Lebensbedingungen geführt hat!

Systematisierung zu den elektrischen Leitungsvorgängen

Stoff/ Vakuum	Wanderungsfähige Ladungsträger	Verlauf des Leitungsvorgangs	Wichtige Bauelemente	Anwendungen
Metalle	Elektronen (Metallbindung)		Metallische Leiter Widerstände	In allen elektrischen Geräten und Anlagen vorhanden
Leitende Flüssigkeiten	Positiv und negativ geladene Ionen (Dissoziation)		Elektrolysezellen	Herstellung von Aluminium, Chlor, Wasserstoff
Gase	Elektronen positiv geladene Ionen (Ionisation oder Emission)		Glimmlampen Leuchtstofflampen Lichtbogen	Kontrolllampen Beleuchtung von Räumen Lichtbogenschweißen
Vakuum	Elektronen (Emission)		Elektronenstrahlröhren	Bildröhren in Fernsehgeräten, in Oszillographen, in der EDV
Halbleiter	Elektronen oder Löcher (Dotieren)		Heißleiter Fotowiderstand Diode Transistor	Widerstandsthermometer Lichtschranke Gleichrichter Schalter, Verstärker

Gesetze in elektrischen Stromkreisen

1. Im Diagramm (Bild 89/1) ist der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung für zwei Geräte dargestellt.
   a) Welches der Geräte hat den größeren elektrischen Widerstand? Begründen Sie Ihre Antwort!
   b) Berechnen Sie die elektrischen Widerstände der Geräte!

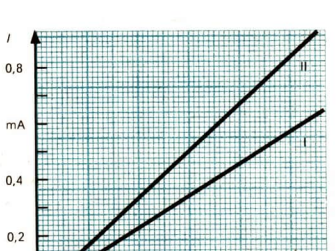


Bild 89/1

2. Wovon ist die Stromstärke in einem metallischen Leiter abhängig? Wie ist sie von den verschiedenen Größen abhängig?
3. Nachdem in einem Stromkreis ein Leiter gegen andere Leiter ausgewechselt wurde, zeigt der Strommesser a) eine kleinere Stromstärke, b) die gleiche Stromstärke, c) eine größere Stromstärke an.
   Wie kann das erklärt werden?
4. Im Haushalt wird eine Glühlampe durch eine mit doppelter Leistung ersetzt. Wie wirkt sich das aus a) auf die Stromstärke, b) auf den elektrischen Widerstand in diesem Stromkreis, c) auf die Kosten für die vom elektrischen Strom verrichtete Arbeit bei 10 Stunden Betrieb?
   Begründen Sie die Antworten!
5. Eine Glühlampe 6 V/0,6 W soll an eine Autobatterie (Klemmenspannung 12 V) angeschlossen werden. Wie groß muß der Widerstand sein, der mit der Glühlampe in Reihe geschaltet werden muß?

Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum

6. Die Glimmlampe in einem Polsucher leuchtet auf, wenn man ihn in eine Buchse einer Steckdose hineinsteckt. Wieso fließt durch die Glimmlampe ein Strom, obwohl scheinbar kein geschlossener Stromkreis vorhanden ist?
7. Eine Leuchtstofflampe hat einen Wirkungsgrad von 10%. Was bedeutet diese Angabe?
8. Vergleichen Sie die von einem Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von 1 V im Vakuum erreichte Geschwindigkeit (↗ S. 69) mit der Geschwindigkeit a) eines Pkw, der auf der Autobahn mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit fährt, b) eines Raumschiffes auf einer Erdumlaufbahn, c) des Lichtes! Rechnen Sie alle Geschwindigkeiten in ein- und dieselbe Einheit um!
9. Geben Sie eine Möglichkeit an, wie man experimentell nachweisen kann, daß Elektronenstrahlen aus negativen Ladungsträgern (Elektronen) bestehen!

Elektrische Leitungsvorgänge in Halbleitern

10. Beschreiben Sie Experimente, mit denen man die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes a) eines metallischen Leiters, b) eines Halbleiters nachweisen kann!

11. Bild 90/1 zeigt das *I-U*-Diagramm für zwei verschiedene Bauelemente. a) Wie verändert sich mit steigender Spannung der elektrische Widerstand der Bauelemente I und II? b) Um welche Bauelemente könnte es sich handeln? c) Wie kann die Widerstandsänderung erklärt werden?

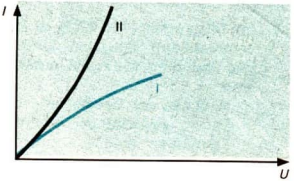


Bild 90/1

12. Von zwei äußerlich gleichen Widerständen ist der eine ein Heißleiter, der andere ein metallischer Leiter. Wie können Sie ermitteln, welches der Heißleiter ist?

13. Bei konstanter Spannung $U = 10$ V werden bei einem Heißleiter bei unterschiedlichen Temperaturen Stromstärken von 30 mA, 100 mA und 50 mA gemessen. Ordnen Sie die Stromstärken den Temperaturen zu (siehe Tabelle)! Begründen Sie Ihre Zuordnung! Berechnen Sie den jeweiligen elektrischen Widerstand!

	kalt	warm	heiß
I in mA			
R in Ω			

14. Begründen Sie, weshalb der elektrische Widerstand eines Halbleiters von der Anzahl der eingebauten Fremdatome abhängig ist!

15. Bei einem Experiment wurde für ein Bauelement folgende Meßreihe aufgenommen:

U in V	0	40	80	120	160	200
I in mA	0	140	200	250	280	310

a) Zeichnen Sie das *I-U*-Diagramm! b) Um welches Bauelement könnte es sich handeln? Begründen Sie Ihre Antwort! c) Berechnen Sie den elektrischen Widerstand des Bauelements für die Spannungen 40 V, 80 V, 200 V!

16. Ihnen stehen drei geschlossene Kästen (Black box) mit je zwei Anschlüssen, ein Strommesser und eine Gleichspannungsquelle zur Verfügung. In einem dieser Kästen befindet sich ein Isolator, in einem ein metallischer Leiter und in einem eine Halbleiterdiode. Welche Experimente müssen Sie durchführen, um eindeutig sagen zu können, in welchem Kasten sich welches Bauelement befindet? Stellen Sie eine Übersicht über die erforderlichen Experimente zusammen!

17. Für eine Schaltung benötigen Sie eine Diode. Ihnen steht aber nur ein npn-Transistor zur Verfügung. a) Wie müßte er geschaltet werden, damit er als Diode verwendbar ist? b) Gibt es für die Schaltung des Transistors mehrere Möglichkeiten?

18. Nennen und erläutern Sie je ein technisch bedeutsames Beispiel für die Anwendung von Leitungsvorgängen a) in Metallen, b) in Flüssigkeiten, c) in Gasen, d) im Vakuum, e) in Halbleitern!

MECHANIK

Kinematik

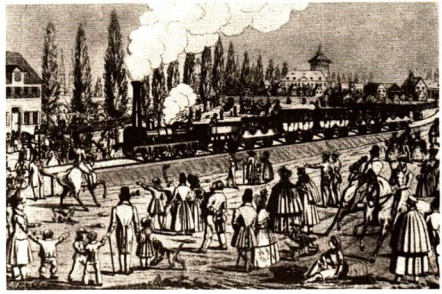
Die Gesetze der Mechanik werden im Maschinenbau (Bild 91/1 zeigt einen automatisierten Pressenkomplex), im Verkehrswesen, bei der Mechanisierung von Arbeitsprozessen, bei der Raumfahrt angewendet. In der **Kinematik**, einem Teilgebiet der Mechanik, werden Bewegungen von Körpern untersucht, unabhängig davon, ob Kräfte auf die Körper wirken oder nicht. In einem anderen Teilgebiet, der **Dynamik**, untersucht man den Einfluß von Kräften auf die Bewegung der Körper.

Bereits den ältesten Kulturvölkern waren Anwendungen der Mechanik bekannt. Bauwerke wurden nach einfachen mechanischen Prinzipien, die zu den Erfahrungen der Menschen gehörten, errichtet. Die Entwicklung der Mechanik war mit der Beobachtung von Bewegungen der Himmelskörper sowie von Mond- und Sonnenfinsternissen verbunden. Bis in das 16. Jahrhundert deutete man die beobachtete Ortsveränderung der Gestirne am Sternhimmel so, als ob sich diese um die Erde bewegten. Die Vorstellung von einer Welt mit der Erde als Mittelpunkt wurde durch das Weltbild des Copernicus korrigiert. In diesem Weltbild ist die Sonne das Zentrum, das unsere Erde und weitere Planeten umlaufen. Wir wissen heute, daß sich auch die Sonne als einer von Milliarden Sternen unserer Milchstraße bewegt.

Seit dem 17. Jahrhundert ist es durch Anwendung der Mathematik in der Mechanik möglich, die Gesetze für die Bewegungen von Körpern mit Hilfe von Gleichungen exakt auszudrücken. Dadurch können physikalische Größen berechnet werden, die den Verlauf der Bewegungen von Körpern charakterisieren.

Das obenstehende Bild zeigt Galileo Galilei beim Vorführen seiner Experimente zum freien Fall.

Die erste deutsche Eisenbahnlinie (Nürnberg–Fürth) wurde 1835 eröffnet. Fahrgäste, die das erste Mal in ihrem Leben mit einer Eisenbahn fuhren, berichteten: „Häuser und Bäume sind an uns vorbeigeflogen." Wie ist diese Feststellung der Fahrgäste zu erklären?



Relativität der Bewegung

▶ **Als mechanische Bewegung eines Körpers bezeichnet man die Veränderung seines Ortes relativ zu einem Bezugskörper.**
Ein Körper ist in Ruhe, wenn er seinen Ort gegenüber einem Bezugskörper nicht ändert.

Bei Experimenten zur elektromagnetischen Induktion (↗ Abschnitt 4) war es gleichgültig, ob der Magnet in die Spule hineinbewegt oder die Spule auf den Magneten geschoben wurde. Entscheidend ist, daß sich Spule und Magnet relativ zueinander bewegen.

■ Die Relativität der Bewegung nutzt man z. B. auch bei Filmaufnahmen aus. Soll die Fahrt eines Autos dargestellt werden, so läßt man das Auto am Ort stehen und bewegt ein Bild der Landschaft hinter dem Auto. Für den Zuschauer entsteht der Eindruck einer Bewegung des Autos. ① ② ③

① Fernsehsatelliten stehen in 36000 km Höhe „fest" über der Erde. Dennoch bewegen sie sich mit großer Geschwindigkeit. Wie ist das zu verstehen?

② Geben Sie zweckmäßige Bezugskörper für folgende Bewegungen an!
a) Flugzeug auf der Route Berlin–Moskau,
b) Meteorit beim Eindringen in die Erdatmosphäre (Sternschnuppe),
c) Mondsonde beim Umfliegen des Mondes,
d) Emittiertes Elektron in einer Elektronenstrahlröhre,
e) Vorschubbewegung eines Drehmeißels.

③ In einem Kaufhaus steht ein Kind auf einer sich bewegenden Rolltreppe. Geben Sie Bezugskörper an, gegenüber denen das Kind a) in Ruhe oder b) in Bewegung ist!

Massepunkt. Bei der Beschreibung der Bewegung von Körpern unterscheidet man Bewegungen, bei denen die Form und das Volumen des Körpers vernachlässigt werden können, und Bewegungen, bei denen das nicht möglich ist.

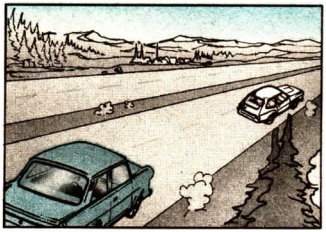


Bild 94/1

Soll die Fahrt eines Autos auf der Autobahn beschrieben werden, so können Form und Volumen des Autos unberücksichtigt bleiben. Jeder Punkt des Autos kann als Repräsentant des Autos zur Beschreibung der Bewegung genutzt werden. Einen solchen Punkt bezeichnet man als **Massepunkt**. Er besitzt Merkmale, die für die Untersuchung von Bewegungen wesentlich sind (Masse, Ort, Geschwindigkeit).

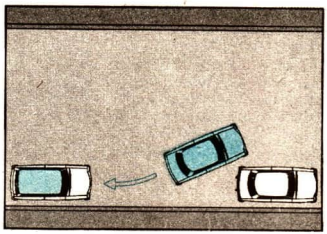


Bild 94/2

Soll ein Auto in eine Parklücke eingeordnet werden, so dürfen die Form und das Volumen des Autos nicht unberücksichtigt bleiben, da es sonst zur Beschädigung von Autos kommen könnte. Die Beschreibung dieser Bewegung des Autos kann nicht durch die Beschreibung der Bewegung eines beliebigen Punktes des Autos erfolgen. Das Modell Massepunkt kann nicht benutzt werden.

Der Massepunkt ist ein physikalisches Modell zur vereinfachten Beschreibung der Bewegung eines Körpers. Volumen und Form des Körpers werden vernachlässigt, die Masse des Körpers wird diesem Punkt zugeordnet.

Die Gesetze, die wir in der Kinematik kennenlernen werden, gelten nur für Bewegungen von Körpern, die als Massepunkt betrachtet werden können. ①

Geschwindigkeit

Physikalische Bedeutung der Geschwindigkeit. Körper können sich schnell oder langsam bewegen. Uns ist bekannt:

- Die Geschwindigkeit eines Körpers gibt an, wie schnell sich dieser bewegt.
- Das Formelzeichen für die Geschwindigkeit ist v.
- Die Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Körpers wird berechnet nach der Gleichung $v = \frac{s}{t}$.
- Die Einheit der Geschwindigkeit ist ein Meter je Sekunde ($1\ m \cdot s^{-1}$).
  Weitere Einheiten sind: ein Kilometer je Stunde ($1\ km \cdot h^{-1}$) und ein Zentimeter je Sekunde ($1\ cm \cdot s^{-1}$).
  Umrechnungen: $1\ m \cdot s^{-1} = 3{,}6\ km \cdot h^{-1}$; $1\ m \cdot s^{-1} = 100\ cm \cdot s^{-1}$ ② ③

Durchschnittsgeschwindigkeit. Wir wissen bereits, daß die Durchschnittsgeschwindigkeit $\overline{v}$ eines Körpers nach der Gleichung $\overline{v} = \frac{s}{t}$ berechnet wird. Darin bedeuten s den insgesamt zurückgelegten Weg und t die dazu benötigte Zeit.
Im täglichen Leben reichen Angaben über Durchschnittsgeschwindigkeiten oft nicht aus. Man benötigt Angaben über die Geschwindigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt. ④

Augenblicksgeschwindigkeit. Im Straßenverkehr wird die Augenblicksgeschwindigkeit von Fahrzeugen mit einem Tachometer gemessen. In Lkw und Autobussen sind Fahrtenschreiber eingebaut, die die Geschwindigkeit und den Weg zu jedem Zeitpunkt in einem Diagramm (Bild 95/1) aufzeichnen. Näherungsweise kann die Augenblicksgeschwindigkeit eines Körpers bestimmt werden, indem die Durchschnittsgeschwindigkeit für einen hinreichend kleinen Weg ermittelt wird.

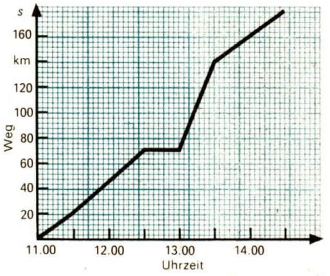


Bild 95/1 Weg-Zeit-Diagramm eines Fahrtenschreibers

40 ▼ Die Augenblicksgeschwindigkeit eines auf der geneigten Ebene rollenden Wagens (Bild 95/2) soll an der Lichtschranke L_2 bestimmt werden. Es wird die Zeit gemessen, in welcher der Wagen den Weg zwischen den Lichtschranken L_1 und L_2 zurücklegt. Dann wird die Lichtschranke L_1 so verschoben, daß der Weg zwischen den Lichtschranken immer kürzer wird, und die Zeit wird jeweils gemessen.

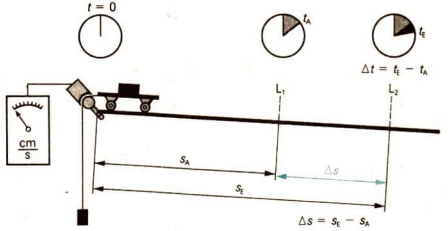


Bild 95/2 Experimentieranordnung

---

① Welche der folgenden sich bewegenden Körper kann man als Massepunkt betrachten? Begründen Sie Ihre Entscheidung!
a) Kugel beim Kugelstoßen,
b) Eiskunstläufer bei Pirouetten,
c) Turner am Reck,
d) Erde beim Umlauf um die Sonne.

② Leiten Sie die Beziehungen $1\ m \cdot s^{-1} = 3{,}6\ km \cdot h^{-1}$ her!

③ Rechnen Sie folgende Geschwindigkeiten um!

$km \cdot h^{-1}$	54	72	83			
$m \cdot s^{-1}$				15	28	35

④ Zwischen zwei Kilometerangaben auf der Autobahn beträgt die Entfernung 500 m. Diese Strecke durchfährt ein Pkw in 20 s. Hat der Kraftfahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Autobahn eingehalten?
In welcher Zeit hätte der Pkw 500,0 m bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 95 $km \cdot h^{-1}$ zurücklegen können?

Δs in cm	Δt in s	$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ in cm · s^{-1}
80	1,265	63
60	0,895	67
40	0,578	69
20	0,284	70

Bei einer Verkleinerung des Weges erkennen wir, daß die berechnete Durchschnittsgeschwindigkeit einem bestimmten Wert zustrebt. Das ist die *Augenblicksgeschwindigkeit* des Körpers an der Lichtschranke L_2.

Definitionsgleichung der Augenblicksgeschwindigkeit: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, wenn Δs und damit Δt hinreichend klein sind. ① ②

Augenblicksgeschwindigkeit als gerichtete Größe. Körper bewegen sich nicht immer auf einer Geraden, sondern auch auf krummlinigen Bahnen. Dabei ändert sich die Bewegungsrichtung des Körpers.

Um mit der physikalischen Größe Augenblicksgeschwindigkeit beschreiben zu können, wie schnell und in welcher Richtung sich ein Körper bewegt, ordnet man der Geschwindigkeit neben dem Betrag die jeweilige Richtung der Bewegung zu (Bild 96/1).

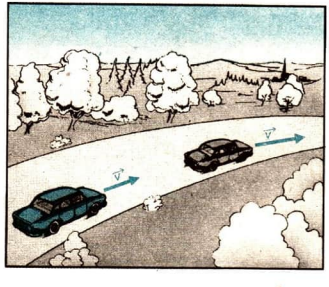


Bild 96/1

▶ **Physikalische Größen, die durch Betrag und Richtung gekennzeichnet sind, bezeichnet man als gerichtete Größen.**

Zur Kennzeichnung gerichteter (vektorieller) Größen setzt man über das Formelzeichen einen Pfeil, im Beispiel $\vec{v}$.
Wird nur der Betrag der gerichteten Größen betrachtet, wird der Pfeil fortgelassen. In Zeichnungen stellt man gerichtete Größen durch Pfeile dar. Die Pfeillänge drückt den Betrag der Größe aus. Die Pfeilrichtung gibt die Richtung der Größe an (Bild 96/2).

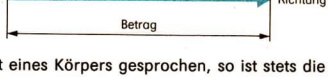


Bild 96/2

Wird im folgenden von der Geschwindigkeit eines Körpers gesprochen, so ist stets die Augenblicksgeschwindigkeit gemeint.
Bewegungen von Körpern werden nach dem Betrag der Geschwindigkeit unterschieden:

– Bewegungen mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit;

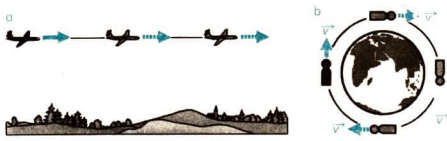


Bild 97/1

– Bewegungen mit veränderlichem Betrag der Geschwindigkeit.

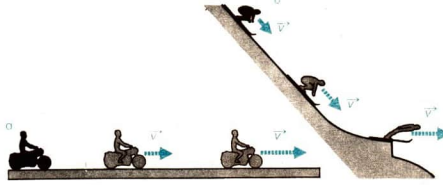


Bild 97/2

Bei dieser Unterscheidung wird nur der Betrag und nicht die Richtung der Geschwindigkeit betrachtet. Die Richtung der Geschwindigkeit ist durch die Bahn festgelegt, auf der sich der Körper bewegt. ③ ④

Zusammenfassung

Die Augenblicksgeschwindigkeit gibt an, wie schnell und in welcher Richtung sich ein Körper zu einem bestimmten Zeitpunkt bewegt.

Formelzeichen: v

Definitionsgleichung für den Betrag der Augenblicksgeschwindigkeit:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$ **, wenn Δs und Δt hinreichend klein sind.**

$\Delta s = s_E - s_A$; $\Delta t = t_E - t_A$

Einheit: ein Meter je Sekunde ($1\ m \cdot s^{-1}$)

Zur Beschreibung der Bewegung von Körpern nutzen wir das Modell Massepunkt.

① Zur Überprüfung des Tachometers durchfährt ein Motorradfahrer bei der Anzeige 50 km · h^{-1} eine 450 m lange Strecke in 35 s. Beurteilen Sie die Genauigkeit der Tachometeranzeige!

② Beschreiben Sie, wie man die Augenblicksgeschwindigkeit eines Fahrzeuges durch Weg- und Zeitmessungen bestimmen kann!

③ Berechnen Sie die Zeit (in Minuten), die ein Pkw auf einer Autobahnstrecke von 235 km einsparen würde, wenn er stets mit einer Geschwindigkeit von 95 km · h^{-1} und nicht mit der in der Tabelle (↗ 4. Umschlagseite) angegebenen Durchschnittsgeschwindigkeit fahren würde!

④ Formulieren Sie drei Aufgaben zur Berechnung von Wegen und Zeiten mit den Angaben über Durchschnittsgeschwindigkeiten (↗ 4. Umschlagseite)!

Die Fahrzeuge bewegen sich im Straßenverkehr auf gerader oder auf gekrümmter Bahn. Zeitweise bewegen sie sich mit konstanter Geschwindigkeit. Die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Größen werden durch Gleichungen und Diagramme erfaßt. Wie spiegeln sich verschieden schnelle Bewegungen in einem gemeinsamen Diagramm wider?

Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung

▶ **Eine gleichförmige Bewegung eines Körpers liegt vor, wenn die Geschwindigkeit einen konstanten Betrag hat (v = konstant).**

■ Gleichförmige Bewegungen können auf gerader und auf gekrümmter Bahn verlaufen. Die Bewegung von Weißkohlköpfen auf einem Bandförderer (Bild 98/1), die Vorschubbewegung von Werkzeugen an Maschinen oder die kreisförmige Bewegung einer Flasche auf einer Abfüllanlage (Bild 98/3) sind Beispiele für annähernd gleichförmige Bewegungen.

Bild 98/2 Bandförderer in der Landwirtschaft

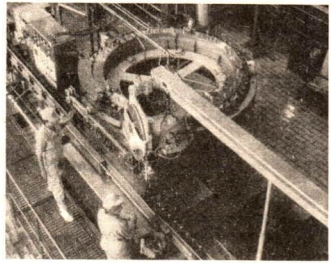


Bild 98/3 Abfüllanlage in einem Getränkekombinat

Bei den in Gleichungen formulierten Zusammenhängen zwischen physikalischen Größen werden wir nur deren Beträge berücksichtigen. Die Gleichungen gelten sowohl für Bewegungen auf gerader als auch für Bewegungen auf gekrümmter Bahn.

