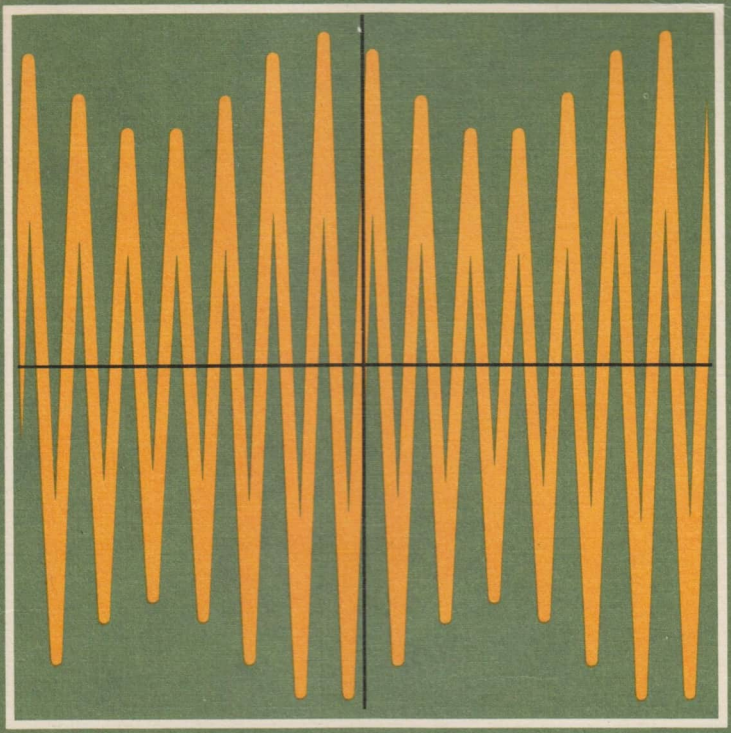


PHYSIK 10

Galileo Galilei

geboren am 15. 2. 1564 in Pisa, verstorben am 8. 1. 1642 bei Florenz; Wegbereiter der Experimentalphysik; baute ein astronomisches Fernrohr mit dreißigfacher Vergrößerung; untersuchte als erster experimentell den freien Fall.

Charles Augustin Coulomb

geboren am 11. 6. 1736 in Angoulême, verstorben am 23. 8. 1806 in Paris; konstruierte die Torsionswaage; untersuchte die Elastizität und Torsionskraft von Metallfäden; entdeckte 1785 das elektrische Grundgesetz; untersuchte den Magnetismus.

Johannes Kepler

geboren am 27. 12. 1571 in Weil, verstorben am 15. 11. 1630 in Regensburg; formulierte die Planetengesetze; berechnete die Bahn des Planeten Mars; verbesserte das Kopernikanische Weltsystem durch Nachweis elliptischer Planetenumlaufbahnen.

André Marie Ampère

geboren am 22. 1. 1775 in Lyon, verstorben am 10. 6. 1836 in Marseille; Begründer der Elektrodynamik; entdeckte die Wirkung von stromdurchflossenen Leitern aufeinander; führte die Begriffe Spannung und Strom (heute Stromstärke) ein.

Christian Huygens

geboren am 14. 4. 1629 in Den Haag, verstorben am 8. 7. 1695 in Den Haag; untersuchte die Pendelschwingungen; schuf eine Theorie der Wellenlehre und die Modellvorstellung von den Elementarwellen.

Georg Simon Ohm

geboren am 16. 3. 1789 in Erlangen, verstorben am 7. 7. 1854 in München; entdeckte 1826 als Gymnasiallehrer das Grundgesetz des Gleichstromkreises und machte damit den Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand deutlich.