Gleichung für das Weg-Zeit-Gesetz. Uns ist bekannt, daß die Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Körpers nach der Gleichung $v = \frac{s}{t}$ berechnet wird, wobei die Messung des Weges zum Zeitpunkt $t_A = 0$ beginnt.
Aus dieser Gleichung und der Bedingung v = konstant erkennen wir:
- Der Weg und die Zeit sind einander proportional, $s \sim t$.
- Es gilt das **Weg-Zeit-Gesetz** $s = v \cdot t$. ① ② ③

Weg-Zeit-Diagramm und Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm. Aus der Gleichung $s = v \cdot t$ folgt: Der Graph im s-t-Diagramm (↗ Bild 99/3) ist eine Gerade durch den Koordinatenursprung. Da die Geschwindigkeit konstant ist, ist der Graph im v-t-Diagramm (↗ Bild 99/2) eine Parallele zur Abszissenachse.
Wie verlaufen die Geraden für verschieden schnelle gleichförmige Bewegungen in einem gemeinsamen Diagramm?

41 Für drei gleichförmige Bewegungen von Körpern (Bild 99/1) werden die Geschwindigkeiten gemessen und die zurückgelegten Wege berechnet. ④

$v_1 = 5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_2 = 12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_3 = 20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

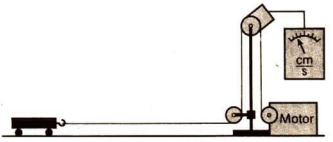


Bild 99/1

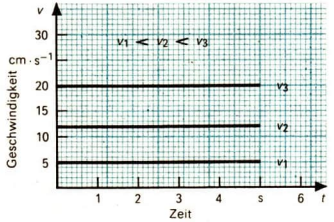


Bild 99/2 v-t-Diagramm

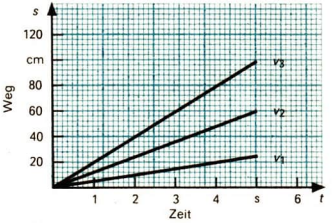


Bild 99/3 s-t-Diagramm

① Erläutern Sie Beispiele für gleichförmige Bewegungen!
② Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Geschwindigkeit und der Zeit sowie zwischen dem Weg und der Zeit bei der gleichförmigen Bewegung?
③ Die Bewegungen folgender Körper werden als gleichförmige Bewegungen betrachtet. Berechnen Sie die fehlenden physikalischen Größen!

Bewegter Körper	Weg	Zeit	Geschwindigkeit
Schüttgut auf Transportband	15 m	12 s	
Trog eines Schiffshebewerkes		4 min	12 cm · s^{-1}
Auto auf der Autobahn	12 km		95 km · h^{-1}

④ Interpretieren Sie das s-t-Diagramm (Bild 99/3) und das v-t-Diagramm (Bild 99/2)!

Je größer der Betrag der Geschwindigkeit ist, um so größer ist im gemeinsamen *v-t*-Diagramm der Abstand der Parallelen von der Abszissenachse. ①

Im gemeinsamen *s-t*-Diagramm hat jede Gerade einen anderen Anstieg.

Je größer der Betrag der Geschwindigkeit ist, um so größer ist der Anstieg der Geraden im *s-t*-Diagramm.

Interpretation von Gleichungen

Außer Diagrammen (↗ S. 76) werden auch Gleichungen interpretiert.

Interpretation der Gleichung $s = v \cdot t$.

1. *Angeben der physikalischen Größen, die in der Gleichung enthalten sind:*
   s: Weg, *v*: Geschwindigkeit, *t*: Zeit
2. *Nennen der Bedingungen, unter denen die Gleichung gilt:*
   - Körper als Massepunkt
   - v = konstant
   - Wegmessung beginnt bei $t_A = 0$
3. *Angeben des zwischen jeweils zwei physikalischen Größen bestehenden Zusammenhangs und der dabei als konstant zu betrachtenden physikalischen Größen:*
   a) $s \sim t$, wenn v = konstant
   b) $s \sim v$, wenn t = konstant
   c) $t \sim \frac{1}{v}$, wenn s = konstant

   Nennen von Beispielen für jeden dieser Zusammenhänge:
   a) Ein Körper bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit. Je größer die Zeit ist, in der er sich bewegt, desto größer ist der zurückgelegte Weg.
   b) Beim Überholen fahren auf der Autobahn zwei Autos eine gleiche Zeit lang mit zwei verschiedenen – jedoch für jedes Auto konstanten – Geschwindigkeiten. Das überholende (schnellere) Auto legt in dieser Zeit den größeren Weg zurück.
   c) Auf der 1500-m-Freistilstrecke versucht jeder Sportler mit möglichst konstanter Geschwindigkeit zu schwimmen. Je größer seine Geschwindigkeit ist, desto kleiner ist die für die Strecke benötigte Zeit. ②

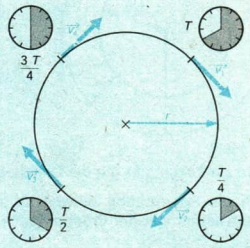
Gleichförmige Kreisbewegung

Haben die Gondeln eines Kettenkarussells einen konstanten Betrag der Geschwindigkeit erreicht, so bewegt sich jede Gondel auf einem Kreis um die Achse des Karussells (Bild 100/1). Es liegt eine spezielle Bewegung auf einer gekrümmten Bahn, eine **gleichförmige Kreisbewegung**, vor. Die Richtung der Geschwindigkeit ändert sich bei dieser Bewegung ständig. Sie stimmt in jedem Punkt des Kreises mit der Richtung der Tangente an den Kreis überein.

Bild 100/1 Kettenkarussell

Gleichung zur Berechnung der Bahngeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des Körpers auf der Kreisbahn bezeichnet man als **Bahngeschwindigkeit**. Deren Betrag ist konstant und kann deshalb mit der Gleichung $v = \frac{s}{t}$ berechnet werden. Die Gondel legt bei einem Umlauf einen Weg zurück, der dem Umfang des Kreises $u = 2\pi \cdot r$ entspricht. Die dafür benötigte Zeit bezeichnet man als die **Umlaufzeit** T.

▶ **Für die gleichförmige Kreisbewegung wird die Bahngeschwindigkeit mit der Gleichung $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ berechnet.**



■ Bei der Bearbeitung eines Werkstücks auf einer Drehmaschine führt jeder Punkt des Werkstücks eine gleichförmige Kreisbewegung aus. Die Bahngeschwindigkeit eines Punktes am Rande des Werkstückes ist größer als die eines inneren Punktes (Bild 101/2). ③ ④

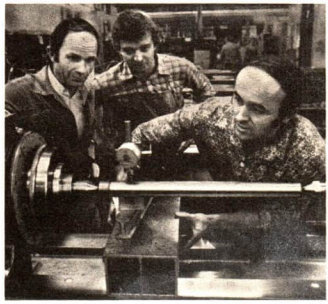


Bild 101/2 Bearbeitung eines Werkstückes auf einer Drehmaschine

---

① Ein Bandförderer befördert Pakete mit einer Geschwindigkeit von 1,3 m · s^{-1}. Zeichnen Sie für die ersten 4 Sekunden das Weg-Zeit- und das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm! Interpretieren Sie diese Diagramme!

② Nennen Sie die für die gleichförmige Bewegung geltenden Abhängigkeiten zwischen den physikalischen Größen a) t und s, b) v und s sowie c) v und t!
GebenSie für jede dieser Abhängigkeiten einen physikalischen Sachverhalt an!

③ Jeder Punkt einer Fahrradspeiche hat die gleiche Umlaufzeit um die Radachse. Begründen Sie mit einer Gleichung, warum nicht alle Punkte der Speiche die gleiche Bahngeschwindigkeit haben!

④ Interpretieren Sie die Gleichung $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$!

■ Vereinfacht nehmen wir an, daß eine Raumstation in einer Entfernung von 310 km über der Erde eine gleichförmige Kreisbewegung ausführt. Die Umlaufzeit beträgt 89 Minuten. Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit (in $km \cdot s^{-1}$)?

Analyse:

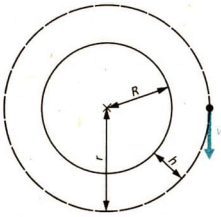


Bild 102/1

Gesucht: v (in $km \cdot s^{-1}$)

Gegeben: $h = 310$ km
$T = 89$ min
$T = 5340$ s
Erdradius $R = 6370$ km

Plan zur Lösung: Es gilt die Gleichung $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$. Für den Radius r des Kreises, auf dem sich die Raumstation bewegt, ist die Summe von Erdradius R und Entfernung h der Raumstation von der Erdoberfläche einzusetzen.

Lösung:

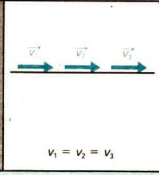
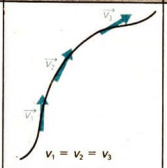
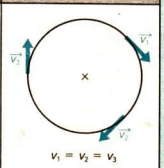
$$v = \frac{2\pi(R + h)}{T}$$

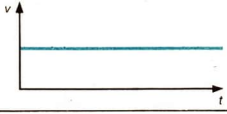
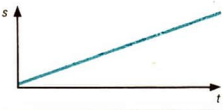
$$v = \frac{2\pi \cdot 6680 \text{ km}}{5340 \text{ s}}$$

$$\underline{\underline{v = 7{,}9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Ergebnis: Die Bahngeschwindigkeit der Raumstation beträgt 7,9 $km \cdot s^{-1}$. ①

Zusammenfassung

	Gleichförmige Bewegung		
	auf einer Geraden	auf einer gekrümmten Bahn beliebig gekrümmt	Kreis
Zeichnerische Darstellung	 $v_1 = v_2 = v_3$	 $v_1 = v_2 = v_3$	 $v_1 = v_2 = v_3$

	Gleichförmige Bewegung		
	auf einer Geraden	auf einer gekrümmten Bahn	
		beliebig gekrümmt	Kreis
Betrag der Geschwindigkeit	v = konstant $v = \frac{s}{t}$		
			$v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$
Richtung der Geschwindigkeit	konstant	ändert sich ständig, stimmt in jedem Punkt mit der Richtung der Tangente an die Bahn überein.	
Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm	Je größer die Geschwindigkeit ist, desto größer ist der Abstand der Parallelen von der Abszissenachse. 		
Weg-Zeit-Diagramm	Je größer die Geschwindigkeit ist, desto größer ist der Anstieg der Geraden im Diagramm. 		
Weg-Zeit-Gesetz Gültigkeitsbedingungen	$s = v \cdot t$ – Körper als Massepunkt, – v = konstant, – Wegmessung beginnt bei $t_A = 0$		

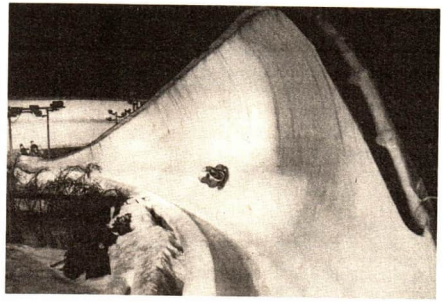
② ③

① Bei einer Uhr ist der große Zeiger 6,5 cm, der kleine Zeiger 5,5 cm lang. Die Zeiger haben eine Breite von 0,5 cm.
Berechnen Sie die Bahngeschwindigkeiten der Zeigerspitzen!

② Nennen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede von gleichförmigen Bewegungen eines Körpers auf einer Geraden und auf einer Kreisbahn!

③ Innerhalb eines Jahres umläuft die Erde die Sonne einmal. Der Abstand der Erde von der Sonne beträgt etwa 150 Millionen km. Berechnen Sie die mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde in $km \cdot s^{-1}$!

Die Geschwindigkeit des Rennschlittens vergrößert sich nach dem Start, der Rennschlitten wird beschleunigt. Die Rennschlittenbahn besteht aus geraden und aus gekrümmten Abschnitten. Welche Gesetze gelten für die Bewegung des Rennschlittens?



Beschleunigung

Fährt ein Mokickfahrer auf gerader Strecke an, so ändert sich der Betrag der Geschwindigkeit, aber die Richtung bleibt erhalten. Durchfährt er eine Kurve, so ändert sich die Richtung der Geschwindigkeit (Bild 104/2).

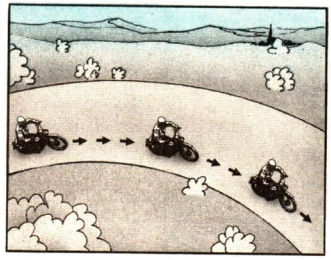


Bild 104/2

▶ **Eine beschleunigte Bewegung von Körpern liegt vor, wenn sich der Betrag oder die Richtung der Geschwindigkeit oder beide gleichzeitig ändern.**

Das Bremsen eines Fahrzeuges ist physikalisch gesehen auch eine beschleunigte Bewegung.
Im folgenden betrachten wir beschleunigte Bewegungen von Körpern auf vorgegebenen Bahnen und untersuchen, wie sich der Betrag der Geschwindigkeit in Richtung der Bahn ändert.

Physikalische Bedeutung der Beschleunigung. Das Anfahren von Fahrzeugen bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit kann in unterschiedlichen Zeiten erfolgen. Je kleiner die Zeit ist, desto größer ist die Beschleunigung.

Die Beschleunigung gibt an, wie schnell sich die Geschwindigkeit eines Körpers ändert.

Ändert sich die Geschwindigkeit in gleichen Zeitintervallen jeweils um den gleichen Betrag, so liegt eine **gleichmäßig beschleunigte Bewegung** vor.

Definitionsgleichung der Beschleunigung. Um Beschleunigungen berechnen zu können, ermittelt man die Geschwindigkeitsänderung je Sekunde. Wir beschränken uns dabei auf gleichmäßig beschleunigte Bewegungen.

Fahrzeug	Anfangsgeschwindigkeit v_A in $km \cdot h^{-1}$	Endgeschwindigkeit v_E in $km \cdot h^{-1}$	Geschwindigkeitsänderung $\Delta v = v_E - v_A$ in $km \cdot h^{-1}$	in $m \cdot s^{-1}$	Zeitintervall Δt in s	Beschleunigung (Geschwindigkeitsänderung je Sekunde) $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ in $\frac{m \cdot s^{-1}}{s}$
Motorrad	20,0	85,0	65,0	18,1	5,6	3,2
Pkw	35,0	75,0	40,0	11,1	5,6	2,0
Lkw	0	40,0	40,0	11,1	7,9	1,4

Die Beschleunigung ist um so größer, je größer die Geschwindigkeitsänderung in einem gleich großen Zeitintervall ist oder je kleiner das Zeitintervall ist, in dem eine gleich große Geschwindigkeitsänderung erfolgt.

Für die Beschleunigung gilt folgende **Definitionsgleichung:**

$$\textbf{Beschleunigung} = \frac{\textbf{Geschwindigkeitsänderung}}{\textbf{Zeitintervall}}$$

Für die Beschleunigung ist das *Formelzeichen a* festgelegt.

Die Definitionsgleichung der Beschleunigung lautet damit $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$.

① **Einheit der Beschleunigung.** Bei Berechnung der Beschleunigung ergibt sich die Einheit **ein Meter je Quadratsekunde**

$$\left(1 \frac{\frac{m}{s}}{s} = 1 \frac{m}{s^2} = 1\ m \cdot s^{-2}\right).$$

Ein Fahrzeug hat die Beschleunigung $1\ m \cdot s^{-2}$, wenn seine Geschwindigkeit im Zeitintervall 1 s um $1\ m \cdot s^{-1}$ geändert wird.

---

① Was wird durch die Beschleunigung eines Fahrzeuges angegeben?

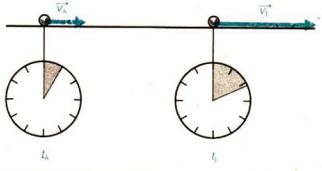
Zusammenfassung

Die Beschleunigung gibt an, wie schnell sich die Geschwindigkeit eines Körpers ändert.

Formelzeichen: a

Definitionsgleichung: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ $\quad \Delta v = v_E - v_A \quad \Delta t = t_E - t_A$

Einheit:
ein Meter je Quadratsekunde
$1\ m \cdot s^{-2}$



① ② ③ ④

Wird die Geschwindigkeit bewegter Körper durch Bremsen kleiner, so ist $v_E < v_A$ und damit $\Delta v < 0$. Die Beschleunigung ist negativ.
Derartige Bewegungen bezeichnet man auch als **verzögerte Bewegungen**.

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Herleitung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes. Für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung eines Körpers aus dem Stillstand gilt: Zur Zeit $t_A = 0$ ist $v_A = 0$ und a = konstant. Damit ist die Geschwindigkeitsänderung $\Delta v = v_E - v_A$ gleich der Endgeschwindigkeit ($v_E = v$) und das Zeitintervall $\Delta t = t_E - t_A$ gleich der Endzeit ($t_E = t$).

Die Definitionsgleichung der Beschleunigung $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ geht dann in die Gleichung $a = \frac{v}{t}$ über.

Aus dieser Gleichung und den Bedingungen **a = konstant und Bewegung aus dem Stillstand** erkennen wir:
- Die Geschwindigkeit und die Zeit sind zueinander proportional, $v \sim t$.
- **Es gilt das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz $v = a \cdot t$.**

Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm und Beschleunigung-Zeit-Diagramm. Aus der Proportionalität von Geschwindigkeit und Zeit für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung folgt, daß der Graph im v-t-Diagramm eine Gerade durch den Koordinatenursprung ist. Es soll der Verlauf der Geraden für unterschiedliche gleichmäßig beschleunigte Bewegungen untersucht werden.

42 ▼ Auf der Luftkissenbahn (Bild 107/1) wird der Schwebekörper nacheinander in drei unterschiedliche gleichmäßig beschleunigte Bewegungen versetzt. Es wird jeweils die Geschwindigkeit nach gleichen Zeiten gemessen. Die Beschleunigungen und der Mittelwert der Beschleunigung werden für jedes Experiment berechnet. ⑤

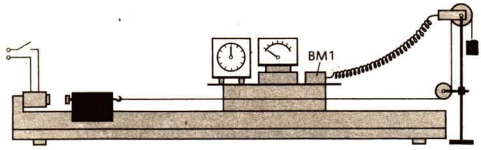


Bild 107/1
Experimentieranordnung

Experiment	t in s	0	1	2	3	4	5
1	v_1 in cm · s^{-1}	0	12	22	30	39	52
2	v_2 in cm · s^{-1}	0	14	29	45	58	73
3	v_3 in cm · s^{-1}	0	17	35	52	70	85

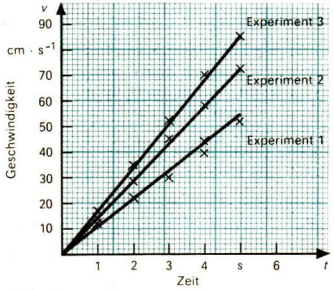


Bild 107/2 v-t-Diagramm

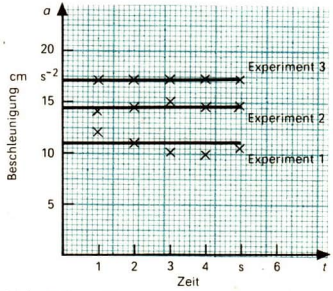


Bild 107/3 a-t-Diagramm

Bei jeder der drei Bewegungen hat der Körper eine andere – aber konstante – Beschleunigung. Im gemeinsamen v-t-Diagramm hat jede Gerade einen anderen Anstieg.

---

① Wie groß ist die Beschleunigung eines Pkw, der mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von 50 km · h^{-1} fährt?

② Zwei Motorräder erreichen beim Anfahren gleiche Geschwindigkeiten. Motorrad 1 benötigt dafür ein kürzeres Zeitintervall als Motorrad 2. Was kann man über die Beschleunigungen beider Motorräder aussagen?

③ Die Beschleunigung eines Zuges beträgt beim Anfahren 0,1 m · s^{-2}.
Was bedeutet diese Angabe? Vervollständigen Sie die Tabelle!

Zeitintervall Δt	1 s		10 s	
Geschwindigkeitsänderung Δv		0,5 m · s^{-1}		2 m · s^{-1}

④ In gleichen Zeitintervallen erreichen zwei Fahrzeuge aus dem Stillstand verschiedene Geschwindigkeiten. Vergleichen Sie die Beschleunigungen!

⑤ Berechnen Sie für das Experiment 42 für jedes Zeitintervall die Beschleunigungen! Bestimmen Sie für jedes Experiment den Mittelwert der Beschleunigung!

Je größer die Beschleunigung ist, desto größer ist der Anstieg der Geraden im *v-t*-Diagramm.
Im *a-t*-Diagramm verlaufen die drei Geraden parallel zueinander.
Je größer die Beschleunigung ist, desto größer ist der Abstand der Geraden von der Abszissenachse. ①

Gleichmäßig verzögerte Bewegung. Soll für eine gleichmäßig verzögerte Bewegung, z. B. für einen Bremsvorgang, die Beschleunigung oder die Zeit (Bremszeit) berechnet werden, so kann auch die Gleichung $v = a \cdot t$ benutzt werden, wenn die Bewegung bis zum Stillstand erfolgt. Dabei muß für v die Geschwindigkeit eingesetzt werden, die zu Beginn der verzögerten Bewegung vorhanden ist (Bild 108/1). ②

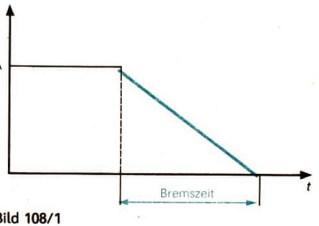


Bild 108/1

Herleitung des Weg-Zeit-Gesetzes. In der Physik wird bei Diagrammen nicht nur der Verlauf der Graphen, sondern mitunter auch die Fläche zwischen dem Graphen und der Abszissenachse betrachtet. Bild 108/2 zeigt das bekannte *v-t*-Diagramm für eine gleichförmige Bewegung. Die blaue Fläche ist ein Rechteck, dessen Seiten durch die Koordinaten von v und t gegeben sind. Der Zahlenwert dieser Fläche ($A = v \cdot t$) entspricht dem Zahlenwert des Weges, den der Körper in der Zeit t zurückgelegt hat.
Durch mathematische Verfahren wurde bewiesen, daß dieses für alle *v-t*-Diagramme gilt. ③

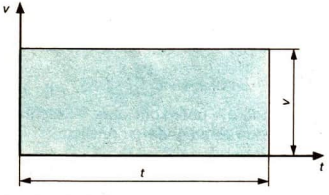


Bild 108/2 *v-t*-Diagramm der gleichförmigen Bewegung

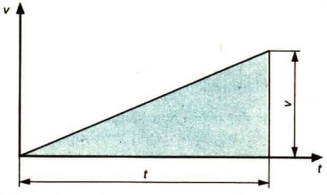


Bild 108/3 *v-t*-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Im Bild 108/3 ist das *v-t*-Diagramm für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus dem Stillstand dargestellt. Die blaue Fläche ist ein rechtwinkliges Dreieck, dessen Katheten durch die Koordinaten von v und t gegeben sind. Der Zahlenwert dieser Fläche $\left(A = \frac{1}{2} v \cdot t\right)$ entspricht dem Zahlenwert des Weges, den der Körper in der Zeit t zurückgelegt hat. Es gilt also: $s = \frac{1}{2} v \cdot t$ und mit dem Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz $v = a \cdot t$ erhält man die Gleichung $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$.

Aus dieser Gleichung und den **Bedingungen a = konstant und Bewegung aus dem Stillstand** erkennen wir:

– Der Weg und das Quadrat der Zeit sind zueinander proportional $s \sim t^2$.

– **Es gilt das Weg-Zeit-Gesetz** $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$.

Weg-Zeit-Diagramm. Aus der Gleichung $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ folgt, daß der Graph im s-t-Diagramm eine Parabel ist. Es soll der Verlauf der Parabel für unterschiedliche gleichmäßig beschleunigte Bewegungen aus dem Stillstand untersucht werden.