Isaak Newton

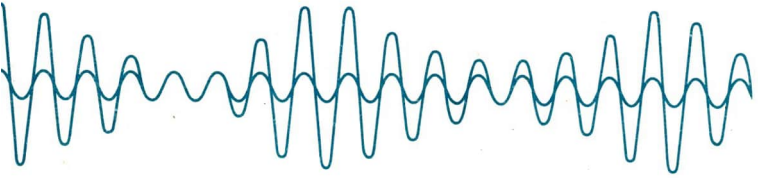
geboren am 4. 1. 1643 in Woolsthorpe, verstorben am 31. 3. 1727 in Kensington; entdeckte die Zusammensetzung des weißen Lichtes; erkannte die drei Grundgesetze der Mechanik; er stellte die Stoßgesetze auf; konstruierte ein Spiegelteleskop.

Michael Faraday

geboren am 22. 9. 1791 in London, verstorben am 25. 8. 1867 in Hampton Court; begründete die Lehre von den elektrischen und magnetischen Feldern; schuf die Modellvorstellung von den Feldlinien; entdeckte die elektromagnetische Induktion.

PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 10



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1985

Autoren:
Werner Damm (Kernphysik)
Günter Meyer (Schwingungen)
Ernst Neumann (Schwingungen)
Werner Golm (Mechanische Wellen)
Dr. Rudolf Plötz (Lichtwellen)
Bernhard Anders (Hertzsche Wellen)
Hubert Buscherowsky (Schülerexperiment S 1)
Eberhard Eichler (Schülerexperimente S 2, S 3, S 4)
Helmut Roth (Schülerexperimente S 5, S 6)
Redaktion: Werner Golm, Günter Meyer

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt

15. Auflage
Ausgabe 1970
Lizenz-Nr. 203 · 1000/84 (UN 02 10 03-15) VWV 26/84
LSV 0681
Einband und Vorsatz: Manfred Behrendt
Technische Illustrationen: Heinrich Linkwitz
Illustrationen: Fritz Hampel
Typographische Gestaltung: Manfred Behrendt
Printed in the German Democratic Republic
Schrift: Gill-Grotesk
Gesamtherstellung:
Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden
Redaktionsschluß: 10. 10. 1984
Bestell-Nr. 730 448 2
Schulpreis DDR: 2,70

Inhalt

Kernphysik

Atombau — Elementarteilchen 6
Stabile Atomkerne 14
Veränderungen von Atomkernen 19
Entwicklung und Bedeutung der Atomphysik 37

Schwingungen

Mechanische Schwingungen 44
Elektromagnetische Schwingungen 61

Wellen

Mechanische Wellen 96
Lichtwellen 108
Hertzsche Wellen 128
Röntgenstrahlung 145

Aufgaben

Fragen, Aufträge, Versuche 154
Schülerexperimente 164

Anhang

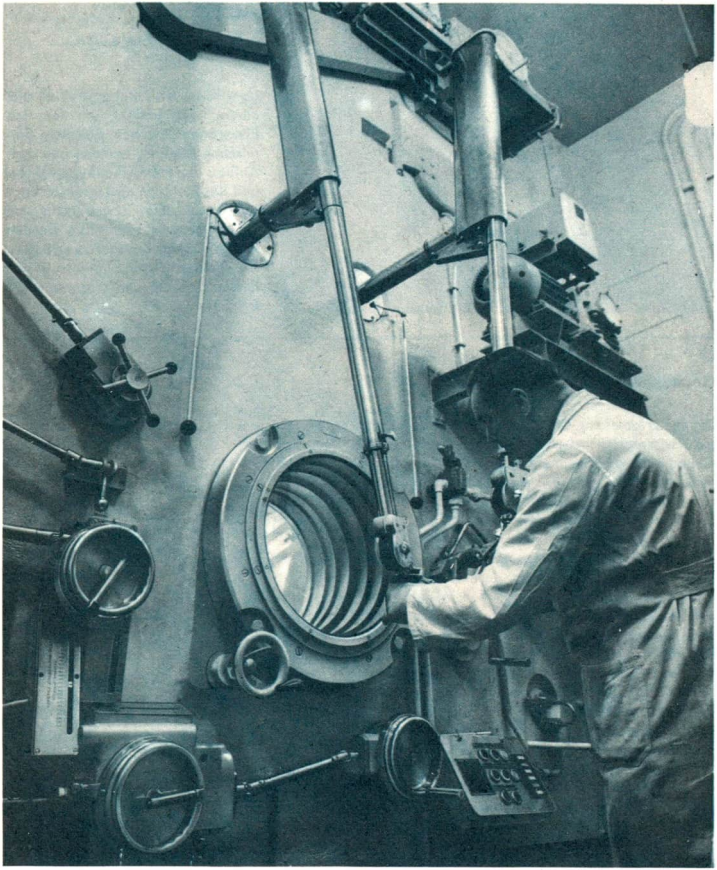
Lösungen 173
Register 174

Im Lehrbuch verwendete Symbole

▼ Experimente
▶ Merksätze
■ Beispiele
● Fragen
✳ Zur Information ✳
↗ siehe

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

Im Abschnitt Aufgaben sind die Nummern der Fragen und Aufträge
farbig gedruckt,
für die eine Lösung angegeben ist.



Kernphysik

Atombau Elementarteilchen

Vom Atom ist bekannt, daß es aus einem Kern besteht, um den sich Elektronen bewegen. Beispiele chemischer Bindung wurden aus dem Aufbau der Elektronenhülle erklärt und das Elektron als Ladungsträger untersucht. Zur Erweiterung der Kenntnisse über das Atom werden einige wichtige Ergebnisse erläutert, die von den Wissenschaftlern in den letzten Jahrzehnten zusammengetragen wurden.

Grundsätzliches zum Atommodell

Bei der Erforschung des Atombaus wird die Art und Weise der naturwissenschaftlichen Forschungsarbeit deutlich: Auf der Grundlage vorliegender experimenteller Ergebnisse wird eine Hypothese, eine wissenschaftlich begründete Vermutung, aufgestellt. Der Nachweis für die Richtigkeit der Hypothese erfolgt durch gezielt durchgeführte, neue Experimente, deren Ergebnisse gedeutet und verallgemeinert werden. Das Untersuchungsobjekt Atom kann durch Beobachtung nicht unmittelbar erfaßt werden; deshalb ist es notwendig, mit einem der Forschung zugänglichen Modell vom Atombau zu arbeiten. Das *Modell* ist einfacher und übersichtlicher als das Untersuchungsobjekt und gibt nur wesentliche Merkmale des Atombaus wieder. Es vertritt bei der Erkenntnisgewinnung das reale Objekt Atom. Das Modell vom Atom hat in den letzten Jahrzehnten entsprechend dem sich ständig erweiternden Erkenntnisstand schon mehrfach eine Präzisierung erfahren. Dadurch werden die experimentellen Befunde verständlich. Aus dem so durch Abstraktion gewonnenen Abbild von der objektiven Realität, das mit ihr nicht identisch ist und jeweils nur einige wesentliche Sachverhalte des Atoms richtig wiedergibt, zieht man Schlußfolgerungen über das Verhalten der Atome bei weiteren Versuchen. Je nach deren Ergebnissen gelangt man zu einer Bestätigung oder Änderung des Modells. Mit fortschreitender Erkenntnis ersetzt man das einmal entwickelte Modell durch ein anderes, die gegenwärtigen Erfahrungen besser widerspiegelndes Modell. Die Vorstellungen vom Bau der Atome werden so durch zielstrebige Forschungsarbeit immer präziser und umfassender. Die Modelle stellen eine wertvolle Hilfe auf diesem Wege „der ewigen unendlichen Annäherung des Denkens an das Objekt" (LENIN) dar.

Aufbau des Atoms

Erste Kenntnisse über den Atombau vermittelte der Physikunterricht in Klasse 6. Der Chemieunterricht in Klasse 7 erweiterte diese Kenntnisse und entwickelte in Klasse 8 eine Modellvorstellung vom Aufbau der Atome.

Wiederholen Sie die Kenntnisse vom Aufbau der Stoffe aus Atomen und vom Bau der Atome (↗Chemie in Übersichten)!