43 ▼ Auf der Luftkissenbahn (vgl. Bild 107/1) wird der Schwebekörper in drei unterschiedliche gleichmäßig beschleunigte Bewegungen versetzt. Es wird der Weg jeweils nach gleichen Zeiten gemessen. Da die persönlichen Fehler recht groß sind, berechnen wir für jedes Experiment den Mittelwert der Beschleunigungen. ④

Experiment	t in s	0	1	2	3	4
1	s_1 in cm	0	5	22	44	82
2	s_2 in cm	0	7	29	67	115
3	s_3 in cm	0	8,5	35	75	136

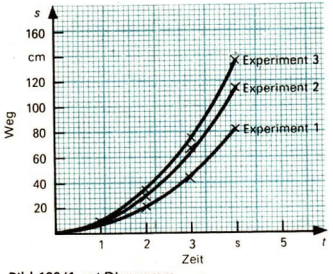


Bild 109/1 s-t-Diagramm

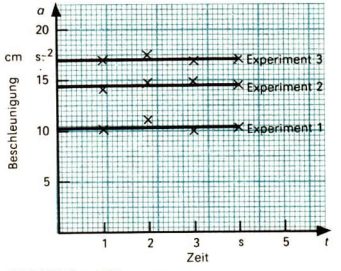


Bild 109/2 s-t-Diagramm

① Zwei Motorradfahrer fahren gleichzeitig an. Der erste Motorradfahrer benötigt zum Erreichen der Geschwindigkeit von 50 km · h^{-1} doppelt soviel Zeit wie der zweite Motorradfahrer. Vergleichen Sie die Beschleunigungen!

② Erläutern Sie, wie man die Beschleunigung eines Pkw beim Anfahren bzw. beim Bremsen bestimmen kann!

③ Ein Körper bewegt sich gleichförmig mit einer Geschwindigkeit von 4 m · s^{-1}. Zeichnen Sie das v-t- und das s-t-Diagramm für acht Sekunden! Berechnen Sie für t = 5 s die Fläche zwischen dem Graphen und der Abszissenachse im v-t-Diagramm, und lesen Sie im s-t-Diagramm den Weg ab! Vergleichen Sie beide Ergebnisse!

④ Berechnen Sie für das Experiment 43 für jedes Zeitintervall die Beschleunigung! Bilden Sie für jedes Experiment den Mittelwert der Beschleunigung! Warum muß man besonders bei der Zeitmessung eine hohe Genauigkeit anstreben?

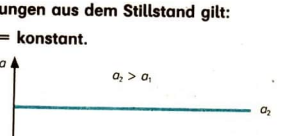
Jede der drei Bewegungen hat eine andere, aber konstante Beschleunigung. Im gemeinsamen s-t-Diagramm hat jede Parabel eine andere Krümmung. **Je größer die Beschleunigung ist, desto stärker ist die Parabel gestreckt.** ① ② ③ ④ ⑤

Gleichmäßig verzögerte Bewegungen. Für einen Bremsvorgang, der bis zum Stillstand erfolgt, kann der Bremsweg auch mit der Gleichung $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ berechnet werden.

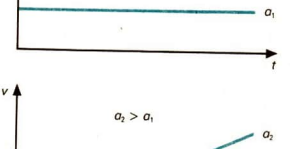
Zusammenfassung

Für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen aus dem Stillstand gilt:

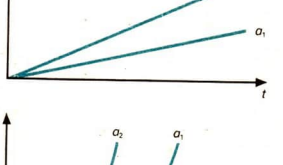
- **Die Beschleunigung ist konstant, a = konstant.**
- **Der Graph im a-t-Diagramm ist eine Parallele zur Zeitachse.**



- **Der Graph im v-t-Diagramm ist eine Gerade durch den Koordinatenursprung. Es gilt $v \sim t$.**
  Je größer die Beschleunigung ist, desto größer ist der Anstieg der Geraden.
- **Das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz lautet: $v = a \cdot t$.**



- **Der Graph im s-t-Diagramm ist eine Parabel. Es gilt $s \sim t^2$.**
  Je größer die Beschleunigung ist, desto stärker ist die Parabel gestreckt.
- **Das Weg-Zeit-Gesetz lautet:**
  $s = \frac{a}{2} t^2$.



Anwendung der Gesetze für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen

Berechnen von Geschwindigkeit und Zeit.

■ Ein Güterzug hat beim Anfahren eine Beschleunigung von 0,080 m · s^{-2}. Welche Geschwindigkeit erreicht er nach 1300 m Anfahrstrecke?
Welche Zeit ist dafür notwendig?

Analyse: Es liegt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung vor.

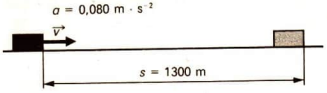


Bild 111/1

Gesucht: v
t

Gegeben: $a = 0{,}080\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$s = 1300\ \text{m}$

Plan zur Lösung:
1. Berechnen der Zeit aus dem Weg-Zeit-Gesetz
2. Berechnen der Geschwindigkeit

Lösung:

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

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

$t = \sqrt{\frac{2600\ \text{m}}{0{,}080\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}}$

$\underline{\underline{t = 180\ \text{s}}}$

zu 2. $v = a \cdot t$

$v = 0{,}080\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 180\ \text{s}$

$v = 14{,}4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\underline{\underline{v = 52\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}}}$

Ergebnis: Der Güterzug erreicht beim Anfahren in 3 Minuten die Geschwindigkeit von $52\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. ⑥

Eine Kugel rollt eine geneigte Ebene gleichmäßig beschleunigt hinab. Eine zweite, gleich große Kugel rollt auf einer gleich langen, aber stärker geneigten Ebene in der halben Zeit hinab. Vergleichen Sie die Beschleunigungen der beiden Kugeln!

② Interpretieren Sie die Gleichungen für das Weg-Zeit-Gesetz und für das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung!

Das v-t-Diagramm einer beim Anfahren gleichmäßig beschleunigten Tatra-Straßenbahn ist gegeben (Bild 111/2). Berechnen Sie die Beschleunigung und den beim Anfahren in den ersten zehn Sekunden zurückgelegten Weg! Zeichnen Sie das a-t- und das s-t-Diagramm!

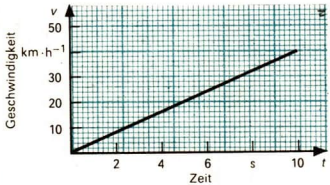


Bild 111/2 v-t-Diagramm

Für das Lösen mancher Aufgaben ist es vorteilhaft, die im Tafelwerk enthaltenen Gleichungen $v = \sqrt{2a \cdot s}$ und $s = \frac{v \cdot t}{2}$ zu verwenden.

a) Leiten Sie diese beiden Gleichungen aus dem Weg-Zeit- und dem Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung her!

b) Interpretieren Sie die Gleichung $s = \frac{v \cdot t}{2}$!

⑤ Beantworten Sie die auf S. 104 gestellte Frage!

Nach wieviel Sekunden erreicht ein Auto aus dem Stand heraus eine Geschwindigkeit von $36\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, wenn die Beschleunigung $2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ beträgt?

Berechnen eines Bremsweges.

■ Für ein Mokick wird auf trockener Straße eine Bremsverzögerung von 6,8 m · s^{-2} angegeben. Wie lang ist der bis zum Stillstand zurückgelegte Weg, wenn die Geschwindigkeit des Mokicks 45 km · h^{-1} beträgt und eine Reaktionszeit von genau einer Sekunde berücksichtigt wird?

Analyse: In der Reaktionszeit wird eine gleichförmige Bewegung ausgeführt. Anschließend liegt eine gleichmäßig verzögerte Bewegung bis zum Stillstand vor.

Bild 112/1

Gesucht: Gesamtweg s
Gegeben: $v = 45$ km · h^{-1}
$v = 12{,}5$ m · s^{-1}
$a = 6{,}8$ m · s^{-2}
$t_1 = 1{,}0$ s

Plan zur Lösung:

1. Berechnen des Weges s_1 in der Reaktionszeit
2. Berechnen des Bremsweges s_2 aus den Gleichungen $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ und $v = a \cdot t$
3. Berechnen des Gesamtweges s

Lösung:

zu 1. $s_1 = v \cdot t_1$

$s_1 = 12{,}5$ m · s^{-1} · 1,0 s

$\underline{\underline{s_1 = 12{,}5 \text{ m}}}$

3. $s = s_1 + s_2$
$s = 12{,}5$ m + 11,5 m
$\underline{\underline{s = 24 \text{ m}}}$

zu 2. $s_2 = \frac{a}{2} \cdot t_2^2$ und $v = a \cdot t_2$

$s_2 = \frac{a}{2} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^2 \qquad t_2 = \frac{v}{a}$

$s_2 = \frac{v^2}{2a}$

$s_2 = \frac{12{,}5^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{2 \cdot 6{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$

$\underline{\underline{s_2 = 11{,}5 \text{ m}}}$

Ergebnis: Das Mokick legt bis zum Stillstand einen Weg von 24 m zurück, wenn es zuvor mit einer Geschwindigkeit von 45 km · h^{-1} gefahren ist. ① ②

Auswerten von Diagrammen.

■ Bei der Untersuchung der Bewegung eines Motorrades auf einer Teststrecke ergab sich das im Bild 112/2 dargestellte v-t-Diagramm.
Berechnen Sie die Beschleunigungen des Motorrades in den drei Bewegungsabschnitten!

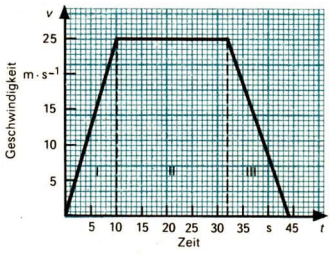


Bild 112/2 v-t-Diagramm

Analyse:

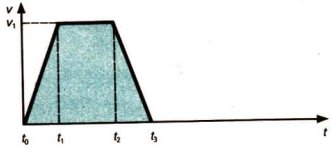


Bild 113/1

Gesucht: a_1, a_2, a_3

Gegeben:

1. Bewegungsabschnitt: gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus dem Stillstand
   $t_1 = 10\ s$
   $v_0 = 0$
   $v_1 = 25\ m \cdot s^{-1}$
2. Bewegungsabschnitt: gleichförmige Bewegung
   $t_2 - t_1 = 22\ s$
   $v_1 = 25\ m \cdot s^{-1}$
   $v_2 = 25\ m \cdot s^{-1}$
3. Bewegungsabschnitt: gleichmäßig verzögerte Bewegung bis zum Stillstand
   $t_3 - t_2 = 12\ s$
   $v_2 = 25\ m \cdot s^{-1}$
   $v_3 = 0$

Lösung:

1. Bewegungsabschnitt:

$$a_1 = \frac{v_1}{t_1}$$

$$a_1 = \frac{25\ m}{10\ s \cdot s}$$

$$\underline{\underline{a_1 = 2{,}5\ m \cdot s^{-2}}}$$

2. Bewegungsabschnitt: Da eine gleichförmige Bewegung vorliegt, ist die Beschleunigung Null.

$$a_2 = 0$$

3. Bewegungsabschnitt:

$$a_3 = \frac{v_2}{t_3 - t_2}$$

$$a_3 = \frac{25\ m}{12\ s \cdot s}$$

$$\underline{\underline{a_3 = 2{,}1\ m \cdot s^{-2}}}$$

Ergebnis: Das Motorrad fährt mit einer Beschleunigung von 2,5 $m \cdot s^{-2}$ an und bremst mit einer Verzögerung von 2,1 $m \cdot s^{-2}$. Während der gleichförmigen Bewegung ist die Beschleunigung Null. ③

---

④ Berechnen Sie die bis zum Stillstand zurückgelegten Wege, wenn das Mokick auf trockener Straße mit Geschwindigkeiten von 25 $km \cdot h^{-1}$, 55 $km \cdot h^{-1}$ und 65 $km \cdot h^{-1}$ gefahren ist und die Bremsverzögerung 7,0 $m \cdot s^{-2}$ beträgt!
Vergleichen Sie die Ergebnisse dieser Aufgabe untereinander und mit dem Ergebnis der Beispielaufgabe S. 112!

⑤ Formulieren Sie nach dem Muster der Aufgabe 1 Aufgaben zum Fahren auf vereister, auf schmieriger und auf nasser Fahrbahn! Entnehmen Sie die Bremsverzögerungen der Tabelle auf der 3. Umschlagseite!

⑥ Im Bild 113/2 ist für die Bewegung eines Körpers das *v-t*-Diagramm dargestellt. Welche Bewegung des Körpers liegt vor? Berechnen Sie die Beschleunigung des Körpers!
Zeichnen Sie das für diese Bewegung zutreffende *s-t*-Diagramm!

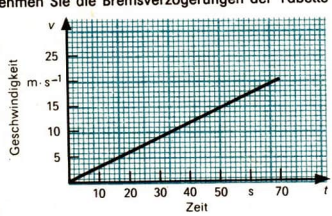
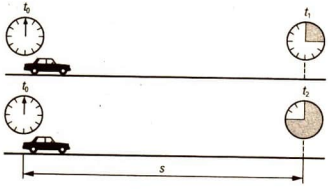


Bild 113/2 *v-t*-Diagramm

Vergleichen von Beschleunigungen.

■ Zwei Pkw fahren aus dem Stand gleichmäßig beschleunigt an. Für einen gleich langen Weg braucht der zweite Pkw die dreifache Zeit. Was können Sie über die Beschleunigung der beiden Pkw aussagen?

Analyse:



$s_1 = s_2 \qquad t_2 = 3 \cdot t_1$

Bild 114/1

Lösung: Es gilt das Weg-Zeit-Gesetz $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$ und damit für die Beschleunigung $a = \frac{2 \cdot s}{t^2}$. Da der Weg konstant bleibt, gilt $a \sim \frac{1}{t^2}$, und bei dreifacher Zeit beträgt die Beschleunigung a_2 nur den neunten Teil von a_1.

Ergebnis: Die Beschleunigung des zweiten Pkw beträgt den neunten Teil der Beschleunigung des ersten Pkw. ① ②

Freier Fall

Ein Stück Eisen fällt schnell, während eine Flaumfeder in der Luft schwebt. Langsam sinkt ein nicht gefaltetes Blatt Papier zu Boden; knüllt man es zusammen, dann ist seine Fallgeschwindigkeit erheblich größer. Von diesen Alltagserfahrungen ausgehend, versuchten Gelehrte bereits im Altertum eine Erklärung der Fallbewegung. Sie waren der Meinung, daß die Masse des fallenden Körpers eine entscheidende Rolle spielt. Diese Auffassung vertrat auch Aristoteles. Sie hat sich fast 2000 Jahre hindurch gehalten, und doch ist sie falsch.

Galileo Galilei. Galilei (Bild 114/2) trat der Meinung von Aristoteles entgegen. Er ging erstmalig davon aus, daß theoretische Überlegungen durch exakte Beobachtungen unterstützt werden müssen. So wies er experimentell nach, daß die Fallgeschwindigkeiten verschiedener Körper gleich sind, wenn der Luftwiderstand vernachlässigt werden kann (Bild 114/3).

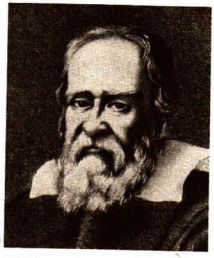


Bild 114/2 Galileo Galilei (1564 bis 1642)

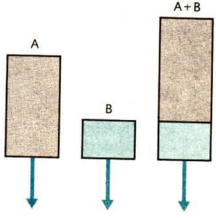


Bild 114/3 Freier Fall unterschiedlicher Körper

Offenbar ergaben praktische Erfahrungen, daß die Geschwindigkeit der Körper beim Fallen zunimmt. Von besonderer Bedeutung für das Erkennen der Fallgesetze war Galileis Annahme, daß Fallgeschwindigkeit und Fallzeit einander proportional sind.
Diese Annahme untersuchte Galilei mit Experimenten an der geneigten Ebene. Dazu war

er gezwungen, da er keine Uhren hatte, um so kleine Zeitintervalle zu messen, wie sie bei frei fallenden Körpern auftreten. Die Bewegung der Körper auf einer geneigten Ebene verläuft wie beim freien Fall der Körper, nur langsamer. Hundertfach wiederholte Galilei die Experimente mit der Fallrinne. Er konnte seine Annahme bestätigen und fand die Naturgesetze, die für alle Fallbewegungen gelten. Galilei gebührt das Verdienst, das Experiment als Forschungsmethode in die Physik eingeführt und damit die Einheit von experimentellem und theoretischem Vorgehen begründet zu haben. Mit Hilfe des Experimentes stellt der Forscher Fragen an die Natur, überprüft Vermutungen und Voraussagen.

Fallgesetze. Galilei hatte erkannt, daß frei fallende Körper eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung ausführen. Wie groß ist die Fallbeschleunigung? ③

44

Für den freien Fall als eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung gilt das Weg-Zeit-Gesetz $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$. Daraus ergibt sich für die Beschleunigung $a = \frac{2 \cdot s}{t^2}$. Die Fallstrecke s und die Fallzeit t müssen gemessen werden (Bild 115/1).

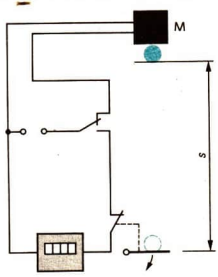


Bild 115/1
Experimentieranordnung

s in m	t in s	a in $\frac{m}{s^2}$
0,05	0,10	10,0
0,10	0,14	10,2
0,15	0,18	9,5
0,20	0,20	10,0
0,25	0,23	9,5
0,30	0,25	9,6
0,40	0,28	10,2
0,50	0,32	9,7

Der Mittelwert der Beschleunigung beträgt 9,8 m · s^{-2}.

Wir erkennen: Unabhängig von der Fallstrecke hat die Fallbeschleunigung jeweils annähernd den gleichen Betrag. Die Abweichungen kommen durch Fehler bei der Längen- und Zeitmessung und auch durch den Luftwiderstand, der die fallende Kugel bremst, zustande.
Führt man Untersuchungen von Fallbewegungen verschiedener Körper im Vakuum durch, so kann man feststellen, daß diese unabhängig von ihrer Masse und ihrer Form alle gleich schnell fallen. Man bezeichnet die Fallbewegung eines Körpers im Vakuum als freien Fall. **Beim freien Fall ist die Fallbeschleunigung für alle Körper gleich** (Bild 115/2).

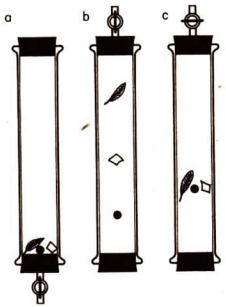


Bild 115/2 Fallröhre a) und b) luftgefüllt, c) luftleer

① Ein Motorrad fährt aus dem Stand gleichmäßig an und erreicht nach fünf Sekunden eine Geschwindigkeit von 40 km · h^{-1}, mit der es auf die Autobahn fährt. Dort erreicht es nach weiteren fünf Sekunden die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km · h^{-1}. Berechnen Sie für beide Beschleunigungsphasen die Beschleunigung!

② Der Kleintransporter B 1000 erreicht beim Anfahren (als gleichmäßig beschleunigte Bewegung zu betrachten) in zwölf Sekunden die Geschwindigkeit von 55 km · h^{-1}. Berechnen Sie die Anfahrbeschleunigung und den beim Anfahren zurückgelegten Weg!

③ Sprechen Sie über das Wirken von Galilei!

Die Fallbeschleunigung wird mit dem Formelzeichen g anstelle von a bezeichnet. Die Fallbeschleunigung ist ortsabhängig. Sie ist am Pol größer als am Äquator (Bild 116/1). Sie nimmt mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel ab. Messungen im Vakuum haben am 45. Breitengrad in Höhe des Meeresspiegels $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$ ergeben.

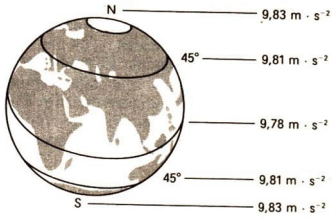


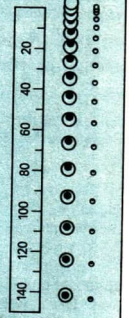
Bild 116/1 Abhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Ort

Die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung lauten damit für den freien Fall:

– Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz $v = g \cdot t$

– Weg-Zeit-Gesetz $s = \frac{g}{2} \cdot t^2$ $\quad g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$

Gültigkeitsbedingungen: Körper als Massepunkt, Bewegungen aus dem Stillstand und im Vakuum.



① ② ③

Überlagerungen von Bewegungen

In Natur und Technik kommt es häufig vor, daß ein Körper eine Bewegung ausführt, bei der sich mehrere Teilbewegungen überlagern.

Resultierende Bewegung. Will man z. B. mit einem Ruderboot einen Fluß überqueren (Bild 116/2), so überlagern sich die durch den Ruderer hervorgerufene und die durch die Strömung des Wassers verursachte Bewegung des Bootes zu einer resultierenden Bewegung des Bootes.

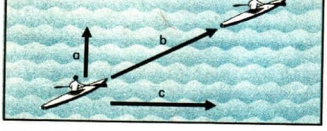


Bild 116/3 Überqueren eines Flusses
a) beabsichtigte Bewegungsrichtung
c) Richtung der Strömung
b) resultierende Bewegung des Bootes

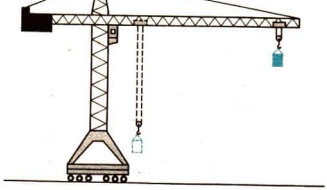


Bild 116/4 Bewegung eines Kranes

Bei einem Kran wird der Körper an der losen Rolle sowohl gehoben als auch mittels der Laufkatze seitlich bewegt (Bild 116/4). Beide Bewegungen können nacheinander erfolgen. Sie können aber auch gleichzeitig erfolgen, dann überlagern sie sich zu einer *resultierenden Bewegung.* ④

Eine Überlagerung von Bewegungen tritt auch auf, wenn Körper geworfen werden.

Waagerechter Wurf. Wird ein Körper mit einer Anfangsgeschwindigkeit geworfen, so beginnt dieser im gleichen Augenblick auch zur Erde zu fallen. Die gleichförmige Bewegung mit konstanter Anfangsgeschwindigkeit wird überlagert von der Fallbewegung. Benutzt man ein Wurfgerät (Bild 117/1), so, daß die Kugel dieses in waagerechter Richtung verläßt, so spricht man von einem *waagerechten Wurf.* Die Kugel bewegt sich auf einer gekrümmten Bahn. Eine mathematische Analyse der Bahn der Kugel ergibt, daß diese eine Parabel ist (Bild 117/2).

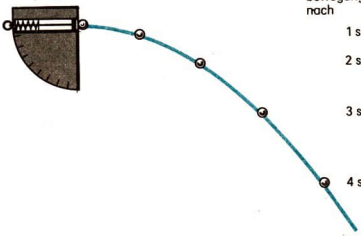


Bild 117/1 Wurfgerät

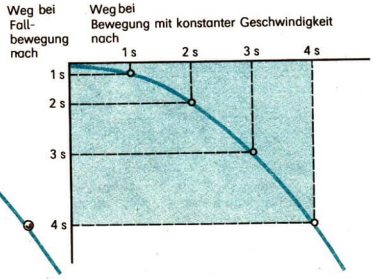


Bild 117/2

Schräger Wurf. Speerwerfen und Kugelstoßen sind Beispiele für den *schrägen Wurf.* Der Winkel zwischen der Anfangsbewegung (gleichförmig) und der Fallbewegung (gleichmäßig beschleunigt) ist beim schrägen Wurf kein rechter Winkel wie beim waagerechten Wurf. Beide Bewegungen überlagern sich zu einer resultierenden Bewegung, die auf einer gekrümmten Bahn, einer Wurfparabel, verläuft. ⑤ ⑥ ⑦

---

① Interpretieren Sie die Gleichungen $v = g \cdot t$ und $s = \frac{g}{2} t^2$!