Zur Erforschung des Atominneren verwendeten die Physiker zweifach positiv geladene Helium-Ionen. Als Ergebnis fand man, daß die Helium-Ionen beim Durchdringen durch Tausende von Atomschichten einer Metallfolie kaum abgelenkt werden, gelegentlich aber stärkste Ablenkung erfahren. Als Hypothese kann man formulieren: Die überwiegende Masse des Atoms ist in einem sehr kleinen Atomkern mit einem Durchmesser von etwa 10^{-14} m vereinigt. Die Ablenkungen sind auf die Abstoßung der positiven Helium-Ionen durch den positiv geladenen Atomkern zurückzuführen.

Aus solchen Beobachtungen entwarf man das aus dem Chemieunterricht der Klasse 8 bekannte *Modell* vom Atomaufbau (Bilder 7/2 und 7/3):

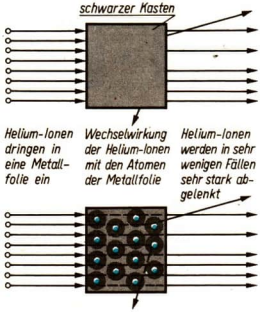


Bild 7/1 Ablenkung von Helium-Ionen beim Durchgang durch Atome

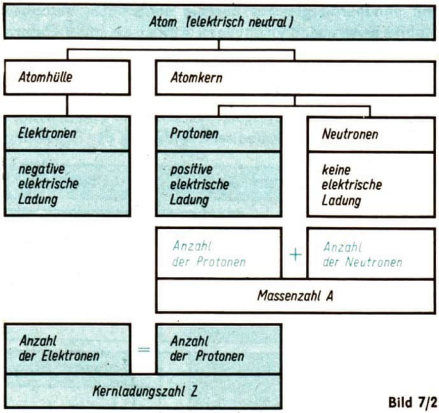


Bild 7/2

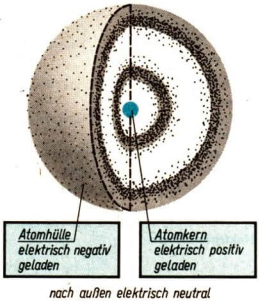


Bild 7/3 Atommodell

Der Durchmesser des Atoms beträgt etwa 10^{-10} m. Das Atom besteht aus einem positiv geladenen Atomkern und aus den negativ geladenen Elektronen, die in ihrer Gesamt-

heit die Atomhülle bilden. Der Atomkern enthält fast die gesamte Masse des Atoms. Sein Durchmesser beträgt etwa 10^{-15} m bis 10^{-14} m. Die Träger der positiven Ladung im Kern sind die Protonen. Die Anzahl der Protonen Z ist gleich der Anzahl der Elektronen in der Atomhülle. Das Atom wirkt nach außen hin elektrisch neutral.

Die Atomhülle. In der Atomhülle bewegen sich die negativ geladenen Elektronen mit großer Geschwindigkeit um den Atomkern. In bestimmten Räumen der Atomhülle sind die Elektronen am häufigsten anzutreffen. Man stellt diese Räume größter Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen im Modell als Elektronenschalen dar. Das Modell gibt vom Atom ausgewählte, wesentliche Eigenschaften der Atomhülle vereinfacht wieder. Es berücksichtigt die komplizierte Bewegung, den Aufenthaltsraum der Elektronen und die Energieverhältnisse in der Atomhülle (Bild 8/2).

- *Wiederholen Sie die aus dem Chemieunterricht der Klasse 8 bekannten Zusammenhänge zwischen dem Atombau und dem Periodensystem der Elemente (↗ Chemie in Übersichten)!*

In Elektronenschalen faßt man Elektronen mit annähernd gleicher Energie zusammen, die modellhaft in einem Energieniveauschema dargestellt werden. Jede der Elektronenschalen kann nur eine bestimmte Anzahl Elektronen mit annähernd gleicher Energie aufnehmen. Besonders stabile Elektronenanordnungen weisen die mit 8 Elektronen aufgefüllten Achterschalen auf. Die äußerste von Elektronen gebildete Schale heißt Außenschale. Die Anzahl der Außenelektronen ändert sich bei Hauptgruppenelementen periodisch. Der periodischen Änderung im Bau der Atomhülle entspricht die periodische Änderung der Eigenschaf-

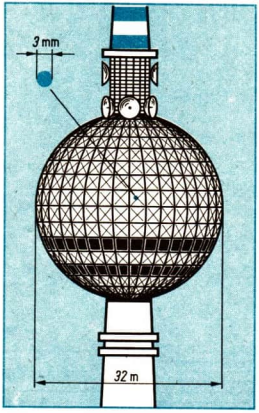


Bild 8/1 Größenvergleich zwischen Atomhülle und Atomkern am Beispiel der Kugel des Berliner Fernsehturms und einer Perle (⌀ = 3 mm)

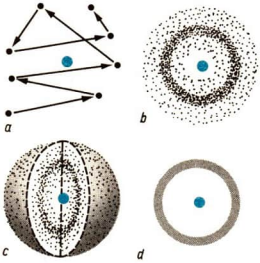


Bild 8/2 Das Modell des Wasserstoffatoms
a) Einzelaufnahme von Atomkern und Elektron
b) ebene Darstellung vieler übereinanderkopierter Einzelaufnahmen
c) kugelförmiges Modell eines Wasserstoffatoms
d) vereinfachte ebene Darstellung der Elektronenschale

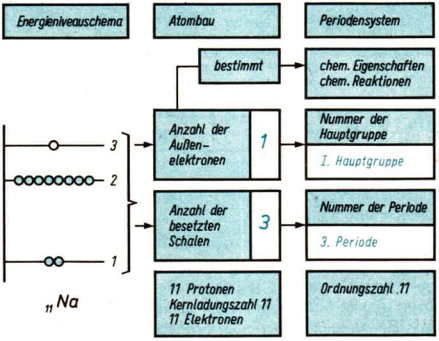


Bild 8/3 Energieniveauschema der Atomhülle eines Natrium-Atoms

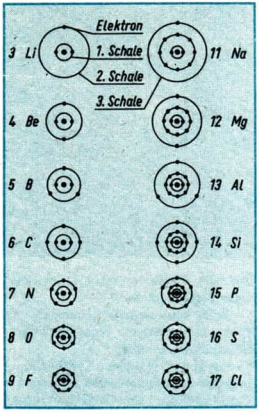


Bild 9/1 Der Schalenaufbau der Atome

ten der Elemente. Die Elektronen in einer noch aufnahmefähigen Außenschale spielen bei chemischen Reaktionen eine Rolle. Die meisten Atome erreichen bei chemischen Reaktionen durch Abgabe oder Aufnahme von Elektronen stabile Elektronenanordnungen ihrer Atomhülle.

Relative Atommasse. Die *absolute Atommasse* m_A gibt die Masse eines bestimmten Atoms in Kilogramm an. Sie ist außerordentlich klein und kann durch Wägung nicht ermittelt werden, sondern nur durch Berechnung auf der Grundlage von physikalischen Experimenten.

Wasserstoffatom: $m_A\,(H) = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Kohlenstoffatom: $m_A\,(C) = 19{,}9 \cdot 10^{-27}$ kg
Sauerstoffatom: $m_A\,(O) = 26{,}6 \cdot 10^{-27}$ kg

Die Masse eines Atoms setzt sich im wesentlichen aus der Masse der Protonen und Neutronen zusammen. Die verschwindend geringe Masse eines Elektrons (der 1836ste Teil der Masse des Protons) trägt zur Atommasse fast nichts bei.
In der Kernphysik gibt man die absolute Atommasse m_A in einer eigens dafür definierten *atomaren Masseneinheit* an: es ist der zwölfte Teil der Masse von $^{12}_{6}C$, und es gilt für die auf $^{12}_{6}C$ bezogene

atomare Masseneinheit	$1\,u = \frac{1}{12}\,m_A\,(^{12}_{6}C)$, (1) $1\,u = 1{,}660277 \cdot 10^{-27}$ kg