② Zwei Bälle fallen aus unterschiedlichen Höhen frei auf die Erde. Die Fallzeit des einen Balls ist dreimal so groß wie die des anderen Balls. Was können Sie über die Fallwege und die Endgeschwindigkeiten der Bälle aussagen?

③ In einem Brunnen befindet sich 34 m unter dem Brunnenrand Wasser. Ein Stein wird von der Höhe des Brunnenrandes frei in das Wasser fallen gelassen. Nach welcher Zeit ist der Aufprall des Steines in das Wasser hörbar?
Die Zeit für die Schallausbreitung beträgt etwa 0,1 s und kann vernachlässigt werden. Warum ist das möglich?

④ Beobachten Sie an Maschinen, aus welchen Bewegungen die Bewegungen von Werkzeugen und Werkstücken zusammengesetzt sind! Berichten Sie über Ihre Beobachtungen!

⑤ Aus welchen Bewegungen setzt sich der Sprung eines Weitspringers zusammen?

⑥ Ein Ball wird senkrecht nach oben geworfen. Beschreiben Sie die Bewegung! Welche Bewegungen überlagern sich?

⑦ Eine Forschungsgruppe im Gebirge soll vom Flugzeug aus versorgt werden. Warum muß der Abwurf des Versorgungspakets beim Anflug des Flugzeuges vor dem Standort der Forschungsgruppe erfolgen?

Zum Erreichen einer möglichst großen Wurfweite sind eine hohe Anfangsgeschwindigkeit und ein günstiger Abwurfwinkel (meist 45°) von Bedeutung (Bild 118/1).

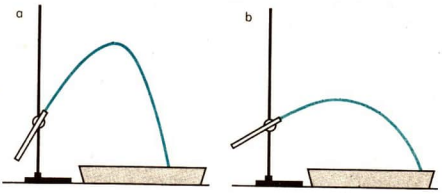


Bild 118/1

Ballistische Bahnen. Beim Schießen weichen durch den Einfluß des Luftwiderstandes die wirklichen Bahnen der Geschosse von der Wurfparabel ab. Die Geschosse bewegen sich auf ballistischen Bahnen (Bild 118/2) (Ballistik – aus dem Griechischen, Lehre von der Bewegung geschossener Körper). Die Berechnung ballistischer Bahnen erfordert erheblichen mathematischen Aufwand.

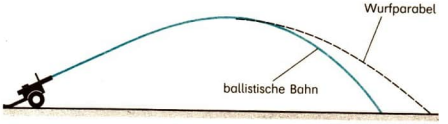


Bild 118/2 Ballistische Bahn

Bei der Konstruktion von Waffen müssen Erkenntnisse der Ballistik angewandt werden, um Bedingungen für eine hohe Treffsicherheit beim Gebrauch der Waffen zu schaffen. Zum Erreichen der Treffsicherheit sind außerdem regelmäßige Zielübungen und Übungsschießen jedes Schützen notwendig.

Zusammenfassung

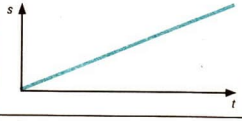
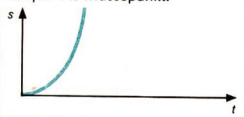
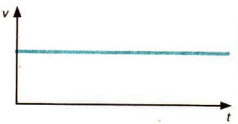
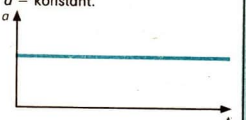
Die Bewegung eines Körpers kann mit folgenden physikalischen Größen beschrieben werden:

Physikalische Größe	Bedeutung	Formelzeichen	Definitionsgleichung	Einheit	Meßgerät
Weg	Der Weg gibt an, wie weit sich ein Körper auf vorgegebener Bahn bewegt.	*s*	–	1 m	Lineal, Meterstab, Bandmaß
Zeit	Die Zeit gibt an, wie lange eine Bewegung dauert.	*t*	–	1 s 1 h	Uhr

Physikalische Größe	Bedeutung	Formelzeichen	Definitionsgleichung	Einheit	Meßgerät
Geschwindigkeit • Durchschnittsgeschwindigkeit • Augenblicksgeschwindigkeit	Die Geschwindigkeit gibt an, wie schnell sich ein Körper bewegt.	v	$\bar{v} = \frac{s}{t}$ $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ wenn Δs und Δt hinreichend klein sind	$1\ m \cdot s^{-1}$ $1\ km \cdot h^{-1}$	Tachometer
Beschleunigung	Die Beschleunigung gibt an, wie schnell sich die Geschwindigkeit eines Körpers ändert.	a	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	$1\ m \cdot s^{-2}$	Beschleunigungsmesser

Systematisierung der Gesetze verschiedener Bewegungen von Körpern

Einteilung der Bewegung nach dem Betrag der Geschwindigkeit	Bewegungen eines Körpers mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit	Bewegungen eines Körpers mit veränderlichem Betrag der Geschwindigkeit, eingeschränkt auf gleichmäßige Geschwindigkeitsänderungen
Kennzeichnung der Bahn der Bewegung	gerade und gekrümmte Bahn	gerade und gekrümmte Bahn
Definition	Eine gleichförmige Bewegung eines Körpers (Massepunkt) liegt vor, wenn sich dieser mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit (in Richtung der Bahn) bewegt: v = konstant.	Eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung eines Körpers (Massepunkt) liegt vor, wenn sich dieser mit konstanter Beschleunigung (in Richtung der Bahn) bewegt: a = konstant.

Einteilung der Bewegung nach dem Betrag der Geschwindigkeit	**Bewegungen eines Körpers mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit**	**Bewegungen eines Körpers mit veränderlichem Betrag der Geschwindigkeit,** eingeschränkt auf gleichmäßige Geschwindigkeitsänderungen
Zusammenhang zwischen Weg und Zeit	In gleichen Zeitintervallen werden gleich lange Wege zurückgelegt: $s \sim t$; $s = v \cdot t$. Gültigkeitsbedingungen: v = konstant Wegmessung beginnt bei $t_A = 0$, Körper als Massepunkt.  	In gleichen Zeitintervallen werden unterschiedlich lange Wege zurückgelegt. Der insgesamt zurückgelegte Weg ist dem Quadrat der benötigten Zeit proportional: $s \sim t^2$; $s = \frac{a}{2} \cdot t^2$. Gültigkeitsbedingungen: a = konstant, Bewegung aus dem Stillstand, Körper als Massepunkt. 
Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Zeit	Der Betrag der Geschwindigkeit ändert sich nicht: v = konstant. Gültigkeitsbedingung: Körper als Massepunkt  	In gleichen Zeitintervallen ändert sich die Geschwindigkeit um den gleichen Betrag: $v \sim t$; $v = a \cdot t$. Gültigkeitsbedingungen: a = konstant, Bewegung aus dem Stillstand, Körper als Massepunkt.
Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Zeit	Es erfolgt keine Beschleunigung in Richtung der Bahn: $a = 0$. 	Die Beschleunigung in Richtung der Bahn ändert sich nicht: a = konstant. 

Mechanische Bewegung

1. Setzen Sie sich mit folgender Aussage auseinander: „Beim Blick aus dem Fenster des Abteils raste die Landschaft an mir vorbei!"
2. Beschreiben Sie die Bewegung des Jungen und des Mädchens bezüglich a) der Rolltreppe und b) des abgebildeten Mannes (Bild 121/1)!

Bild 121/1

3. Erläutern Sie an einer beliebigen Bewegung den Unterschied zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und der Augenblicksgeschwindigkeit eines Körpers!
4. Bei den Olympischen Winterspielen 1984 legte die Siegerin im 20-km-Langlauf die Strecke in 1 h 1 min 45 s zurück. Berechnen Sie die Durchschnittsgeschwindigkeit dieser Langläuferin in $m \cdot s^{-1}$!

Bewegungen mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit

5. Welche Körper bewegen sich annähernd gleichförmig? Begründen Sie Ihre Aussage!
   a) Kunstspringen beim Sprung vom 3-m-Brett,
   b) Kiste auf einem eingeschalteten Förderband,
   c) Drehmeißel bei eingeschaltetem automatischem Vorschub,
   d) Läufer beim 100-m-Lauf,
   e) Betonfertigteile bei der Aufwärtsbewegung am Kran.
6. Ein Fußgänger will mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 $km \cdot h^{-1}$ eine sechs Meter breite Straße überqueren. Ein Kraftfahrzeug nähert sich gleichförmig mit der zulässigen konstanten Höchstgeschwindigkeit von 50 $km \cdot h^{-1}$. Wie weit muß das Fahrzeug entfernt sein, wenn der Fußgänger die Fahrbahn betritt, damit er die andere Straßenseite erreicht, bevor das Fahrzeug herangefahren ist?
7. Interpretieren Sie die Gleichung $s = v \cdot t$!
8. Das Rad eines Fahrrades hat einen Radius von 37 cm. Mit welcher Geschwindigkeit fährt der Radfahrer, wenn das Rad 85 Umdrehungen je Minute macht?
9. Wieviel Umdrehungen in der Minute macht ein Stufenbolzen (Durchmesser 57 mm), der auf einer Drehmaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von 325 m/min bearbeitet wird?
10. Zur Geschwindigkeitsmessung wurde von der Volkspolizei früher folgendes Verfahren angewandt: In einem Abstand von 10,0 m wurden 2 Gummischläuche auf der Straße befestigt. Wenn das Fahrzeug über den ersten Schlauch fuhr, begann eine Stoppuhr zu laufen. Beim Überfahren des zweiten Schlauches wurde die Uhr wieder gestoppt. Welche Zeit durfte bei der Messung nicht unterschritten werden, wenn die zulässige Höchstgeschwindigkeit an der Meßstelle 30,0 $km \cdot h^{-1}$ betrug?
11. Leiten Sie aus dem Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung die Gleichung zur Berechnung der Bahngeschwindigkeit bei der gleichförmigen Kreisbewegung her!

Bewegungen mit veränderlichem Betrag der Geschwindigkeit

12. Nennen Sie Bewegungen, aus der Natur und der Technik, die angenähert als gleichmäßig beschleunigte Bewegungen betrachtet werden können!
13. Die MPi Kalaschnikow hat eine Lauflänge von etwa 40,0 cm. Durch den Druck der Pulvergase wird das Geschoß annähernd gleichmäßig beschleunigt. Es verläßt den Lauf mit einer Geschwindigkeit von $715\ m \cdot s^{-1}$. Berechnen Sie die Beschleunigung!
14. Der Korb eines Aufzuges hebt sich im Verlauf der ersten 3,0 s gleichmäßig beschleunigt und erreicht eine Geschwindigkeit von $3{,}0\ m \cdot s^{-1}$. Mit dieser Geschwindigkeit steigt er sechs Sekunden lang. Die letzten 3,0 s bewegt er sich gleichmäßig verzögert bis zum Stillstand.
    Zeichnen Sie das v-t-Diagramm!
    Ermitteln Sie die Steighöhe des Aufzuges!
15. Ein Körper wird während der Zeit t gleichmäßig beschleunigt und erreicht die Endgeschwindigkeit v. Was kann man über die Änderung der Beschleunigung aussagen,
    a) wenn der Körper die Endgeschwindigkeit bereits in der Hälfte der Zeit erreicht,
    b) wenn der Körper in der gleichen Zeit t eine doppelt so große Endgeschwindigkeit erreicht,
    c) wenn der Körper in einer doppelt so großen Zeit eine doppelt so große Endgeschwindigkeit erreicht?
16. Nach einem Verkehrsunfall ermittelte die Verkehrspolizei, daß der Bremsweg eines Pkw 52 m betrug. Bekannt ist, daß die Bremsbeschleunigung dieses Wagentyps bei Vollbremsung bei vorhandener schmieriger Fahrbahn $4{,}0\ m \cdot s^{-2}$ beträgt. Mit welcher Geschwindigkeit fuhr der Pkw vor dem Bremsen? Betrachten Sie den Bremsvorgang als gleichmäßig beschleunigte Bewegung!
17. Aus welchen Bewegungen setzt sich die Bewegung der Kugel beim Kugelstoßen zusammen?
18. Beim Bobsport wird der Schlitten während des Anfahrens auf dem ersten geradlinigen Stück der Bobbahn gleichmäßig beschleunigt. Bei der Winterolympiade 1984 gelang es einer Mannschaft, die ersten 50,0 m in 6,29 s zurückzulegen. Berechnen Sie die Beschleunigung und die dabei erreichte Geschwindigkeit!
19. Ein Motorradfahrer fährt mit unzulässiger hoher Geschwindigkeit von $v = 75\ km \cdot h^{-1}$ durch eine Ortschaft. Durch ein anderes Fahrzeug wird plötzlich die Straße in 50 m Entfernung blockiert. Kann der Fahrer die Maschine noch zum Stillstand bringen, wenn die Bremsbeschleunigung $6{,}0\ m \cdot s^{-2}$ beträgt und er eine Reaktionszeit von 0,55 s bis zum Bremsen braucht? Zuerst ist die Bremszeit und anschließend der Bremsweg zu berechnen.
20. Ein Kraftfahrzeug bewegt sich mit einer gleichmäßigen Verzögerung von $0{,}5\ m \cdot s^{-2}$. Es bleibt 20 s nach dem Bremsvorgang stehen. Welche Geschwindigkeit hatte das Fahrzeug, als es zu bremsen begann? Wie lang ist der Bremsweg?
21. Beschreiben Sie, wie man experimentell die Fallbeschleunigung bestimmen kann! Gehen Sie dabei auf die Experimentieranordnung, die zu messenden Größen sowie auf die Durchführung und Auswertung des Experimentes ein!
22. Mit welcher Geschwindigkeit trifft ein Tennisball auf die Erde, wenn er aus einer Höhe von 12 m fallen gelassen wird?

Dynamik

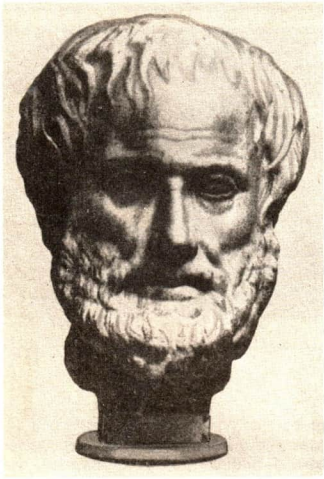


Bild 123/1
Aristoteles (384 bis 322 v. u. Z.)

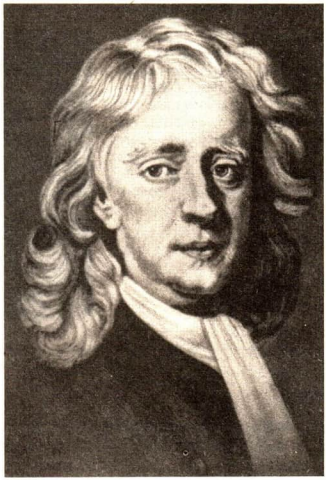


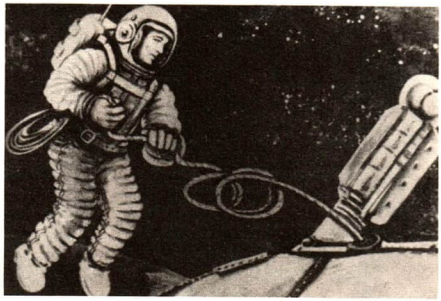
Bild 123/2
Isaac Newton (1643 bis 1727)

In der Dynamik werden die Zusammenhänge zwischen den Kräften und den Bewegungen untersucht. Diese Frage beschäftigte bereits die Gelehrten der Antike, so Aristoteles (Bild 123/1). Ende des 17. Jahrhunderts untersuchte Newton (Bild 123/2) die Zusammenhänge zwischen Kräften und Bewegungen genauer. Es gelang ihm u. a., auf folgende Probleme Antwort zu finden, die für die Bewegungen von Körpern ganz entscheidend sind: Von einem Körper sind Betrag und Richtung seiner Geschwindigkeit und der Ort, an dem er sich befindet, bekannt.

- Bis zu welchem Ort bewegt sich der Körper, wenn eine nach Betrag und Richtung bekannte Kraft eine bestimmte Zeit lang an ihm angreift?
- Wie muß die Kraft beschaffen sein, damit sich der Körper vom Ausgangspunkt zu einem vorgegebenen Endpunkt bewegt?

Um die gestellten Fragen beantworten zu können, müssen physikalische Gesetze angewendet werden, die Newton erkannte. Einige dieser Naturgesetze, die die Zusammenhänge von Kräften und Bewegungen der Körper beschreiben, sind Gegenstand des folgenden Stoffabschnittes.

Der sowjetische Kosmonaut Leonow war der erste, der 1965 aus dem Raumschiff „Woschod 2" in den Weltraum ausstieg. Um zum Raumschiff zurückzukehren, mußte er kleine Raketentriebwerke zünden. Welches Gesetz nutzen Raumfahrer aus, um im Weltraum ihre Bewegung zu ändern?



Kraft

Physikalische Bedeutung der Kraft. Wir wissen bereits: Wirken zwei Körper K_1 und K_2, z. B. elektrisch geladene Metallkugeln, wechselseitig aufeinander ein, so treten zwei Kräfte F_1 und F_2 auf. Die Kraft F_1 greift am Körper K_1 und die Kraft F_2 am Körper K_2 an. Beide Kräfte haben entgegengesetzte Richtungen (Bild 124/2).

Bild 124/2

Durch Kräfte werden Bewegungsänderungen oder Formänderungen der Körper oder beides zugleich erreicht.
Da oft nur die Bewegungs- oder Formänderung des einen der beteiligten Körper praktisch bedeutsam ist, wird dann auch nur die Kraft auf diesen einen Körper betrachtet.

▶ **Die Kraft gibt an, wie stark ein Körper auf einen anderen Körper einwirkt.**

Kraft als gerichtete Größe. Die Kraft wird durch ihren Betrag und ihre Richtung angegeben. Kräfte werden mit Pfeilen grafisch dargestellt. Der Betrag der Kraft wird durch die Länge des Pfeiles, ihre Richtung durch die Pfeilrichtung angegeben. Dazu muß ein geeigneter Maßstab festgelegt werden.

Da die Kraft ebenso wie die Geschwindigkeit eine gerichtete Größe (vektorielle Größe) ist, wird sie mit $\vec{F}$ gekennzeichnet (Bild 124/3). ①

Bild 124/3 Maßstab 1 cm ≙ 10 N; F = 51 N

Zusammensetzen von Kräften

Resultierende Kraft. Im Bild 125/1 ist dargestellt, wie ein Schiff von zwei Schleppern gezogen wird. Der Schlepper 1 zieht mit der Kraft $\vec{F}_1$, der Schlepper 2 mit der Kraft $\vec{F}_2$. Beide Kräfte haben unterschiedliche Richtungen und wirken gleichzeitig. Beide Kräfte können durch eine resultierende Kraft $\vec{F}_R$ ersetzt werden, die die gleiche Wirkung hervorruft wie die Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ zusammen.

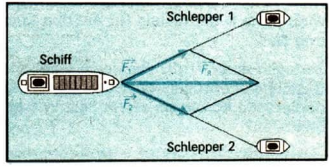


Bild 125/1 Schiff wird von zwei Schleppern gezogen

Kräfteparallelogramm. Den Betrag der resultierenden Kraft erhält man nicht durch Addition der Beträge der beiden Kräfte, wenn beide Kräfte unterschiedliche Richtungen haben. Aus vielen Beispielen wurde erkannt, daß es möglich ist, die resultierende Kraft geometrisch zu bestimmen. Es wird ein Parallelogramm konstruiert, dessen Seiten durch die Pfeile für die Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ bestimmt sind. Die Diagonale, die vom gemeinsamen Angriffspunkt ausgeht, gibt den Betrag und auch die Richtung der resultierenden Kraft an (Bild 125/1). Werden die Beträge der Zugkräfte bei unveränderter Richtung erhöht, so wird die resultierende Kraft größer.

Änderung des Winkels zwischen den Kräften. Ändert man den Winkel zwischen zwei Kräften mit den konstanten Beträgen F_1 und F_2, so ändert sich ebenfalls die resultierende Kraft (Bild 125/2).

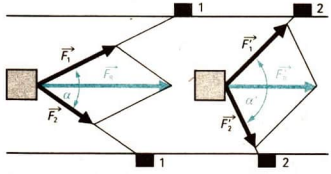


Bild 125/2 $F_1 = F_1'$ $F_2 = F_2'$ $\alpha < \alpha'$ $F_R > F_R'$

Ändert man den Winkel zwischen den zwei Kräften so, daß beide Kräfte gleichgerichtet (Winkel beträgt 0°) oder entgegengesetzt gerichtet (Winkel beträgt 180°) sind, dann liegen die aus der Erfahrung bereits bekannten Fälle vor, bei denen der Betrag der resultierenden Kraft durch Addition bzw. Subtraktion der Beträge der Einzelkräfte gewonnen wird.

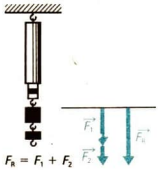


Bild 125/3 $F_R = F_1 + F_2$

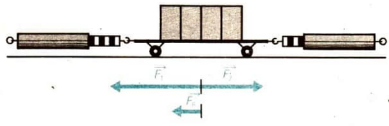


Bild 125/4 $F_R = F_1 - F_2$

① An einer Feder greift eine Kraft von a) 15 N, b) 23 N, c) 540 N an. Stellen Sie dieses zeichnerisch dar!
Wählen Sie einen geeigneten Maßstab für die jeweilige Kraft!

Sind die entgegengesetzt gerichteten Kräfte gleich groß, dann ist die resultierende Kraft Null. Vereinfachend, wenn auch nicht exakt, sagt man in diesem Falle: Auf den Körper wirkt keine Kraft. Richtig ist: Auf den Körper wirkt eine resultierende Kraft mit dem Betrag Null.

Zerlegen einer Kraft. Bei vielen technischen Anlagen werden Kräfte durch Seile oder Gestänge übertragen. Bei einer Krananlage (Bilder 126/1 und 126/2) hängt der zu transportierende Körper an einem Seil. Wie groß sind die Teilkräfte, die an den Seilstücken angreifen?

Bild 126/1 Kabelkrananlage der Warnowwerft

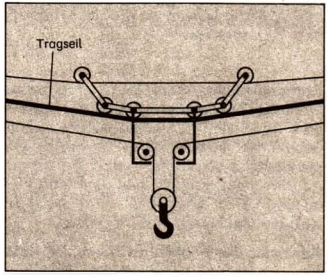


Bild 126/2 Ausschnitt aus der Kabelkrananlage

45

Die Gewichtskraft des zu transportierenden Körpers wird in zwei Teilkräfte, die an den Federkraftmessern ablesbar sind, zerlegt (Bild 126/3).

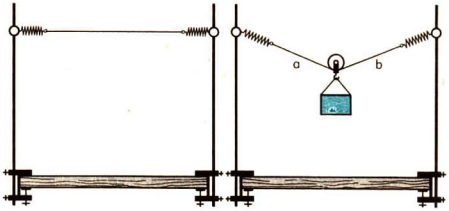


Bild 126/3 Modell der Kabelkrananlage

Geometrisch werden die beiden Teilkräfte mit einem Parallelogramm bestimmt, in dem der Pfeil für die Gewichtskraft die Diagonale darstellt und der Verlauf der Seiten durch die Richtungen der Seilstücke gegeben ist (Bild 126/4). Die Längen der Seiten des Parallelogramms entsprechen den Beträgen der Teilkräfte.

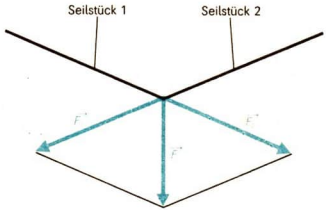


Bild 126/4

Zusammenfassung

Greifen an einem Körper am gleichen Punkt zwei Kräfte an, so können diese zu einer resultierenden Kraft zusammengefaßt werden. Ist nur eine Kraft vorgegeben, so kann diese als Resultierende zweier Teilkräfte aufgefaßt werden.

①

Wechselwirkungsgesetz

Um die zum Bild 124/1 gestellte Frage beantworten zu können, führen wir folgende Experimente durch.

46 ▼ Auf der Luftkissenbahn liegen auf zwei gleichen Schwebekörpern jeweils gleiche Stabmagnete (Bild 127/1). Gleiche Pole der Magnete stehen einander gegenüber. Der Luftstrom wird eingeschaltet, der Faden zwischen den Schwebekörpern wird durchgebrannt. Nach drei Sekunden wird der Luftstrom abgeschaltet. Wir stellen fest: Beide Schwebekörper haben sich um die gleiche Wegstrecke in entgegengesetzten Richtungen bewegt.

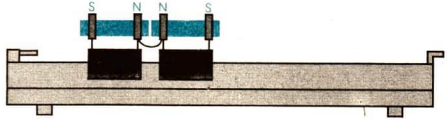


Bild 127/1
Experimentieranordnung

Zwischen beiden Stabmagneten wirken zwei Kräfte entgegengesetzter Richtung. Diese haben an den gleichen Schwebekörpern gleiche Bewegungsänderungen hervorgerufen. Das ist nur möglich, wenn beide Kräfte gleiche Beträge haben.

47 ▼ Einer der beiden Schwebekörper wird festgeklemmt. Jetzt bewegt sich nur der andere Schwebekörper. Wirkt jetzt nur eine Kraft?

Wir erinnern uns: Kräfte werden nicht nur dadurch erkannt, daß sie die Bewegung von Körpern ändern, sondern auch Körper verformen. Eine genaue Betrachtung des Experiments läßt diese Verformung an der Klemmvorrichtung erkennen.

Ein anderes Beispiel: Ein Junge springt über einen Graben. Eine Bewegung des Grabenrandes kann er nicht feststellen. Er erkennt aber seinen Fußabdruck am Grabenrand. Die eine Kraft ruft eine Bewegungsänderung des Jungen, die andere Kraft eine Verformung des Bodens hervor. ② ③ ④

---

① Auf ein Boot, das mit einem Seil am Ufer befestigt ist, wirkt die Strömung mit einer Kraft von 400 N und der Wind, der quer zur Strömung weht, mit einer Kraft von 300 N (Bild 127/2). Bestimmen Sie zeichnerisch die am Seil angreifende Kraft!

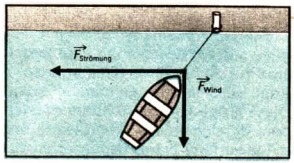


Bild 127/2

② Wie bewegt sich ein aufgeblasener Luftballon, wenn er geöffnet und losgelassen wird? Begründen Sie Ihre Aussage!

③ Warum müssen die Startblöcke beim Kurzstreckenlauf auf der Aschenbahn starr befestigt werden?

④ Warum konnte auch Münchhausen sich nicht selbst an den Haaren aus dem Sumpf ziehen?

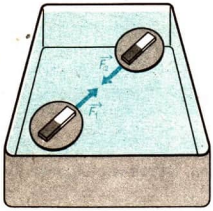


Bild 128/1 Das Wechselwirkungsgesetz gilt auch, wenn sich die Körper nicht berühren, wenn magnetische Kräfte wirken.

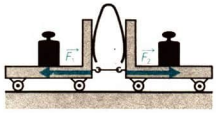
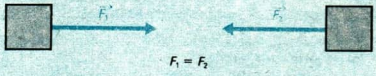


Bild 128/2 Wechselwirkungsgesetz für Federkräfte

Bild 128/3 Fortbewegung durch Rückstoßkräfte

Diese und viele weitere Beispiele (Bilder 128/1, 128/2, 128/3) bestätigen immer wieder das bereits von Newton erkannte

▶ **Wechselwirkungsgesetz:**
Wirken zwei Körper wechselseitig aufeinander ein, so greift stets an jedem der Körper eine Kraft an. Die beiden Kräfte haben gleiche Beträge und entgegengesetzte Richtungen.



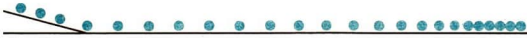
①

Trägheitsgesetz

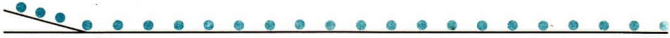
Bereits der griechische Gelehrte Aristoteles stellte Beobachtungen und Überlegungen darüber an, wie Körper in Bewegung geraten, in Bewegung bleiben und wieder zur Ruhe kommen. Er vertrat die Meinung: „Ein in Bewegung befindlicher Körper kommt zur Ruhe, wenn die Kraft, die ihn voranstößt, ihre Wirkung beendet." Rund 2000 Jahre lang wurde diese Auffassung für richtig gehalten. Der italienische Gelehrte Galilei wies als erster nach, daß sie fehlerhaft war.
Wie liegen diese Dinge wirklich?
Durch Experimente ist zu zeigen: Ein ruhender Körper läßt sich nur dadurch in Bewegung setzen, daß auf ihn eine (beschleunigende) Kraft wirkt. Ein bewegter Körper läßt sich nur dadurch zur Ruhe bringen, daß auf ihn eine (bremsende) Kraft wirkt.
Kann sich ein Körper ohne ständigen Antrieb beliebig lange gleichförmig bewegen? Diese Frage konnte im Altertum noch nicht mit Hilfe von Experimenten untersucht werden, da eine solche Arbeitsweise unbekannt war. Um unter heutigen Bedingungen die aufgeworfene Frage beantworten zu können, müssen in Experimenten alle Kräfte, die auf einen bewegten Körper wirken, systematisch verkleinert und die Auswirkung auf den Bewegungsablauf beobachtet werden. Hauptsächlich geht es dabei um die Verringerung der Reibungskraft.

48
▼ Eine Kugel wird auf verschiedenen Unterlagen in Bewegung versetzt. Der Bewegungsablauf wird beobachtet (Bild 129/1):

a) Die Unterlage ist aus rauhem Material.



b) Die Unterlage ist aus Papier.



c) Die Unterlage ist aus Glas.

Bild 129/1

Wir erkennen:

a) Die Kugel kommt rasch zum Stillstand. Die Reibungskraft zwischen Kugel und Unterlage ist recht groß.

b) Die Kugel kommt erst am Ende der Unterlage zum Stillstand. Die Reibungskraft ist kleiner, aber noch merklich vorhanden.

c) Eine Veränderung der Geschwindigkeit der Kugel ist kaum erkennbar. Die Reibungskraft ist fast Null.

Auch durch Experimente an der Luftkissenbahn wird die Erfahrung bestätigt:
Ein bewegter Körper **bleibt** in gleichförmiger geradliniger Bewegung, so lange **keine** Kraft auf ihn wirkt.
Man kann das **Trägheitsgesetz** wie folgt formulieren:

▶ **Ein ruhender oder bewegter Körper ändert seine Bewegung nur dann, wenn eine Kraft auf ihn wirkt.**

Im folgenden Experiment werden Erscheinungen beobachtet, die auf das Trägheitsgesetz zurückzuführen sind.

49 ▼ Quader und Walze befinden sich auf dem Brett in Ruhe.

Das Brett wird schnell gezogen. Der Quader bewegt sich zusammen mit dem Brett. Die Walze bleibt gegenüber dem Tisch an gleicher Stelle, gegenüber dem Brett bewegt sie sich zum Quader.

Das Brett wird plötzlich gebremst. Der Quader bleibt zusammen mit dem Brett stehen. Die Walze bewegt sich gleichförmig weiter.

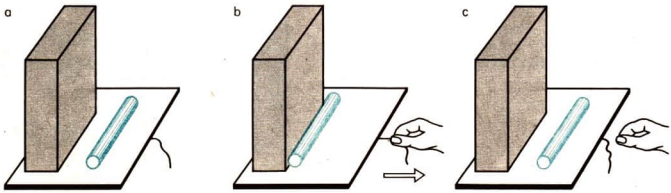


Bild 129/2

① Erläutern Sie die Bilder 128/1, 128/2 und 128/3!

Zwischen Walze und Brett ist die Reibungskraft gering. Die nur kurze Zeit wirkende beschleunigende bzw. bremsende Kraft wird kaum auf die Walze übertragen. Die Walze behält die jeweilige Bewegung bei, sie bleibt im Fall b) in Ruhe und bewegt sich im Fall c) gleichförmig weiter.
Im Autobus machen stehende Fahrgäste ähnliche Erfahrungen. Auch im Bild 130/1 sind Anwendungen zum Trägheitsgesetz dargestellt.

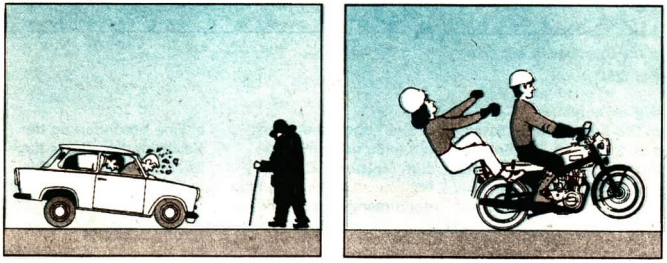


Bild 130/1

① ② ③ ④

Zusammenfassung

Wechselwirkungsgesetz
Wirken zwei Körper wechselseitig aufeinander ein, so greift stets an jedem der Körper eine Kraft an. Die beiden Kräfte haben gleiche Beträge und entgegengesetzte Richtungen.
Trägheitsgesetz
Ein ruhender oder bewegter Körper ändert seine Bewegung nur dann, wenn eine Kraft auf ihn wirkt.

---

① Entwickeln Sie eine Experimentieranordnung, mit der man das Trägheitsgesetz demonstrieren kann!

② Warum ist es verboten, Fahrzeuge mit defekter Bremsanlage mit Seilen abzuschleppen?

③ Erklären Sie, warum sich das Hobeleisen lockert, wenn man mit einem Hammer auf den Hobel schlägt (Bild 130/2)?

Bild 130/2

④ Erklären Sie, warum die Ladung auf dem Dachgepäckträger eines Pkw gut befestigt sein muß!

Klaus erreicht mit Petras Mokick in kürzerer Zeit als mit seinem eigenen Mokick eine Geschwindigkeit von 30 km · h^{-1}. Fährt er mit Petra zusammen auf seinem Mokick, brauchen sie beide eine längere Zeit als allein.
Wie sind diese unterschiedlichen Beschleunigungen zu erklären?

Wirkung einer konstanten Kraft

An einem bewegbaren Körper greift eine konstante Kraft an. Bewegt sich der Körper gleichförmig, gleichmäßig beschleunigt oder ungleichmäßig beschleunigt? Die Reibung soll vernachlässigbar klein sein.

50 ▼ An einem Schwebekörper auf der Luftkissenbahn greift eine konstante Kraft an (Bild 131/2). Die Beschleunigung wird direkt gemessen.

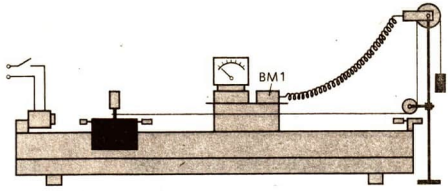


Bild 131/2
Experimentieranordnung

Das Experiment ergibt: Die Beschleunigung ist konstant, es liegt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in Richtung der Kraft vor.
Dieses Beispiel und weitere zeigen:

▶ **Greift an einem bewegbaren Körper eine konstante Kraft an, so wird dieser in Richtung der Kraft gleichmäßig beschleunigt.**

① ②

① Was können Sie über Betrag und Richtung der Kraft aussagen, die an einem sich bewegenden Körper angreift und diesen gleichmäßig bremst?
② Entwickeln Sie eine Experimentieranordnung, mit der Sie das Anfahren und das Bremsen eines Wagens demonstrieren können!

Zusammenhang zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung

Am Beispiel der Erarbeitung dieses Zusammenhanges soll gezeigt werden, wie in der Physik häufig vorgegangen wird, um physikalische Gesetze zu erkennen.

Aufstellen einer Vermutung. Wir betrachten das in Bild 131/1 dargestellte Beispiel. Mit Petras Mokick erreicht Klaus eine größere Beschleunigung als mit seinem Mokick. Wenn er mit Petra zusammen auf seinem Mokick fährt, ist die Beschleunigung geringer, als wenn er allein fährt. Wir vermuten: Die Beschleunigung ist um so größer, je größer die wirkende Kraft und je kleiner die sich bewegende Masse ist.

Experimentelles Prüfen der Vermutung. Da der Zusammenhang zwischen drei physikalischen Größen untersucht werden muß, sind zwei Teilexperimente erforderlich, in denen jeweils der Zusammenhang von zwei Größen zu untersuchen ist, während die dritte Größe konstant gehalten wird.

51 ▼ Auf der Luftkissenbahn (↗ Bild 131/2) wird der Schwebekörper durch die Gewichtskraft verschiedener Hakenkörper in eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung versetzt. Es bewegen sich also der Schwebekörper und die Hakenkörper. Im Experiment ist die Masse der Hakenkörper klein gegenüber der Masse des Schwebekörpers. Deshalb können wir vereinfachend nur die Masse des Schwebekörpers als die sich bewegende Masse betrachten. Der Betrag der Masse wird dadurch geändert, daß verschiedene Körper benutzt werden.

1. Teilexperiment
Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kraft bei konstanter Masse
$m = 0{,}2$ kg

F in N	a in m · s^{-2}
0,02	0,10
0,04	0,22
0,06	0,30
0,08	0,38

2. Teilexperiment
Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Masse bei konstanter Kraft
$F = 0{,}08$ N

m in kg	a in m · s^{-2}
0,093	0,76
0,186	0,38
0,279	0,26
0,372	0,19

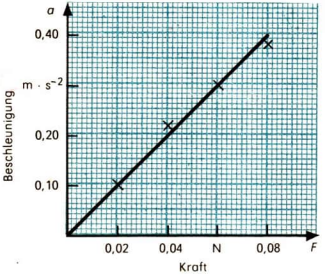


Bild 132/1 a-F-Diagramm

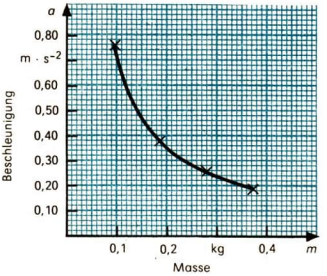


Bild 132/2 a-m-Diagramm

Die beiden Teilexperimente sind für andere konstante Massen und andere konstante Kräfte zu wiederholen.
Aus allen Meßwerten und deren Darstellung in Diagrammen ist unter Berücksichtigung der durch die Experimentieranordnung vorhandenen Fehler zu erkennen:

- Bei konstanter Masse des Körpers ist die auftretende Beschleunigung proportional zur am Körper angreifenden Kraft; $a \sim F$ bei m = konstant.
- Bei konstanter Kraft am Körper ist die hervorgerufene Beschleunigung umgekehrt proportional zur Masse des Körpers; $a \sim \frac{1}{m}$ bei F = konstant.

Die Vermutung wird also bestätigt und ein Gesetz erkannt. ①

Formulieren des Gesetzes. Isaac Newton erkannte diesen Zusammenhang zwischen den drei physikalischen Größen Beschleunigung, Kraft und Masse. Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der Gleichung $a = \frac{F}{m}$ ausgedrückt werden. Isaac Newton zu Ehren wird dieser Zusammenhang *Newtonsches Grundgesetz der Dynamik* genannt. Durch Umformung dieser Gleichung erhält man

- für die auf den Körper wirkende Kraft $F = m \cdot a$ und
- für die Masse des Körpers $m = \frac{F}{a}$.

Diese drei Formen der Gleichung gelten, wenn der Körper als Massepunkt betrachtet werden kann.

Newtonsches Grundgesetz der Dynamik
Greift an einem bewegbaren Körper eine konstante Kraft an, dann bewegt sich der Körper gleichmäßig beschleunigt.
Die Beschleunigung des Körpers ist proportional zur angreifenden Kraft und umgekehrt proportional zu seiner Masse:

$$a = \frac{F}{m} \text{ oder } F = m \cdot a \text{ oder } m = \frac{F}{a}.$$

Gültigkeitsbedingung: Körper als Massepunkt

② ③ ④ ⑤ ⑥

---

① Prüfen Sie rechnerisch für die Meßwerte aus Experiment 51 nach, ob die angegebenen Proportionalitäten vorliegen!

② Von einem Güterbahnhof fahren zwei Züge ab. Die Lokomotiven (gleiche Massen) beider Züge ziehen mit gleicher Zugkraft eine unterschiedliche Anzahl von Waggons. Der eine Zug hat 22 Waggons, der andere 13. Alle Waggons haben die gleiche Masse. Bei welchem Zug ist die Beschleunigung größer? Begründen Sie Ihre Aussage!

③ Wie ändert sich die Beschleunigung eines Körpers, wenn die beschleunigende Kraft verdreifacht wird?

④ Interpretieren Sie die Gleichung $a = \frac{F}{m}$!

⑤ Interpretieren Sie das a-F-Diagramm und das a-m-Diagramm!

⑥ An zwei Körpern, deren Massen sich wie 1 zu 2 verhalten, greifen Kräfte von 1 N, 2 N, 3 N, ... 10 N an. Skizzieren Sie den Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kraft für beide Körper in einem a-F-Diagramm!

Einheit der Kraft. Die Einheit wird mit Hilfe des Newtonschen Grundgesetzes aus den Einheiten für die Masse und die Beschleunigung abgeleitet.
Aus $F = m \cdot a$ folgt $1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot 1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.
Ein Newton ist die Kraft, durch die einem Körper mit der Masse 1 kg eine Beschleunigung von 1 m · s^{-2} erteilt wird.
$1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Zusammenhang zwischen dem Newtonschen Grundgesetz und dem Trägheitsgesetz. Beide Gesetze sind grundlegende Gesetze der Mechanik. Das Trägheitsgesetz ist als Sonderfall im Newtonschen Grundgesetz enthalten. Setzen wir im Newtonschen Grundgesetz $F = 0$, so erhalten wir, da stets $m \neq 0$ gilt, $a = 0$. Das bedeutet, der Betrag der Geschwindigkeit des Körpers ist konstant, er kann Null oder größer als Null sein. Da auf den Körper keine Kraft wirkt, kann auch keine Änderung der Richtung der Geschwindigkeit erfolgen. Der Körper bewegt sich also geradlinig gleichförmig oder ist in Ruhe. Das ist aber die Aussage des Trägheitsgesetzes.

Anwendungen zum Newtonschen Grundgesetz

Berechnen einer Beschleunigung.

■ Die schnellste bei der Deutschen Reichsbahn eingesetzte Dampflokomotive (Baureihe 01) hatte eine Masse von 180 t und eine Zugkraft von 167 kN. Mit welcher Beschleunigung konnte die Lokomotive anfahren, wenn sie einen Zug von 10 Wagen ziehen mußte? Jeder Wagen hatte eine Masse von 40 t.

Analyse

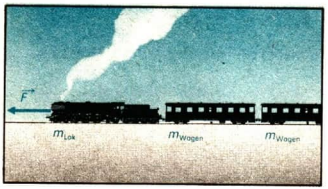


Bild 134/1

Gesucht: a_{Zug}

Gegeben:

m_{Lok}	= 180 t	m_{Lok}	= 180000 kg
m_{Wagen}	= 40 t	m_{Wagen}	= 40000 kg
F	= 167 kN	F	= 167000 N

Plan zur Lösung:
Die Beschleunigung wird aus der Gleichung $a = \frac{F}{m}$ berechnet. Für m muß die Masse des Zuges eingesetzt werden. Diese setzt sich aus der Masse der Lokomotive und der Masse der zehn Wagen zusammen.

Lösung:

$$a_{Zug} = \frac{F}{m_{Zug}} \qquad m_{Zug} = m_{Lok} + 10 \cdot m_{Wagen}$$

$$a_{Zug} = \frac{167000\ \text{N}}{580000\ \text{kg}} \qquad m_{Zug} = 180000\ \text{kg} + 10 \cdot 40000\ \text{kg}$$

$$a_{Zug} = \frac{167000\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{580000\ \text{kg}} \qquad m_{Zug} = 580000\ \text{kg}$$

$$a_{Zug} = 0{,}29\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Ergebnis: Die Lokomotive konnte mit 10 Wagen mit einer Beschleunigung von 0,29 m · s^{-2} anfahren.

Ein Vergleich dieser Beschleunigung mit den Beschleunigungen einiger anderer Lokomotiven beim Anfahren mit 10 Wagen macht deutlich, welche Entwicklung bei den Lokomotiven in den letzten Jahrzehnten erreicht wurde.

Diesellok (Baureihe 132) $a = 0{,}70\,\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Elektrolok (Baureihe 250) $a = 0{,}73\,\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Berechnen einer Kraft.

■ Ein mit vier Personen besetzter und mit Gepäck beladener Pkw Trabant (Gesamtmasse 920 kg) wird aus dem Stand annähernd gleichmäßig beschleunigt. Er erreicht nach 5,8 Sekunden eine Geschwindigkeit von 18 km · h^{-1}.
Berechnen Sie die Antriebskraft!

Analyse:

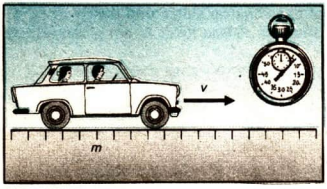


Bild 135/1

Gesucht: F

Gegeben:
$m = 920\,\text{kg}$
$v = 18\,\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
$v = 5{,}0\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$t = 5{,}8\,\text{s}$

Plan zur Lösung: Die Antriebskraft wird nach der Gleichung $F = m \cdot a$ berechnet. Die Beschleunigung kann, da eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung vorliegt, aus der Gleichung $v = a \cdot t$ bestimmt werden.

Lösung:

$F = m \cdot a$ $\qquad$ $v = a \cdot t$

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

$F = 920\,\text{kg} \cdot \frac{5{,}0\,\text{m}}{5{,}8\,\text{s} \cdot \text{s}}$

$F = 790\,\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

$\underline{\underline{F = 790\,\text{N}}}$

Ergebnis: Die Antriebskraft des Pkw Trabant beträgt 790 N.

① ② ③ ④

---

① Auf einen Körper, der eine geneigte Ebene hinabgleitet, wirkt in Bewegungsrichtung eine Kraft von 0,80 N. Wie groß ist die Masse des Körpers, wenn die Beschleunigung 1,2 m · s^{-2} beträgt? (Die Reibung wird vernachlässigt.)

② Wie groß ist die Antriebskraft eines Pkw, wenn dieser eine Masse von 850 kg hat und mit einer Beschleunigung von 1,2 m · s^{-2} anfährt?

③ Mit welcher Beschleunigung fährt ein Zug an, wenn seine Masse 920 t und die Zugkraft der Lokomotive 474 kN beträgt?

④ Fährt eine Diesellokomotive BR 130 mit der Geschwindigkeit 90 km · h^{-1}, so kann sie auf einer Strecke von 400 m bis zum Stillstand abgebremst werden. Die Masse der Lokomotive beträgt 120 t. Wie groß ist die Bremskraft?

Erklären eines Vorganges.

■ Erklären Sie die Wirkungsweise eines Sicherheitsgurtes bei einem Auffahrunfall eines Pkw!

Lösung: Bei einem Unfall kann bei einem Pkw eine sehr große Verzögerung (Beschleunigung) auftreten. Es gelten das Newtonsche Grundgesetz, das Trägheitsgesetz und das Wechselwirkungsgesetz.