Dividiert man die Masse m_A eines beliebigen Atoms durch die atomare Masseneinheit, so erhält man die

relative Atommasse	$A_r = \frac{m_A}{u}$ (2)

Sie gibt an, wievielmal so groß die Masse eines beliebigen Atoms wie der zwölfte Teil der Masse von $^{12}_{6}C$ ist. Die relative Atommasse hat keine Einheit.
Im Atomkern befinden sich die positiv geladenen Protonen. Mit der Anzahl der Protonen im Atomkern ist die Anzahl der elektrischen Ladungen bestimmt. Sie wird Kernladungszahl Z genannt. Neben den Protonen sind als weitere Teilchen der Atomkerne experimentell Neutronen ermittelt worden. Das Neutron ist ohne elektrische Ladung. Addiert man alle Z Protonen und N Neutronen einer Atomart, so erhält man die *Massenzahl* A dieser Atomart.

Massenzahl	$A = Z + N$ (3)

Die Reihenfolge der Elemente im Periodensystem wird durch die Kernladungszahl ihrer Atome bestimmt. Da die 104 Elemente durch diese Zahl im Periodensystem geordnet werden, bezeichnet man sie als *Ordnungszahl*. Für das elektrisch neutrale Atom gilt:

> Ordnungszahl = Kernladungszahl = Protonenanzahl = Elektronenanzahl.

Man kennzeichnet jedes Element durch ein chemisches Symbol, dem links oben die Massenzahl A und links unten die Protonenanzahl Z als Index angefügt werden.

$^{A}_{Z}$ Elementsymbol

$^{4}_{2}$He: 2 Protonen, 2 Neutronen, 2 Elektronen

$^{12}_{6}$C: 6 Protonen, 6 Neutronen, 6 Elektronen

Elementarteilchen

Die Entwicklung der modernen Physik ist eng mit der Entwicklung der Elementarteilchenphysik verbunden. Durch sie werden mit der 1952 entwickelten Blasenkammer (Bilder 10/1 und 10/2) Erscheinungen erforscht, die wichtig für das Verständnis der Struktur der Elementarteilchen sind. Als wesentlichstes Ergebnis erkannte man, daß Elementarteilchen sich ineinander umwandeln können. Der Begriff *elementar* hat deshalb im Laufe der Zeit seine grundsätzliche Bedeutung eingebüßt. Er steht nicht mehr für unveränderlich und unteilbar.

Das Wort Atom bedeutet auf griechisch „nicht teilbar". Diese Bezeichnung ist heute nur noch gerechtfertigt in bezug auf das Atom als Träger der chemischen Eigenschaften der Elemente. Mit der Erforschung des Atombaus erkannte man jedoch immer deutlicher den komplizierten Bau des Atoms. Es wurden die Elementarteilchen als Bausteine der Atome gefunden (Elektronen, Protonen und Neutronen). Deshalb übertrug man zunächst die Vorstellung der Nichtteilbarkeit auf die Bestandteile der Atome. Die drei genannten Elementarteilchen waren zu Beginn des Jahres 1932 bekannt. Mit der Entdeckung des Neutrons lernte man eine wichtige Eigenschaft der Elementarteilchen kennen.

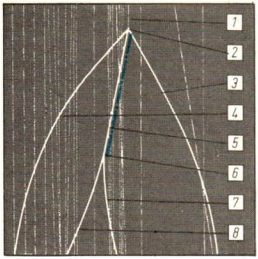
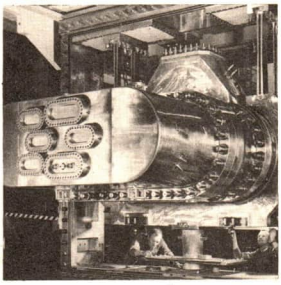