Hat der Fahrer keinen Sicherheitsgurt angelegt, so würde er sich aufgrund des Trägheitsgesetzes gleichförmig weiter bewegen und könnte sich an der Frontscheibe und am Lenkrad des Autos starke Verletzungen zuziehen.
Soll der Fahrer ($m \approx 70$ kg) bei einem Auffahrunfall ($a \approx 100\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) auf dem Sitz bleiben, so muß nach dem Newtonschen Grundgesetz an ihm die Kraft ($F = 7000$ N) entgegen der Fahrtrichtung angreifen. Diese setzt sich aus der Reibungskraft zwischen Fahrer und Sitz, der Kraft, mit der sich der Fahrer auf das Lenkrad stützt, und der Kraft F_S, die vom Sicherheitsgurt auf den Fahrer wirkt, zusammen. Diese Kraft F_S hat einen erheblichen Betrag.
Eine solche Kraft kann selbst durch enorme Anstrengung des Fahrers beim Abstützen nicht aufgebracht werden (Bild 136/1). Wegen des Wechselwirkungsgesetzes wird durch die F_S entgegengerichtete Kraft gleichen Betrages der Sicherheitsgurt gedehnt (plastisch verformt), wodurch sich der Bremsweg des Fahrers erhöht und seine Bremsbeschleunigung verringert. ① ② ③

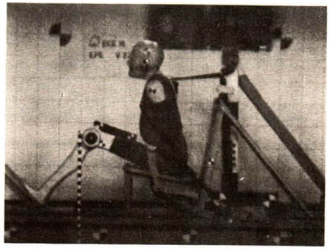


Bild 136/1 Prüfung von Sicherheitsgurten bei einem Aufprall mit 50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
(Aufnahme aus einem Hochgeschwindigkeitsfilm mit 1000 Bildern pro Sekunde)

Gewichtskraft und „Schwerelosigkeit"

Physikalische Bedeutung der Gewichtskraft. Die Gewichtskraft ist die Kraft, mit der ein Körper von der Erde angezogen wird.

Gleichung für die Gewichtskraft. Jeder Körper, der nicht auf einer Unterlage liegt oder an einer Aufhängung befestigt ist, fällt aufgrund der Gewichtskraft zur Erde. Er führt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus. Es gilt das Newtonsche Grundgesetz $F = m \cdot a$. Setzt man in die Gleichung für a die Fallbeschleunigung g und für m die Masse des Körpers ein, so erhält man für die Gewichtskraft $\boldsymbol{F_G = m \cdot g}$. Diese Gleichung gilt mit $g \approx 10\,\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ in guter Näherung für Körper in Erdnähe.

Ortsabhängigkeit der Gewichtskraft. Bei der Behandlung des freien Falls eines Körpers wurde bereits hervorgehoben, daß der Betrag der Fallbeschleunigung ortsabhängig ist. Folglich ist auch die Gewichtskraft ortsabhängig. Ist z. B. die Masse eines Körpers 5 kg, so beträgt seine Gewichtskraft am Pol 49,2 N und am Äquator 48,9 N.

Kraft auf eine Unterlage. Wird ein Körper am Fallen durch eine Unterlage oder Aufhängung gehindert, so drückt er aufgrund der Gewichtskraft auf seine Unterlage oder zieht an seiner Aufhängung. Der Betrag dieser Kraft ist gleich dem Betrag der Gewichtskraft und kann aus $F = m \cdot g$ berechnet werden. Was geschieht aber, wenn der Körper zusammen mit seiner Unterlage fällt?

52

Im Ruhezustand drückt der Mauerziegel auf das Brett (Bild 137/1). Er übt eine Kraft auf die Unterlage aus. Das zwischen Brett und Mauerziegel liegende Papier kann nicht herausgezogen werden. Wird der Faden oben durchgebrannt, fallen Brett und Mauerziegel nach unten. Der Mauerziegel drückt während des Falls nicht mehr auf das Brett. Das Papier kann herausgezogen werden.

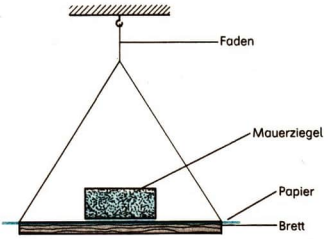


Bild 137/1 Experimentieranordnung

Der Betrag der Gewichtskraft stimmt bei einem ruhenden Körper mit dem Betrag der Kraft überein, mit der dieser auf seine Unterlage drückt. ④ ⑤

„Schwerelosigkeit". Die Bewegung eines Raumschiffes um die Erde setzt sich aus einer gleichförmigen Bewegung mit hoher Geschwindigkeit (8 km · s^{-1}) in Richtung der Tangente an die Bahn und aus einer Fallbewegung zusammen. Im Raumschiff gelten die gleichen Bedingungen wie bei einem frei fallenden Körper. Die Körper drücken nicht auf ihre Unterlage und ziehen nicht an ihrer Aufhängung; sie schweben im Raumschiff. In der Umgangssprache wird dieser Zustand der Körper oft als „schwerelos" bezeichnet. In diesem Zustand behält aber jeder Körper seine Masse, er bleibt träge und schwer.

Newton, der Begründer der klassischen Mechanik

Isaac Newton (↗ Bild 123/2) wurde 1643 in einem kleinen Dorf in Ostengland geboren. Seine Kindheit verbrachte er auf dem Gutshof seiner Eltern. Später besuchte er eine Lateinschule. Mit 18 Jahren wurde Newton Student an der Universität Cambridge; bereits neun Jahre später erfolgte seine Berufung zum Professor. Durch die Fürsprache eines Freundes kam er 1699 als Direktor der Münzstätte nach London. 1708 wurde der englische Gelehrte Präsident der berühmten Royal Society, der englischen Akademie für Naturwissenschaften. 1727 starb Newton im Alter von 85 Jahren.
Newton lebte in der Zeit des aufblühenden Kapitalismus. Die Industrie entwickelte sich im 17. Jahrhundert besonders in England stark. Aus der Entwicklung der Produktionsinstrumente und aus dem Stand der Forschungen in der Astronomie ergaben sich viele Fragestellungen für die Mechanik. Aufbauend auf den bereits bekannten Erkenntnissen aus der Mechanik und auf den Erfahrungen bei den Beobachtungen von Bewegungen auf der Erde und am Himmel, arbeitete Newton in den Jahren 1665 bis 1667 das wissenschaftliche Fundament der Mechanik aus, das er in seinem berühmtesten Werk „Mathematische Prinzipien der Naturwissenschaft" dargelegt hat. Durch Newtons wissenschaft-

---

① Erklären Sie mit Hilfe des Newtonschen Grundgesetzes, warum Lkw-Hänger im Gegensatz zu Pkw-Hängern mit geringer Nutzmasse eigene Bremsen haben müssen!

② Durch Vorsignale werden Triebwagenführer der Reichsbahn rechtzeitig auf notwendige Bremsungen hingewiesen. Erklären Sie, warum beim Bremsen von Zügen oft lange Bremswege auftreten!

③ Erklären Sie, warum zwei Schüler beim Anschieben von zwei unterschiedlich beladenen Wagen die gleichen Beschleunigungen erreichen können!

④ Mit welcher Kraft drückt ein ruhender Körper mit der Masse m = 375 g auf seine Unterlage?

⑤ Wie groß ist die Masse des Körpers, wenn er mit einer Kraft von 45 N an einer Feder zieht?

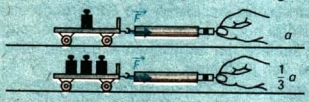
liche Arbeiten wurde die Mechanik Ende des 17. Jahrhunderts zur grundlegenden Disziplin der Physik und erlangte große Bedeutung auch für andere Naturwissenschaften.

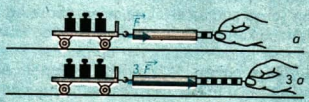
In den beiden ersten Bänden des Buches „Mathematische Prinzipien der Naturwissenschaft" beschrieb Newton die Zusammenhänge zwischen den Kräften und den Bewegungen. Das Wechselwirkungsgesetz, das Trägheitsgesetz und das Newtonsche Grundgesetz wurden formuliert.

Im dritten Band wendete Newton die Zusammenhänge zwischen Kräften und Bewegungen auf Erscheinungen am Himmel an. Er wies nach, daß gleiche physikalische Gesetze sowohl für Bewegungen der Körper auf der Erde als auch für die Bewegungen der Planeten, der Monde und der Kometen gelten. Er begründete damit eine einheitliche Physik der Erde und des Himmels. Für Newton waren Beobachtung und Experiment Quellen der Erkenntnis. Er verallgemeinerte exakt vorhandene Beobachtungsdaten und Erfahrungen und nutzte die Mathematik zur genauen Formulierung von Naturgesetzen. Dadurch ergaben sich bessere Möglichkeiten, mit erkannten Naturgesetzen physikalische Vorgänge zu erklären und ihren Ablauf vorherzubestimmen. Mehr als zwei Jahrhunderte galt die Newtonsche Mechanik als Grundlage der gesamten Physik. Aber auch in der physikalischen Erkenntnis gibt es keinen Stillstand. So führten die seit dem 20. Jahrhundert gewonnenen neuen, umfassenderen Erkenntnisse zum Verständnis der Bedingungen, unter denen die Gesetze der Newtonschen Mechanik bis heute anwendbar sind. Diese Gesetze gelten nicht bei großen Geschwindigkeiten, z. B. bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit, und bei Bewegungen im atomaren Bereich.

Zusammenfassung

Greift an einen bewegbaren Körper eine konstante Kraft an, dann bewegt sich der Körper gleichmäßig beschleunigt.





Die Beschleunigung des Körpers ist bei konstanter Kraft um so größer, je kleiner seine Masse ist;

$a \sim \frac{1}{m}$, **wenn** F **= konstant.**

Die Beschleunigung des Körpers ist bei konstanter Masse um so größer, je größer die wirkende Kraft ist;

$a \sim F$, **wenn** m **= konstant.**

$$a = \frac{F}{m} \quad \text{oder} \quad F = m \cdot a \quad \text{oder} \quad m = \frac{F}{a}$$

Gültigkeitsbedingung: Körper als Massepunkt

Ein Hammerwerfer dreht sich sehr schnell um seine eigene Achse. Er muß sehr viel Kraft aufwenden, um mit beiden Händen sein Wurfgerät zu halten. Vereinfachend nehmen wir an, daß sich die Kugel des Wurfgerätes auf einer Kreisbahn um den Hammerwerfer bewegt und daß der Betrag der Geschwindigkeit konstant ist. Wovon ist die Kraft, mit der die Kugel auf der Bahn gehalten wird, abhängig?

Radialkraft

Geschwindigkeit bei der Kreisbewegung. Unter vereinfachenden Annahmen kann man die Bewegung der Kugel als gleichförmige Kreisbewegung betrachten. Im Abschnitt Kinematik (↗ S. 100) haben wir festgestellt, daß bei der gleichförmigen Kreisbewegung
- der Betrag der Geschwindigkeit konstant ist,
- die Richtung der Geschwindigkeit sich ständig ändert und in jedem Punkt mit der Richtung der Tangente an den Kreis übereinstimmt.

Gleichung für die Radialkraft. Aus Erfahrung wissen wir, daß für die Kreisbewegung eines Körpers eine Kraft erforderlich ist, die zum Mittelpunkt des Kreises gerichtet ist. Sie wird als **Radialkraft** bezeichnet.
Von welchen Größen hängt diese Kraft ab?

53 ▼ Beobachtet wird der Zeiger des Radialkraftmessers (Bild 139/2), wenn jeweils eine der drei Größen Umlaufzeit, Masse der Walze, Radius der Kreisbahn geändert und die anderen konstant gehalten werden.

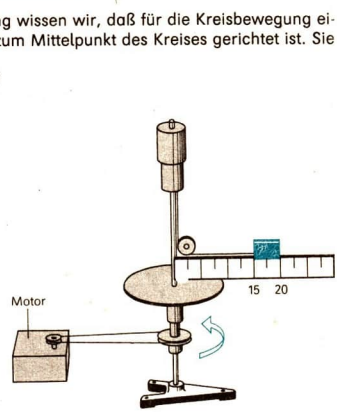


Bild 139/2 Experimentieranordnung

Wir erkennen:
- Der Betrag der Radialkraft ist um so größer,
  - je kleiner die Umlaufzeit ist, wenn m = konstant und v = konstant,
  - je größer die Masse des Körpers ist, wenn T = konstant und v = konstant,
  - je größer der Radius der Kreisbahn ist, wenn m = konstant und T = konstant.

Genauere Untersuchungen ergeben: **Für den Betrag der Radialkraft gilt die Gleichung** $F_r = m \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}$.

Diese Gleichung kann unter Berücksichtigung der Gleichung $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$ *umgeformt werden. Man erhält dann* $F_r = m \cdot \frac{v^2}{r}$.

■ Für den Hammerwerfer (Bild 139/1) bedeutet das:
Je schneller er sich dreht, desto größer ist die Radialkraft, die er aufbringen muß, um das Gerät auf der Bahn zu halten. Da Jugendliche nur eine geringere Radialkraft aufbringen können als Erwachsene, hat das Wurfgerät für Jugendliche eine kleinere Masse als das für Männer.

② ③ ④ ⑤

Kreisbewegung und Drehbewegung

In der Technik gibt es viele Kreis- und Drehbewegungen. So bewegt sich der Griff einer Kurbel einer Maschine auf einer Kreisbahn um die Achse, so führen das Laufrad einer Dampfturbine, die Scheibe einer Schleifmaschine, der Bohrer einer Bohrmaschine, der Anker eines Elektromotors Drehbewegungen aus (Bilder 141/1 und 141/2).

Bei einer **Kreisbewegung** bewegt sich ein Körper, der als Massepunkt betrachtet werden darf, **auf einem Kreis**. Bei einer **Drehbewegung dreht sich ein Körper um eine Achse.** Der Körper darf in diesem Fall nicht als ein einziger Massepunkt betrachtet werden. Er kann in Gedanken in viele Massepunkte (M_1, M_2...M_n) zerlegt werden (Bild 140/1). Jeder dieser Massepunkte führt eine Kreisbewegung aus, an jedem greift eine Radialkraft an. Diese ist für die äußeren Massepunkte des Körpers größer als für die inneren. Daraus ergeben sich Folgerungen für die Praxis.

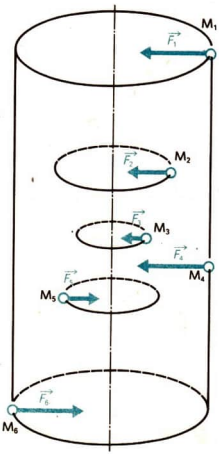


Bild 140/1

Bild 141/1

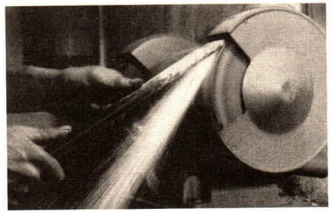


Bild 141/2

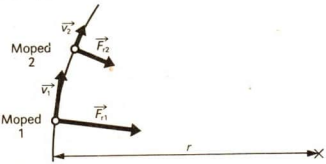
Anwendungen zur Kreisbewegung

Drehende Maschinenteile. Da die Radialkraft von der Umlaufzeit abhängig ist, darf bei drehenden Maschinenteilen oder Werkstücken die Drehzahl nicht beliebig erhöht werden. Es besteht sonst die Gefahr, daß für äußere Teile eines sich drehenden Maschinenteils oder Werkstücks die Radialkraft (Kohäsionskraft) nicht mehr ausreicht, um diese auf der Kreisbahn zu halten. Dann lösen sich solche Teile ab und bewegen sich tangential zur bisherigen Kreisbahn. Um mögliche Unfälle zu vermeiden, sind Arbeitsschutzmaßnahmen (maximale Drehzahl, Verkleidungen an Maschinen) festgelegt (↗ Bild 141/2).

Kurvenfahrt.

■ Zwei Mopedfahrer (gleiche Massen werden angenommen) durchfahren die gleiche Kurve mit konstanter, aber unterschiedlicher Geschwindigkeit ($v_1 = 45\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $v_2 = 15\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$). Wie verhalten sich die auftretenden Radialkräfte zueinander?

Analyse:



Gesucht: $F_{r1} : F_{r2}$

Gegeben:
$v_1 = 45\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
$v_2 = 15\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
$m = m_1 = m_2$
r = konstant
Es liegt eine gleichförmige Kreisbewegung vor.

Bild 141/3

---

① Interpretieren Sie die Gleichungen für die Radialkraft!

② Zwei Körper mit unterschiedlichen Massen bewegen sich auf der gleichen Kreisbahn mit der gleichen Umlaufzeit. Was können Sie über die Radialkräfte aussagen? Begründen Sie Ihre Aussage!

③ Zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 bewegen sich mit gleicher Umlaufzeit gleichförmig auf einer Kreisbahn um den Punkt M. An jedem Körper greift die gleiche Radialkraft an. Was können Sie über die Radien der Kreise aussagen, wenn $m_1 < m_2$ ist? Begründen Sie Ihre Aussage!

④ Leiten Sie aus der Gleichung $F_r = m \cdot \frac{v^2}{r}$ die Gleichung $F_r = m \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}$ her!

⑤ Zwei Körper gleicher Masse bewegen sich auf zwei Kreisbahnen mit den Radien r_1 und r_2 um den Punkt M. Es ist $r_1 > r_2$. Welcher Körper hat die größere Umlaufzeit, wenn an beiden Körpern gleiche Radialkräfte angreifen? Begründen Sie Ihre Aussage!

Lösung:

$F_{r1} = \frac{m_1}{r} \cdot v_1^2$ $\qquad$ $F_{r2} = \frac{m_2}{r} \cdot v_2^2$

Mit $v_1 = 3v_2$ und $m_1 = m_2 = m$ ist

$F_{r1} = \frac{m}{r} \cdot (3v_2)^2$

$F_{r1} = 9 \cdot \frac{m}{r} v_2^2$

Daraus folgt $\frac{F_{r1}}{F_{r2}} = \frac{9}{1}$

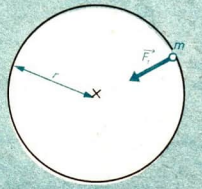
Ergebnis: Damit Moped 1 mit einer dreimal so großen Geschwindigkeit wie Moped 2 eine Kurve durchfahren kann, muß am Moped 1 eine neunmal so große Radialkraft wie am Moped 2 angreifen.
Die Radialkraft wird durch die Reibungskraft zwischen Rad und Straßenbelag aufgebracht und hängt auch vom Reifenprofil ab. Ein gutes Reifenprofil ist notwendig für ein sicheres Fahren.

Wäscheschleuder. In einer Wäscheschleuder bewegt sich jedes Wäschestück auf einer Kreisbahn um die Achse der Schleuder. Von der Wand des Zylinders wird die für jedes Wäschestück erforderliche Radialkraft aufgebracht. Auf das Wasser kann infolge der Löcher des Zylinders keine ausreichende Radialkraft wirken. Es verläßt durch die Poren der Wäschestücke und durch die Löcher der Wandung die Schleuder. ① ② ③ ④ ⑤

Zusammenfassung

Die Radialkraft, die bei einer gleichförmigen Kreisbewegung am Körper angreift, hält den Körper auf der Bahn. Sie ist stets zum Mittelpunkt des Kreises gerichtet. Ihr Betrag wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$F_r = m \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}.$$



Gültigkeitsbedingung: Körper als Massepunkt

Systematisierung des Zusammenhangs zwischen der auf Körper (Massepunkt) wirkenden Kraft und der hervorgerufenen Bewegung

Kraft		Bewegungsart	Geschwindigkeit
$F = 0$		Ruhe	$v = 0$
		gleichförmige Bewegung auf gerader Bahn	v = konstant, Richtung von v konstant, $v = \frac{s}{t}$
$F \neq 0$; F = konstant	Richtung der Kraft konstant $F = m \cdot a$	gleichmäßig beschleunigte Bewegung auf gerader Bahn	v veränderlich, Richtung von v konstant, $v = a \cdot t$
	Richtung der Kraft ändert sich ständig. Sie ist stets auf einen Punkt gerichtet. $F_r = \frac{m \cdot 4\pi^2 \cdot r}{T^2}$	gleichförmige Bewegung auf einer Kreisbahn	v = konstant, Richtung von v ändert sich ständig. Sie stimmt in jedem Punkt mit der Richtung der Tangente an den Kreis überein. $v = \frac{s}{t}$; $v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$

① Wie muß sich die Bahngeschwindigkeit eines Körpers auf seiner Kreisbahn verändern, wenn die Radialkraft vervierfacht wird und der Bahnradius gleich bleiben soll?

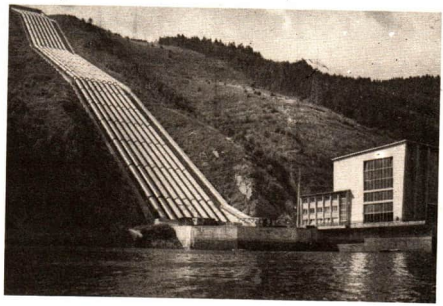
② Berechnen Sie die Radialkraft, die auf einen Waggon eines Zuges wirkt, wenn der Zug eine Kurve durchfährt, die Teil eines Kreises mit dem Radius 490 m ist! Der Zug hat eine Geschwindigkeit von 55 km $\cdot$ h^{-1}, und der Waggon hat eine Masse von 25 t. Der Waggon kann als Massepunkt betrachtet werden.

③ Ein Körper mit der Masse 5,0 kg ist an einer 1,2 m langen Schnur befestigt und führt in einer waagerecht liegenden Ebene eine gleichförmige Kreisbewegung aus.
Wie groß ist die Radialkraft, wenn die Umlaufzeit 1,0 s beträgt?

④ Wie groß ist die Radialkraft, die ein Hammerwerfer aufbringen muß, wenn die Kugel des Wurfgerätes eine Masse von etwa 7,2 kg hat, der Bahnradius 2,3 m beträgt und eine Geschwindigkeit von 28 m $\cdot$ s^{-1} erreicht werden soll? Die Bewegung wird als gleichförmige Kreisbewegung betrachtet.

⑤ Berechnen Sie die Radialkraft, die an einem Mopedfahrer (Gesamtmasse 150 kg) angreift, wenn er eine Kurve (r = 22 m) mit einer Geschwindigkeit von a) 45 km $\cdot$ h^{-1}, b) 15 km $\cdot$ h^{-1} durchfährt!

Wasserkraftwerke an der Wolga haben Stauseen, in denen sehr viel Wasser gespeichert ist. Der Höhenunterschied zwischen Wasserspiegel und Turbinen ist gering. Umgekehrt ist es bei Wasserkraftwerken im Gebirge. Wenig Wasser durchläuft ein großes Gefälle und treibt die Turbinen an.
Welchen Einfluß haben die Masse des Wassers und der Höhenunterschied auf die vom Wasser gespeicherte potentielle Energie?



Energie

Physikalische Bedeutung der Energie. Im bisherigen Physikunterricht haben wir bereits gelernt:

▶ **Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten oder Wärme abzugeben oder Licht auszustrahlen.**

Die Einheit der Energie ist **ein Joule** (1 J). Mit einer Energie von 1 J kann eine Arbeit von 1 N · m (= 1 J) verrichtet oder eine Wärme von 1 J abgegeben werden.

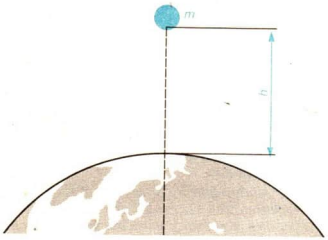


Bild 144/2 Ein Körper mit der Masse *m* in einer Höhe *h* über der Erdoberfläche besitzt potentielle Energie.

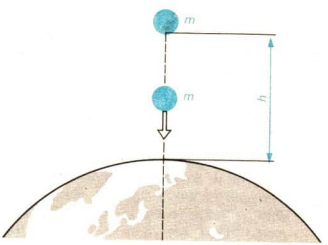


Bild 144/3 Ein fallender Körper mit der Masse *m* und der Geschwindigkeit *v* gegenüber der Erdoberfläche besitzt kinetische Energie.

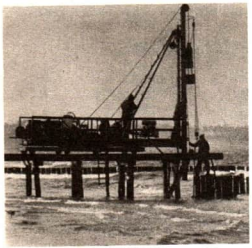


Bild 145/1 Gehobener Rammbär

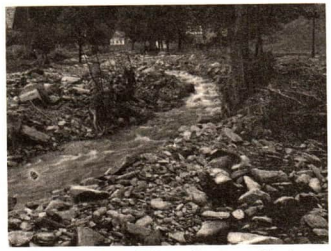


Bild 145/2 Gebirgsfluß nach einem Hochwasser

Mechanische Energie E_{mech}. Diese tritt in zwei Formen auf.

Potentielle Energie E_{pot} — **Kinetische Energie E_{kin}**

ist die Fähigkeit eines Körpers, aufgrund

seiner Lage oder seiner elastischen Verformung — **seiner Bewegung**

mechanische Arbeit zu verrichten.

Hubarbeit und potentielle Energie

Damit ein Rammbär potentielle Energie gegenüber der Erdoberfläche hat, muß er gehoben werden (Bild 145/3). Während des Hebens wird Hubarbeit verrichtet. Das Heben des Körpers kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, denn wir wissen, daß nach der Goldenen Regel der Mechanik eine Verlängerung des Weges nicht unbedingt zu einer Veränderung der mechanischen Arbeit führt. Der Körper erlangt – unabhängig vom Weg – jeweils die gleiche potentielle Energie, wenn an ihm ein und dieselbe Hubarbeit verrichtet wird.

Ein Flugzeug, das in einer bestimmten Höhe fliegt, hat gegenüber dem Meeresspiegel eine andere potentielle Energie als gegenüber einem hohen Berg (Bild 145/4).

Zur Angabe der potentiellen Energie eines Körpers ist es notwendig, genau festzulegen, von welcher Bezugsebene aus die Höhenmessung beginnt.

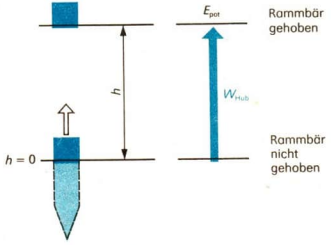


Bild 145/3 Rammbär

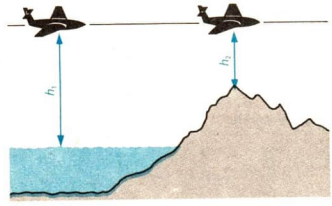


Bild 145/4

Der Betrag der potentiellen Energie eines Körpers hängt von der gewählten Bezugsebene ab.
Im folgenden wird die Gleichung für die potentielle Energie hergeleitet.

Ansatz: An einem als Massepunkt betrachteten Körper wird gemäß Bild 146/1 durch eine Hubkraft F_{Hub} die Hubarbeit W_{Hub} verrichtet. Nach dem Anheben um die Höhe h besitzt der Körper potentielle Energie E_{pot}. Diese ist gleich der beim Heben verrichteten Hubarbeit. Sie kann nach der Gleichung $W_{Hub} = F_{Hub} \cdot h$ berechnet werden, da bei gleichförmigem Anheben die Hubkraft konstant ist und die Richtungen von Kraft und Weg übereinstimmen. Die Hubkraft und die Gewichtskraft des Körpers haben den gleichen Betrag.

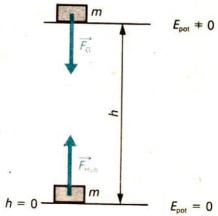


Bild 146/1

Es gilt:
$E_{pot} = W_{Hub}$;
$W_{Hub} = F_{Hub} \cdot h$; $\quad F_{Hub} = F_G$

Umformung:
$E_{pot} = F_G \cdot h$ $\quad$ mit $F_G = m \cdot g$
$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$

Ergebnis:

▶ **Die potentielle Energie eines gehobenen Körpers kann mit der Gleichung $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ berechnet werden.**
Bedingung: Die Höhe wird von $h = 0$ aus gemessen.

Aus der Gleichung kann gefolgert werden: Die Masse eines Körpers und dessen Höhe gegenüber der Bezugsebene haben Einfluß auf die potentielle Energie. Steht zum Antrieb der Turbinen eines Wasserkraftwerkes viel Wasser zur Verfügung, so kann bei kleinem Höhenunterschied zwischen Wasserspiegel und Turbine die gleiche potentielle Energie genutzt werden wie bei Wasserkraftwerken mit weniger Wasser und stärkerem Gefälle. ①

■ Im Pumpspeicherwerk Markersbach beträgt der Höhenunterschied zwischen der Wasseroberfläche im Speicherbecken und den Turbinen im Mittel 300 m. Wie groß ist die potentielle Energie des gesamten Wassers im Speicherbecken (6,0 Mill. m^3)?

Analyse:

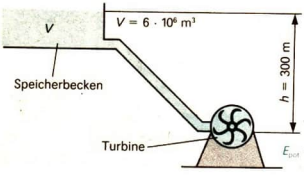


Bild 146/2

Gesucht: E_{pot}

Gegeben:
$V = 6{,}0 \cdot 10^6\ m^3$ $\quad \varrho_{Wasser} = 1\ g \cdot cm^{-3}$
$h = 300$ m $\quad \varrho_{Wasser} = 1000\ kg \cdot m^{-3}$

Plan zur Lösung: Zur Berechnung der potentiellen Energie wird die Masse des Körpers benötigt. Diese wird aus dem Volumen des Körpers und der Dichte des Stoffes berechnet.

Lösung:

$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ $\qquad m = V \cdot \varrho$

$E_{pot} = V \cdot \varrho \cdot g \cdot h$

$E_{pot} = 6000000\ m^3 \cdot 1000\ kg \cdot m^{-3} \cdot 9{,}81\ m \cdot s^{-2} \cdot 300\ m$

$E_{pot} = 1{,}755 \cdot 10^{13}\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$

$\underline{E_{pot} = 2 \cdot 10^{13}\ J}$

Ergebnis: Im Pumpspeicherwerk Markersbach hat das gespeicherte Wasser eine potentielle Energie von $2 \cdot 10^{13}$ J. Dieser Energiebetrag entspricht dem von etwa 2000 t Braunkohle (66 Waggons mit je 30 t) oder einer elektrischen Energie von $5 \cdot 10^6$ kWh. Das entspricht dem Bedarf von etwa 500000 Haushalten während der Spitzenbelastungszeit an einem Winterabend. Die energiewirtschaftliche Bedeutung von Pumpspeicherwerken zeigt Bild 147/1. ② ③

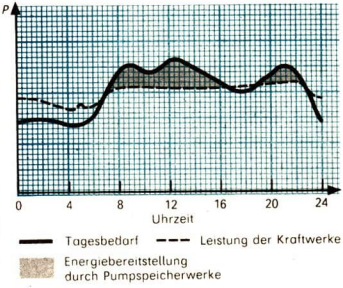


Bild 147/1 Tagesbedarf und Bereitstellung von Energie

Beschleunigungsarbeit und kinetische Energie

Ein fallender Rammbär wird durch die Gewichtskraft beschleunigt. Es wird Beschleunigungsarbeit verrichtet (Bild 147/2). Körper, die sich gegenüber einem Bezugskörper bewegen, besitzen kinetische Energie. So hat z. B. auch ein im Zug sitzender Fahrgast kinetische Energie, da er sich gegenüber der Erde bewegt.

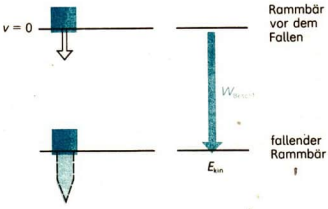


Bild 147/2 Rammbär

Der Betrag der kinetischen Energie eines Körpers hängt vom gewählten Bezugskörper ab.

---

① Beantworten Sie die zu Bild 144/1 gestellte Frage!

② Welche Hubarbeit wird vom Motor eines Krans verrichtet, wenn eine Betonplatte mit einer Masse von 2,5 t um 12 m gehoben wird? Wie groß ist die Leistung, wenn diese Arbeit in 11 s verrichtet wird?

③ In einer Gießerei wird mit einem Kran eine Gießpfanne, in der sich 3,0 t flüssiges Eisen befinden, um 5,0 m gehoben. Die Masse der Gießpfanne beträgt 1,5 t. Berechnen Sie die aufgewandte mechanische Arbeit!

Im folgenden wird die Gleichung für die kinetische Energie hergeleitet.

Ansatz: An einem als Massepunkt betrachteten Körper wird gemäß Bild 148/1 durch die Gewichtskraft F_G Beschleunigungsarbeit $W_{Beschl.}$ verrichtet. Nach dem freien Fall um die Strecke s besitzt der Körper kinetische Energie E_{kin}. Diese ist gleich der verrichteten Beschleunigungsarbeit. Sie kann mit der Gleichung $W_{Beschl.} = F_G \cdot s$ berechnet werden. Warum?

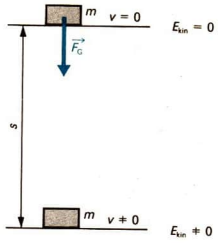


Bild 148/1

Es gilt:

$E_{kin} = W_{Beschl.}$ $\quad W_{Beschl.} = F_G \cdot s$

Umformung: $E_{kin} = F_G \cdot s$ $\quad$ mit $F_G = m \cdot g$

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

$$E_{kin} = m \cdot g \cdot \frac{g}{2} \cdot t^2$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot (g \cdot t)^2 \quad \text{mit} \quad v = g \cdot t$$

Ergebnis: $E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

Die Gleichung zur Berechnung der kinetischen Energie wurde am Beispiel eines frei fallenden Körpers hergeleitet. Sie gilt auch dann, wenn ein Körper auf andere Art die Geschwindigkeit v erreicht.

▶ **Die kinetische Energie eines Körpers kann mit der Gleichung $E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ berechnet werden.**

① ② ③

- Die Proportionalität $E_{kin} \sim v^2$ ist für viele Beispiele bestimmend, so für die Wirkung von Geschossen. Obwohl diese nur eine kleine Masse haben, ist die kinetische Energie wegen der hohen Geschoßgeschwindigkeit sehr hoch. Sie können deshalb eine beträchtliche mechanische Arbeit beim Auftreffen auf die Ziele verrichten (Zerstörung).

- Ein mit einer Diesellokomotive gezogener Schnellzug mit 12 Wagen muß vor einer Baustelle von 120 km · h^{-1} auf 40 km · h^{-1} abgebremst und nach der Baustelle wieder auf die Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt werden. Der Schnellzug hat eine Masse von 600 t.
Wieviel kinetische Energie wird beim Bremsen in thermische Energie umgewandelt?

Analyse:

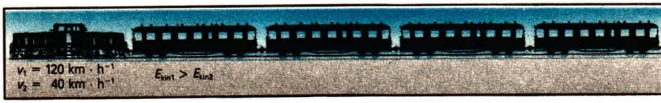


Bild 149/1

Gesucht: E_{kin}

Gegeben: $v_1 = 120\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ $\quad v_1 = 33\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_2 = 40\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ $\quad v_2 = 11{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$m = 600\ \text{t}$

Lösung:

Vor dem Bremsen: $E_{kin1} = \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$

Nach dem Bremsen: $E_{kin2} = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2$

Energiedifferenz: $E_{kin} = E_{kin1} - E_{kin2}$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m\, v_1^2 - \frac{1}{2} m\, v_2^2$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot 600000\ \text{kg} \cdot (33{,}3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 - \frac{1}{2} \cdot 600000\ \text{kg}\ (11{,}1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$$

$$E_{kin} = 2{,}96 \cdot 10^8\ \text{J}$$

$\underline{E_{kin} = 300\ \text{MJ}}$

Ergebnis: Beim Bremsen an der Baustelle werden 300 MJ kinetische Energie des Zuges in thermische Energie umgewandelt. Zum anschließenden Beschleunigen ist mehr als der doppelte Energiebetrag nötig, da der Wirkungsgrad der Lokomotive kleiner als 0,5 ist. Daraus wird deutlich: Unnötiges Bremsen und unnötiges Beschleunigen von Verkehrsmitteln ist eine Vergeudung von Energie. ④ ⑤

Zum Vergleich: Der Energiebetrag von 300 MJ deckt den Energiebedarf einer Familie in einer Dreizimmer-Wohnung für etwa zwei Wochen.

---

① Wie ändert sich die kinetische Energie eines Körpers, wenn man seine Geschwindigkeit verdoppelt (verdreifacht, auf die Hälfte verringert)?

② Wie muß sich die Geschwindigkeit eines Körpers ändern, wenn seine kinetische Energie verdoppelt (verdreifacht, auf die Hälfte verringert) werden soll?

③ Vergleichen Sie die kinetische Energie von drei Körpern:

Geschoß:	$m = 10\ \text{g}$,	$v = 700\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Ball:	$m = 500\ \text{g}$,	$v = 72\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
Sprinter:	$m = 75\ \text{kg}$	$v = 11\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

④ a) Wie groß ist die Beschleunigungsarbeit, wenn ein Pkw ($m = 800$ kg) bis zur Geschwindigkeit 36 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ aus dem Stand beschleunigt wird?

b) Bis zu welcher Geschwindigkeit kann der Pkw mit viermal so großer Beschleunigungsarbeit beschleunigt werden? (Keine numerische Berechnung durchführen.)

⑤ Ein Fahrzeug mit einer Masse von 1,0 t wird mit einer Verzögerung von 2,0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ auf einem Weg von 80,0 m abgebremst. Welche mechanische Arbeit wird dabei verrichtet?
Warum ist es energiewirtschaftlich günstig, wenn der Straßenverkehr in „grünen Wellen" abläuft?

Erhaltung der Energie bei mechanischen Vorgängen

Bei einem frei fallenden Körper nimmt die kinetische Energie zu, die potentielle Energie hingegen ab. Für einen aus 45 m Höhe drei Sekunden lang frei fallenden Körper mit der Masse 1 kg (Bild 150/1) gilt (Luftwiderstand bleibt unberücksichtigt):

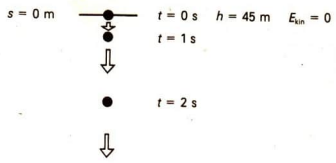


Bild 150/1

t in s	$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$ in m	$v = g \cdot t$ in m · s^{-1}	h in m	E_{pot} in J	E_{kin} in J	$E_{pot} + E_{kin}$ in J
0	0	0	45	450	0	450
1	5	10	40	400	50	450
2	20	20	25	…	…	…
3	45	30	0	…	…	…

Wir erkennen bei diesem mechanischen Vorgang ein weiteres Beispiel für das Gesetz von der Erhaltung der Energie.

In Natur und Technik wird bei der wechselseitigen Umwandlung von potentieller und kinetischer Energie stets ein Teil der mechanischen Energie in thermische Energie umgewandelt. Dabei steigt die Temperatur der beteiligten Körper. Sind bei mechanischen Vorgängen die „Energieverluste" (z. B. durch Reibung) gering, kann die mechanische Energie als konstant betrachtet werden (Bild 150/2).

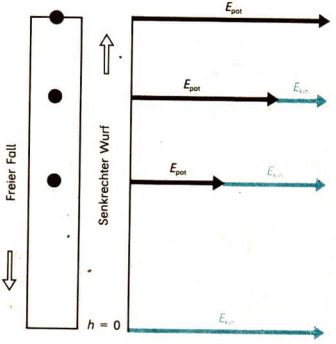


Bild 150/2 Energieumwandlung beim freien Fall und beim senkrechten Wurf
Beide Bewegungen verlaufen genau umgekehrt. Beim freien Fall nimmt die kinetische Energie zu, beim senkrechten Wurf die potentielle Energie. Die mechanische Energie ist konstant.

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie bei mechanischen Vorgängen lautet:

$E_{mech} = E_{pot} + E_{kin}$ = konstant.
Gültigkeitsbedingung: Keine Umwandlung mechanischer Energie in andere Energieformen.

① ②

Anwendung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie bei mechanischen Vorgängen

Erklären eines Vorganges. Von einem 2 m hohen Podest springt ein Artist auf das hochstehende Ende einer Wippe (Bild 151/1). Dadurch schnellt ein zweiter etwa gleich schwerer Artist vom anderen Ende der Wippe in die Luft, führt einen Salto aus und landet auf einem zweiten Podest in annähernd gleicher Höhe. Wie ist dieser Vorgang zu erklären?

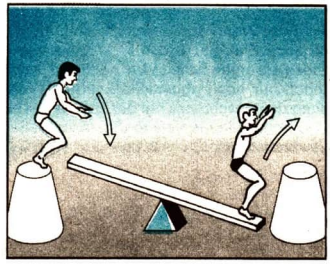


Bild 151/1

Bei diesem Vorgang werden potentielle und kinetische Energie ineinander umgewandelt sowie mechanische Energie übertragen. Vernachlässigt man andere Energieumwandlungen (z. B. durch Verformungsarbeit an der Wippe), so ist die mechanische Energie konstant. Der erste Artist hat potentielle Energie, wenn er auf dem Podest steht. Springt er vom Podest, dann wird seine potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Beim Sprung des ersten Artisten auf die Wippe erfolgt die Übertragung der mechanischen Energie auf den zweiten Artisten. Dieser hat beim Absprung die größte kinetische Energie. Sie nimmt beim Flug auf das Podest ab und wird in potentielle Energie umgewandelt. Da die Energie bei diesem Vorgang konstant ist, gelangt der zweite Artist annähernd auf die gleiche Höhe, aus der der erste abgesprungen ist.

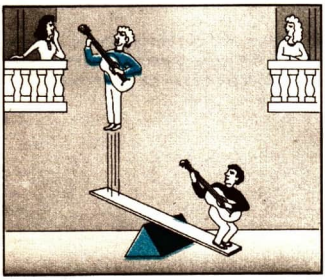


Bild 151/2 Ein physikalisches Ständchen

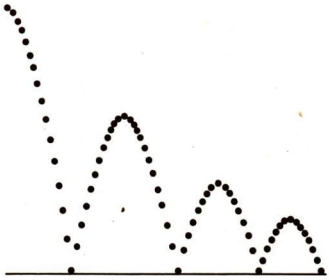


Bild 151/3 ③

① Warum kann die potentielle Energie des gestauten Wassers in einem Wasserkraftwerk nicht vollständig in kinetische Energie des strömenden Wassers umgewandelt werden?

② Beschreiben Sie die Energieumwandlungen an einem schwingenden Pendel! Warum kommt ein schwingendes Pendel allmählich zur Ruhe?

③ Erklären Sie die in den Bildern 151/2 und 151/3 dargestellten Vorgänge!

Herleiten eines Gesetzes.

■ Wie hoch steigt ein Geschoß, das mit der Geschwindigkeit v senkrecht nach oben geschossen wird?

Analyse: Wenn das Geschoß den Lauf verläßt, hat es kinetische Energie (Bild 152/1). Diese wird in potentielle Energie umgewandelt. Im höchsten Punkt hat das Geschoß nur noch potentielle Energie. Wenn man die Reibung des Geschosses mit der Luft vernachlässigt, wird die kinetische Energie vollständig in potentielle Energie umgewandelt.

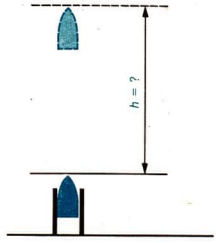


Bild 152/1

Ansatz: $E_{pot} = E_{kin}$

Umformung: $m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

Ergebnis: Die Steighöhe beim senkrechten Wurf kann mit der Gleichung $h = \frac{v^2}{2g}$ berechnet werden.

Da die Fallbeschleunigung konstant ist, hängt die Steighöhe nur von der Geschwindigkeit ab, mit der das Geschoß abgefeuert wird; $h \sim v^2$. Sie ist unabhängig von der Masse des Geschosses. Das hergeleitete Gesetz gilt, wenn die Bedingungen (keine Reibung und Geschoß als Massepunkt) erfüllt sind.
Es gilt nicht nur zur Berechnung der Steighöhe eines Körpers, sondern auch zur Berechnung der Fallstrecke eines Körpers, wenn die Auftreffgeschwindigkeit bekannt ist (↗ Bild 150/2).

■ **Berechnen einer physikalischen Größe.**
Ein Pkw prallt mit erhöhter Geschwindigkeit von 110 km · h^{-1} auf ein Hindernis. Um die Auswirkung dieses Unfalls zu veranschaulichen, soll die Höhe berechnet werden, aus der ein Körper fallen müßte, um die gleiche Geschwindigkeit des Pkw zu erreichen.

Analyse:

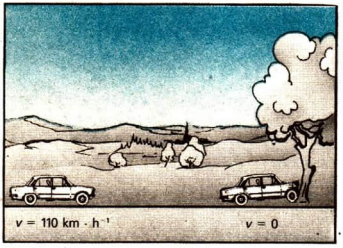


Bild 152/2

Gesucht: h
Gegeben: $v = 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
$v = 30{,}6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Lösung: $h = \frac{v^2}{2g}$

$$h = \frac{30{,}6^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2}{2 \cdot 10\ \text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$$\underline{\underline{h = 47\ \text{m}}}$$

Ergebnis: Der Körper müßte aus einer Höhe von 47 m fallen, um beim Auftreffen auf dem Boden eine Geschwindigkeit von 110 km · h^{-1} zu erreichen.

Nutzbarkeit der Energie

Die verfügbare Energie beeinflußt den gesellschaftlichen Fortschritt. Zunächst nutzte der Mensch die mechanische und die von der Sonne abgestrahlte Energie. Durch den Gebrauch des Feuers verbesserten sich die Lebensbedingungen.
Die Anwendung thermischer und später auch elektrischer Energie war entscheidend für die industrielle Revolution. Die Geschichte der Menschheit lehrt, daß das Problem der Erschließung von Energie immer wieder gelöst werden mußte und auch gelöst wurde. Es stand stets ausreichend Energie zur Verfügung, weil Energiequellen rechtzeitig erforscht und der Nutzung zugeführt wurden. Das Umstellen auf neue, andersartige Energiequellen umfaßte jedoch stets einen längeren Zeitraum. Auch künftig wird die Erschließung und Anwendung neuer Energiequellen längere wissenschaftlich-technische Forschungen erfordern.
Die Nutzung neuer Energiequellen muß physikalisch, technisch und auch bei vertretbaren Kosten möglich sein. Künftig wird der ständig steigende Energiebedarf durch stärkere Nutzung der Kernenergie gedeckt werden müssen. Aber auch die gegenwärtigen Hauptenergieträger Kohle, Erdöl und Erdgas bleiben in den nächsten Jahren nach wie vor wichtig.
In ihnen ist Energie der Sonnenstrahlung gespeichert. Die gespeicherte und die täglich von der Sonne auf die Erde gestrahlte Energie ermöglichen das Leben.
Nicht allein die ständige Steigerung der bereitgestellten Energie ist wichtig, noch bedeutungsvoller ist die rationelle Nutzung der Energie. Verschiedene Energieformen sind in Produktion, Technik und Haushalt unterschiedlich nutzbar.

Chemische Energie und auch **mechanische Energie** lassen sich gut speichern.
Elektrische Energie läßt sich gut übertragen und mit hohem Wirkungsgrad in andere Energieformen umwandeln. Ihr Nachteil ist jedoch, daß sie schlecht gespeichert werden kann.
Thermische Energie läßt sich wegen der Wärmeabgabe an die Umgebung ebenfalls schlecht speichern. Ist thermische Energie an einen Energieträger gebunden, dessen Temperatur nahe der Umgebungstemperatur liegt, so kann man sie nur mit hohem Aufwand in andere Energieformen umwandeln. Jedoch für Wohnraumheizungen ist diese thermische Energie zweckmäßig nutzbar.
Ziel ökonomischer Energieanwendung in allen Bereichen der Volkswirtschaft ist, die Entstehung der „Abfallwärme" zu verringern und nicht vermeidbare „Abfallwärme" für Heizzwecke einzusetzen. Dies trägt zur Einsparung gut nutzbarer Energie und zur Entlastung unserer natürlichen Umwelt bei.