Bild 10/1 Elementarteilchenspuren in einer Blasenkammer
1 – Bahn eines negativ geladenen Teilchens in einer mit Wasserstoff gefüllten Blasenkammer
2 – das negativ geladene Teilchen erzeugt beim Zusammenstoß mit einem Wasserstoffatom ein positiv geladenes Teilchen (3), ein negativ geladenes Teilchen (4) und ungeladene Teilchen
3 – Bahn des positiv geladenen Teilchens
4 – Bahn des negativ geladenen Teilchens
5 – unsichtbare Bahn eines der ungeladenen Teilchen
6 – Spontanzerfall des ungeladenen Teilchens
7 – Bahn eines beim Spontanzerfall entstandenen negativen Teilchens
8 – Bahn eines beim Spontanzerfall entstandenen positiven Teilchens

Bild 10/2 Blasenkammer



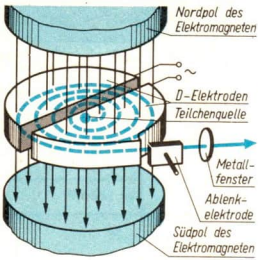


Bild 11/1 Zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten befinden sich in der Vakuumkammer zwei halbkreisförmige Metalldosen (D-Elektroden). Sie sind gegeneinander isoliert, durch einen Spalt getrennt und nach innen offen. Das anliegende elektrische Feld beschleunigt die in den Spalt eintretenden, geladenen Teilchen. Das starke Magnetfeld zwingt diese auf eine halbkreisförmige Bahn. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals. Durch das Feld der Ablenkelektrode werden die stark beschleunigten Teilchen herausgezogen und stehen für Experimente zur Verfügung

Sie sind in der Lage, sich in andere Teilchen umzuwandeln (↗ Seite 21, 22). Diese für die Mehrheit der Elementarteilchen charakteristische Eigenschaft führt zur Bildung neuer Teilchen.

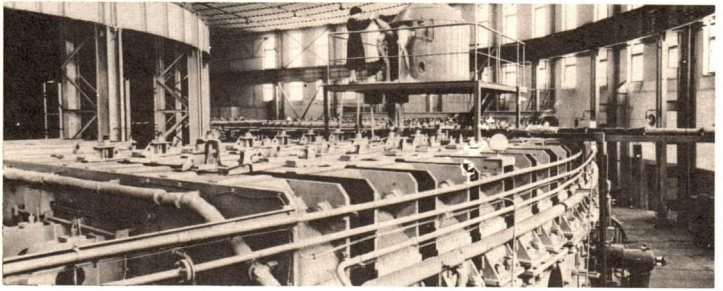
Zur Zeit arbeiten die Wissenschaftler an der weiteren Erforschung der Struktur der mehr als 200 bekannten Elementarteilchen. Die meisten von ihnen erzeugte man in Beschleunigern. In diesen Großgeräten werden geladene Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Beim Zusammenstoßen beeinflussen sich die Teilchen wechselseitig zum Teil so stark, daß eine Umwandlung in andere Teilchen erfolgt. Durch leistungsfähigere Beschleuniger untersucht man die Wechselwirkungen bei immer größeren Energien. Aus der Kenntnis aller Arten von Wechselwirkungen versuchen die Physiker eine Theorie der Elementarteilchen zu entwickeln, aus der die Existenz und die Eigenschaften der Elementarteilchen erklärbar sind. An dieser Theorie arbeiten seit Jahren die Physiker.

Teilchen höchster Energie kommen in der Natur in der aus dem Weltall stammenden kosmischen Strahlung vor. In dieser Strahlung entdeckte ANDERSON Ende des Jahres 1932 das Positron. Ein Jahr vorher hatte es DIRAC theoretisch vorhergesagt.

Dieses Beispiel ist kein Einzelfall. Es zeigt, wie eng Theorie und Experiment in der Physik miteinander verbunden sind.

Die Elementarteilchen besitzen charakteristische Eigenschaften. Dazu gehören die elektrische Ladung Q, die Masse und weitere Eigenschaften, die erst im Zusammenhang mit der Erforschung der Elementarteilchen entdeckt wurden und nicht auf bekannte Begriffe der klassischen Physik zurückgeführt werden können.