Zusammenfassung

Physikalische Größe	Potentielle Energie	Kinetische Energie
Physikalische Bedeutung	Fähigkeit eines Körpers, aufgrund seiner Lage oder seiner elastischen Verformung mechanische Arbeit zu verrichten.	Fähigkeit eines Körpers, aufgrund seiner Bewegung mechanische Arbeit zu verrichten.
Formelzeichen	E_{pot}	E_{kin}
Einheit	1 J	1 J
Gleichung	$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ (nur für Körper, der von $h = 0$ aus gehoben wurde)	$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ (nur für Körper, der sich gegenüber einem Bezugskörper bewegt)
Gesetz von der Erhaltung der Energie bei mechanischen Vorgängen	Die mechanische Energie ist konstant. $E_{mech} = E_{pot} + E_{kin} = \text{konstant}$. Gültigkeitsbedingung: Keine Umwandlung mechanischer Energie in andere Energieformen	

① ② ③

① Wodurch kann die mechanische Energie eines Körpers erhöht und wodurch verkleinert werden?

② Eine Kugel bewegt sich in einer Ebene senkrecht zur Erdoberfläche auf einer Kreisbahn, deren Radius r ist (Bild 154/1). Im Punkt A hat die Kugel die Geschwindigkeit v_A.
a) Wie groß ist die kinetische Energie der Kugel im Punkt B?
b) Wie groß ist die potentielle Energie der Kugel im Punkt B gegenüber der potentiellen Energie im Punkt A?
c) Wie groß muß die Geschwindigkeit der Kugel im Punkt A sein, damit diese den Punkt B erreicht?

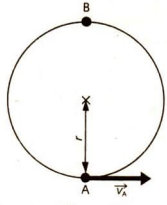


Bild 154/1

③ Beschreiben Sie mit den Begriffen Hubarbeit, Beschleunigungsarbeit, potentielle und kinetische Energie folgende Vorgänge:
a) Schießen mit einem Bogen, b) Einschlagen eines Pfahls mit einem Rammbär,
c) Zerschlagen eines Steins mit einem Hammer, d) Schmieden von Eisen.

Wechselwirkungsgesetz und Trägheitsgesetz

1. Bestimmen Sie die Beträge der im Bild 155/1 abgebildeten Kräfte!

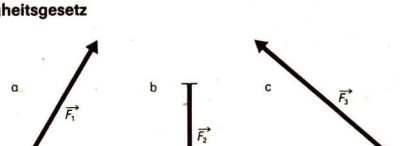


Bild 155/1 1 cm ≙ 10 N 1 cm ≙ 0,2 N 1 cm ≙ 5 N

2. Erklären Sie das Durchbiegen der Auflagebretter eines Bücherregals!
3. Erklären Sie, warum ein zu lose angelegter Sicherheitsgurt keinen ausreichenden Schutz bietet!
4. Erklären Sie, warum der Sanitätskasten in einem Pkw nicht auf der hinteren Ablage abgelegt werden darf!

Newtonsches Grundgesetz

5. Nennen Sie zwei Möglichkeiten, wie die Beschleunigung eines gleichmäßig beschleunigten Körpers bestimmt werden kann, ohne diese direkt zu messen!
6. Erklären Sie, warum ein Lkw ohne Anhänger an Kreuzungen schneller als ein gleicher Lkw mit Anhänger anfahren kann!
7. An einem Körper mit der Masse m greift eine Kraft F an. Der Körper bewegt sich mit der Beschleunigung a.
   Wie ändert sich die Beschleunigung, wenn der Körper ersetzt wird durch einen Körper mit a) halber Masse, b) doppelter Masse, c) dreifacher Masse, d) vierfacher Masse?
   Skizzieren Sie für diese Fälle das a-m-Diagramm!
8. Nennen Sie zwei Möglichkeiten, wie ein Mensch an einem hängenden Seil mit einer Kraft, die größer als seine Gewichtskraft ist, ziehen kann!
9. Ein Fußball mit der Masse $m = 500$ g wird beim Strafstoßschießen innerhalb von 0,02 s auf eine Geschwindigkeit von 15 m · s^{-1} beschleunigt.
   Welche Kraft wirkt auf den Ball? (Es wird angenommen, daß eine mittlere konstante Kraft wirkt.)
10. Berichten Sie über Leben und Wirken von Isaac Newton! Arbeiten Sie dazu den entsprechenden Lehrbuchabschnitt durch!

Kräfte bei der Kreisbewegung

11. Stellen Sie technische Beispiele für Drehbewegungen von Körpern zusammen!
12. Wird die Radialkraft, die einen Körper auf die Kreisbahn zwingt, Null, so bewegt sich der Körper tangential weiter. Beim Arbeitsschutz muß das beachtet werden.
    Welche Arbeitsschutzmaßnahmen in dieser Hinsicht sind Ihnen aus Ihrer produktiven Arbeit bekannt?

Mechanische Arbeit und mechanische Energie

13. Beschreiben und erklären Sie die Vorgänge auf einer Achterbahn! Wenden Sie zur Erklärung das Gesetz von der Erhaltung der Energie an!
14. Die potentielle Energie eines Fallschirmspringers verringert sich während des Sprunges. Bei geöffnetem Schirm nimmt seine kinetische Energie jedoch nicht zu. Wie ist das zu erklären?
15. Eine Leuchtkugel soll senkrecht in eine Höhe von 120 m geschossen werden. Wie groß muß die Abschußgeschwindigkeit mindestens sein? Warum muß die tatsächliche Abschußgeschwindigkeit größer sein?
16. Vergleichen Sie die potentielle Energie zweier Körper:
    Körper 1: $m_1 = 1{,}0$ kg,
    gegenüber einer Tischplatte um 45 cm gehoben,
    Körper 2: $m_2 = 490$ g,
    gegenüber der gleichen Tischplatte um 1,0 m gehoben.
    Warum müssen die Angaben zur Hubhöhe so ausführlich erfolgen?
    Wie hoch müßte Körper 2 gegenüber der Tischplatte gehoben werden, damit er die gleiche potentielle Energie wie Körper 1 (bezogen auf die Tischplatte) besitzt?
17. Ein Rammbär mit der Masse 450 kg fällt aus 3,9 m Höhe herab und trifft auf einen Pfahl, wobei der Rammbär in 0,01 s gleichmäßig abgebremst wird. Mit welcher Kraft drückt er den Pfahl in den Boden?

3. Wiederholung und Übung

Elektrisches Feld

1. a) $I = 0{,}28$ A b) $t = 3{,}6$ s

7. Wiederholung und Übung

Induktionsgesetz

3. $U_5 < U_4 < U_1 < U_2 < U_3$

Wechselstromgenerator und Transformator

9. a) 250 und 1500; 500 und 3000
11. a) $I_1 = 2$ A
12. $N_1 : N_2 = 25$; $I_2 = 2{,}5$ A

12. Wiederholung und Übung

Gesetze in elektrischen Stromkreisen

1. b) $R_I = 375\ \Omega$ $R_{II} = 250\ \Omega$
5. $R = 60\ \Omega$

Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum

8. $v_{Elektron} = 6 \cdot 10^5\ m \cdot s^{-1}$
   $v_{Pkw} = 27{,}8\ m \cdot s^{-1}$
   $v_{Raumschiff} = 8 \cdot 10^3\ m \cdot s^{-1}$
   $v_{Licht} = 3 \cdot 10^8\ m \cdot s^{-1}$

Elektrische Leitungsvorgänge in Halbleitern

13. $R_{kalt} = 330\ \Omega$ $R_{warm} = 200\ \Omega$
    $R_{heiß} = 100\ \Omega$

15. c) $R_{40\,V} = 290\ \Omega$ $R_{80\,V} = 400\ \Omega$
    $R_{200\,V} = 645\ \Omega$

16. Wiederholung und Übung

Mechanische Bewegungen

4. $\bar{v} = 5\ m \cdot s^{-1}$

Bewegungen mit konstantem Betrag der Geschwindigkeit

6. $s = 60$ m
8. $v = 12\ km \cdot h^{-1}$
9. $n = 1800\ min^{-1}$
10. $t = 1{,}2$ s

Bewegungen mit veränderlichem Betrag der Geschwindigkeit

13. $a = 640000\ m \cdot s^{-2}$
14. $s = 27$ m
16. $v = 73\ km \cdot h^{-1}$
18. $a = 2{,}5\ m \cdot s^{-1}$ $v = 16\ m \cdot s^{-1}$
19. $t_B = 3{,}5$ s $s_B = 48$ m
20. $v = 10\ m \cdot s^{-1}$ $s = 100$ m
22. $v = 15\ m \cdot s^{-1}$

21. Wiederholung und Übung

Newtonsches Grundgesetz

9. $F = 400$ N

Mechanische Arbeit und mechanische Energie

15. $v = 49\ m \cdot s^{-1}$
16. $W_{pot1} = 4{,}4$ J $W_{pot2} = 4{,}8$ J
    $h_3 = 0{,}92$ m
17. $F = 400$ kN

Fragen und Aufträge

S. 9

2. $Q = 720$ C
3. $n = 6{,}25 \cdot 10^{18}$
4. $n = 6{,}25 \cdot 10^{18}$

S. 31

1. $U_a < U_d < U_c < U_b$
2. $U_a < U_b < U_d < U_c$

S. 39

1. $t = 0{,}02$ s

S. 43

2. $I_2 = 150$ A

S. 53

2. a) $R = 6{,}7\ \Omega$ b) $R = 550\ \Omega$
   c) $U = 40$ V d) $U = 0{,}1$ V
   e) $I = 1{,}6 \cdot 10^3$ mA f) $I = 1{,}9 \cdot 10^6$ mA
   g) $U = 2{,}8 \cdot 10^{-4}$ V h) $I = 90$ mA
4. $R_1 : R_2 = 3 : 1$

S. 55

2. $R = 8{,}3\ \Omega$

S. 57

3. a) $U_2 = 18\ V$ b) $R_1 = 423\ \Omega$
   c) $R_2 = 0{,}1\ \Omega$ d) $U_1 = 136\ V$
   e) $R_1 = 14\ \Omega$
4. $U_1 = 4{,}9\ V$ $U_2 = 1{,}1\ V$

S. 59

1. $R = 30\ \Omega$
2. a) $U = 0{,}2\ V$ $U_K = 6{,}2\ V$

S. 67

4. $R = 2 \cdot 10^6\ \Omega$

S. 69

2. $t = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ s$

S. 77

1. a) $R = 100\ \Omega$ b) $R = 40\ \Omega$

S. 95

3.

$km \cdot h^{-1}$	54	72	83	54	100	130
$m \cdot s^{-1}$	15	20	23	15	28	35

4. $\bar{v} = 90\ km \cdot h^{-1}$ $t = 19\ s$

S. 97

1. $v = 46\ km \cdot h^{-1}$
3. $t_2 - t_1 = 17\ min$

S. 99

3. Schüttgut $v = 1{,}3\ m \cdot s^{-1}$
   Trog $s = 29\ m$
   Auto $t = 7{,}6\ min$

S. 103

1. großer Zeiger $v = 0{,}7\ cm \cdot min^{-1}$
   kleiner Zeiger $v = 0{,}05\ cm \cdot min^{-1}$
3. $v = 29\ km \cdot s^{-1}$

S. 107

3.

Δt	1 s	5 s	10 s	20 s
Δv	$0{,}1\ m \cdot s^{-1}$	$0{,}5\ m \cdot s^{-1}$	$1\ m \cdot s^{-1}$	$2\ m \cdot s^{-1}$

S. 111

3. $v = 40\ km \cdot h^{-1}$ $a = 1\ m \cdot s^{-2}$
   $s = 60\ m$
6. $t = 5\ s$

S. 113

1. $s_2 = 17\ m$ $s_3 = 23\ m$

S. 115

1. $a_1 = 2\ m \cdot s^{-2}$ $a_2 = 3\ m \cdot s^{-2}$
2. $a = 1{,}3\ m \cdot s^{-1}$ $s = 92\ m$

S. 117

3. $t = 2{,}6\ s$

S. 133

1.

$\frac{F}{a}$ in $N \cdot m^{-1} \cdot s^2$	0,2	0,18	0,2	0,21
$m \cdot a$ in $kg \cdot m \cdot s^{-2}$	0,07	0,07	0,07	0,07

S. 135

1. $m = 6{,}7\ kg$
2. $F = 1000\ N$
3. $a = 0{,}52\ m \cdot s^{-2}$
4. $F = 90\ kN$

S. 137

4. $F = 3{,}68\ N$
5. $m = 4{,}6\ kg$

S. 143

2. $F_r = 12\ kN$
3. $F_r = 240\ N$
4. $F_r = 2500\ N$
5. a) $F_r = 1100\ N$ b) $F_r = 120\ N$

S. 147

2. $W_{Hub} = 290\ kJ$ $P = 27\ kW$
3. $W_{Hub} = 220\ kJ$

S. 149

3. Geschoß $E_{kin} = 2000\ J$
   Ball $E_{kin} = 100\ J$
   Sprinter $E_{kin} = 4500\ J$
4. a) $W_{Beschl.} = 40\ kJ$
5. $W = 160\ kJ$

Register

Ablenksystem 69f.
Anode 69f.
Anstieg 100, 103, 108
Arbeit, mechanische 32, 144
Aristoteles 114, 123, 128
Augenblicksgeschwindigkeit 95ff., 119

Bahn, ballistische 118
–, gekrümmte 99f., 102, 119
–, gerade 99, 102, 119
Bahngeschwindigkeit 101f.
Basis 83, 85f.
Basisstromstärke 84ff.
Berechnen einer physikalischen Größe 152f.
Beschleunigung 104ff., 110, 114, 119f., 132, 134, 138
Beschleunigungsarbeit 147f.
Bewegung, gleichförmige 98f., 102f., 119, 137, 143
–, gleichmäßig beschleunigte 105f., 110f., 119, 131, 138, 143
–, gleichmäßig verzögerte (Bremsen) 108, 110, 112
–, mechanische 93
Bewegungsart 143
Bezugsebene 146
Bezugskörper 93, 147
Blitz 68

Copernicus, Nicolaus 92
Coulomb (Einheit) 8f.

Dauermagnet 13f., 18f., 23, 27
Defektelektron 79f.
Diagramm, *a-F-* 132
–. *a-m-* 132
–, *I-ϑ-* 76
–, *s-t-* 99, 103, 109f.
–, *v-t-* 99, 103, 106ff., 110, 112
Dissoziation 60
Dotieren 79
Drehbewegung 140
Durchlaßrichtung 82f., 85
Durchschnittsgeschwindigkeit 95f., 119
Dynamik 92, 123

Edison, Thomas Alva 65
Effektivwerte von Wechselspannung und -stromstärke 38
Eigenerwärmung 75
Elektrode 64, 68
Elektromagnet 13, 18, 20f., 27f., 33, 39, 45, 47
Elektromagnetische Induktion 25ff., 32, 34, 49
Elektromotor 21f.
Elektronen 60, 67ff., 72, 79f.
Elektronenmangel 7ff.
Elektronenstrahlen 69ff.
Elektronenstrahlröhre 69f.
Elektronenüberschuß 7ff.
Elektroöfen 68
Elektroschweißen 68
Elementarladung 9
Emission 64, 66, 72
Emitter 83, 85f.
Emitterschaltung 83
Energie, des elektrischen Feldes 10
–, des magnetischen Feldes 16
–, elektrische 32, 38, 44, 46, 60ff., 153
–, Gesetz von der Erhaltung der 32f., 44, 150f., 154
–, kinetische 32, 62, 144, 147f., 150ff.
–, mechanische 32, 38, 144, 150ff.
–, Nutzbarkeit der 153
–, potentielle 144, 146f., 150ff.
–, thermische 44, 46, 62, 153
Erklären eines Vorganges 136, 151
Erregerstromstärke 20, 28, 30

Fallbeschleunigung 115f.
Fall, freier 114f., 137
Fallgeschwindigkeit 114f.
Fallweg 115
Faraday, Michael 34
Fehler 55ff.
Feld, elektrisches 7, 9f., 23, 34, 60ff., 66ff., 80f.
–, homogenes 11f.
–, inhomogenes 11f.
–. magnetisches 13, 15, 18, 23, 28ff., 44ff., 70
–, statisches 6
Feldlinienbild 10ff., 17f., 23, 27, 36
Fernsehbildröhre 71f.
Ferromagnetische Stoffe 14, 16
Fotoemission 65f., 68, 72
Fotowiderstand 77f.
Fremderwärmung 75
Frequenz 37

Galilei, Galileo 114f., 128
Gase 63ff., 72
Gasmoleküle 67
Generator 35, 45
Gesamtwiderstand 53
Geschwindigkeit 94, 97ff., 103ff., 119f., 143
Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz, freier Fall 116
–, gleichmäßig beschleunigte Bewegung 106, 110, 120
Gewichtskraft 126, 136f., 146, 148
Gleichrichtung 82
Gleichstrommotor 21f.
Glimmlampe 67
Glühemission 64f., 68, 72
Goldene Regel der Mechanik 145
Größe, gerichtete (vektorielle) 96, 124

Halbleiter 73ff., 77ff.
–, n-leitend 78ff.
–, p-leitend 78ff.
Halbleiterdiode 81f.
Halbleiterwiderstandsthermometer 76
Heißleiter 74, 78
Herleiten eines Gesetzes 152
Hertz (Einheit) 37
Hochspannungstransformator 45
Hubarbeit 145f.
Hufeisenmagnet 14

Induktionsgesetz 26, 33
Induktionsspannung 27, 29f., 33, 36, 45
Induktionsspule 45
Induktionsstrom 32f.
Innenpolmaschine 38f.
Interpretieren, von Diagrammen 76
–, von Gleichungen 100
Ionen 60f., 67, 72
Ionisation 63f., 66, 72
Isolator 73

Joule (Einheit) 144

Kaltleiter 74f.
Katode 64, 69f.
Kinematik 92
Klingel 20
Kohlebürsten 21f.
Kollektor, am Motor 21f.
–, am Transistor 83, 85f.
Kollektorstromstärke 84ff.
Kondensator 8, 10, 63
Kraft 124f., 127ff., 134ff., 143
Kräfteparallelogramm 125
Kreisbewegung, gleichförmige 100ff., 139, 143
Kurvenfahrt 141

Ladung, elektrische 7ff.
Ladungsausgleich 8
Ladungstrennung 7
Ladungsträger, wanderungsfähige 61ff., 72, 74f., 77, 79, 82, 85
Lastenhebemagnet 20
Leiter, elektrische 14, 73
Leitfähigkeit 73, 78
Leitungsvorgang, elektrischer 52, 61f.
–, im Vakuum 63, 68, 72, 87
–, in Flüssigkeiten 60, 87
–, in Gasen 63, 66f., 72, 87
–, in Halbleitern 73, 87
–, in Metallen 60, 87
Lenzsches Gesetz 32, 47
Leuchterscheinung 67
Licht, Einfluß von 77f.
Lichtquellen 67f.
Lichtschranke 77f., 95
Loch 79f.
Luftkissenbahn 106, 109, 127, 129, 132
Luftwiderstand 114f.,118

Magnet 13f., 27ff.
–, Dauer- 13f., 18f., 23, 27
–, Hufeisen- 14
–, keramischer 16
–, Stab- 15, 18f.
Magnetfeld der Erde 18
Magnetnadel 15, 18, 23
Masse 94, 132, 138, 140
Massepunkt 94, 97
Maßstab 124
Meßfehler 56
Mikroelektronik 87
Mittelwert 106, 109
Modell 11, 94
Momentanwert der Wechselspannung und -stromstärke 37

Newton, Isaac 123, 137f.
Newton (Einheit) 134
Newtonsches Grundgesetz der Dynamik 132ff.

Ohmsches Gesetz 59
Ortsabhängigkeit, der Fallbeschleunigung 116
–, der Gewichtskraft 136
Oszillograph 37f., 70

Parabel 109
Parallelschaltung 53
p-n-Übergang 81ff., 85
Polarität 36
Primärspannung 46
Primärspule 40, 44ff.
Primärstromstärke 42f.

Radialkraft 139ff.
Reibungskraft 124, 130
Reihenschaltung 53
Relais 20
Relativität der Bewegung 93
resultierende Bewegung 116f.
resultierende Kraft 125ff.
Rotor 39
Ruhe 93

Schalter 85
Schaltkreis, integrierter 87
Schwerelosigkeit 137
Sekundärspannung 40, 42
Sekundärspule 40, 44ff.
Sekundärstromstärke 42
Selbstinduktion 48f.
Sicherheitsgurt 136
Silizium 73, 79, 81, 86
Spannung 27f., 30, 33, 48f., 53
Spannungsübersetzung 40, 45
Spannungsverteilung 54f.
Sperrichtung 82f.
Spule 18ff., 27ff., 35ff., 48f.
Stabmagnet 15, 18f.
Stator 39
Steuerung 70
Stromkreis, unverzweigter 53f., 59
–, verzweigter 53, 59
Stromstärkeübersetzung 42, 45
Stromverstärkung 86
Stoßionisation 64, 66

Tachometer 95
Temperaturabhängigkeit 74f., 78
Thermistor 74
Trägheitsgesetz 128ff., 134, 136
Transformator 39ff., 45f.
–, idealer 40f.
–, realer 44
Transistor, npn 82ff.

Überlagerung von Bewegungen 116f.
Umlaufzeit 101, 140f.

Vakuum 63ff., 69, 72
Verstärker 85

Wärme, Beeinflussung durch 78
Wäscheschleuder 141
Wasserkraftwerk 144, 146
Wechselspannung 35ff.
Wechselstromgenerator 35, 38f.
Wechselstromstärke 37ff.
Wechselwirkung 62, 67, 72
Wechselwirkungsgesetz 127f., 130, 136
Weg 118
Weg-Zeit-Gesetz, freier Fall 116
–, gleichförmige Bewegung 98f., 103, 120
–, gleichmäßig beschleunigte Bewegung 108ff., 120
Wehneltzylinder 69f.
Weicheisen 16
Widerstand, elektrischer 54ff., 62, 74f., 77f.
Widerstandsgesetz 59
Windungsanzahl 30f., 33, 40ff., 46
Wirbelstrom 46, 47, 49
Wirkungsgrad 44
Wurf, schräger 117f.
Wurf, waagerechter 117

Zeit 188
Zerlegen einer Kraft 126
Zusammensetzen von Kräften 125
Zündspule 45

Einige Beschleunigungen im Verkehrswesen

Anfahrvorgänge	Beschleunigung in $m \cdot s^{-2}$
Güterzug	0,08
Personenzug	0,12
Berliner S-Bahn	0,55
Tatra-Straßenbahn	1,2
Pkw Wartburg	1,5
Personenaufzug	1

Bremsvorgänge	Beschleunigung in $m \cdot s^{-2}$
Mokick auf trockener Straße	7
Mokick auf nasser Straße	5
Mokick auf schmieriger Straße	3
Mokick bei Glatteis	1
Personenaufzug im Normalfall	1
Personenaufzug bei Notfall	18

Durchschnitts- und Höchstgeschwindigkeiten in Natur und Technik

Beispiel	Durchschnittsgeschwindigkeit in $km \cdot h^{-1}$	Höchstgeschwindigkeit in $km \cdot h^{-1}$
Verkehrsflugzeug	800	1000
Schnellzug	70	120
Pkw auf Autobahn	85	100
Mokick	40	60
Schwalbe		120
Rennpferd		90
Mensch		36

Kurzwort: 020910 Lehrb. Physik Kl 9
Schulpreis DDR: 2,20
ISBN 3-06-020910-3