Bild 11/2 Synchrophasotron.
Eine der größten Anlagen ist das Synchrophasotron des Vereinigten Institutes für Kernforschung in Dubna (UdSSR), wo Wissenschaftler sozialistischer Länder vereint daran arbeiten, um die Gesetzmäßigkeiten bei Wechselwirkungen der Elementarteilchen zu erforschen



	Proton	Neutron	Elektron	Positron
Entdeckung durch	1886 GOLDSTEIN	1932 CHADWICK	1864 HITTORF	1932 ANDERSON
bei	Leuchterscheinungen in Gasentladungsröhren	Strahlungsuntersuchungen an Beryllium	Katodenstrahlexperimenten	Erforschung der Höhenstrahlung
Symbol	p	n	e^- oder β^-	e^+ oder β^+
Schreibweise	${}^{1}_{1}p$	${}^{1}_{0}n$	${}^{0}_{-1}e$	${}^{0}_{+1}e$
Masse (Teilchen in Ruhe)	$1{,}6725 \cdot 10^{-27}$ kg	$1{,}6748 \cdot 10^{-27}$ kg	$9{,}1091 \cdot 10^{-31}$ kg	$9{,}1091 \cdot 10^{-31}$ kg
Masse in atomaren Masseneinheiten	1,007 276 *u*	1,008 665 *u*	0,000 549 *u*	0,000 549 *u*
Ladung $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As	$Q_p = +e$	$Q_n = 0$	$Q_{e-} = -e$	$Q_{e+} = +e$
Teilchen wurden experimentell nachgewiesen	im Atomkern	im Atomkern	in der Elektronenhülle	in der Höhenstrahlung, beim Spontanzerfall

Nachweismethoden für Elementarteilchen

Zum Nachweis der Elementarteilchen wurden verschiedene Geräte entwickelt, deren Wirkungsweise auf dem physikalischen Vorgang der Ionisation beruht, der im Abschnitt Leitungsvorgänge in Gasen erläutert wurde (↗ Physik in Übersichten).

● *Beschreiben Sie den Vorgang der Ionisation!*

Von den möglichen Nachweismethoden für beschleunigte Elementarteilchen soll die *Arbeitsweise eines Zählrohres* mit Hilfe der Kenntnisse über die elektrischen Leitungsvorgänge in Gasen erklärt werden. Die anderen Nachweismethoden werden im Abschnitt über den Nachweis der radioaktiven Strahlung erläutert (↗ Seite 25).

Das Zählrohr. Das heute meist benutzte Nachweisgerät für Elementarteilchen ist das Geiger-Müller-Zählrohr (Bild 13/2). Es besteht aus einem dünnwandigen Metallrohr

Bild 12/1 Die besondere Aggressivität und das Streben der westdeutschen Bourgeoisie nach der Atombewaffnung ihrer Armee zwingt dazu, die Nationale Volksarmee der DDR mit entsprechenden Abwehrmitteln auszurüsten. Spezialtrupps in den Einheiten unserer NVA sind so zum Beispiel mit Such- und Meßgeräten ausgestattet, die die beim Einsatz von Kernwaffen auftretenden und durch ihre hohe Energie gefährlichen Elementarteilchen erkennen lassen

	Fotoplatte	Zählrohr	Nebelkammer	Blasenkammer
Nachweiswirkung durch	Erzeugung chemischer Strukturveränderungen in besonders präparierten Fotoplatten	Erzeugung von Ionen in Gasen, in denen ein äußeres elektrisches Feld besteht	Erzeugung von Ionen in einem durch Dampf übersättigten Gas	Erzeugung von Ionen in einer überhitzten Flüssigkeit

Bild 13/1 Übersicht über Nachweismethoden

oder einem mit einem Metallbelag versehenen Glasrohr (4), durch das axial ein dünner Draht gespannt ist. Das Rohr ist meist mit einem Gasgemisch aus Argon und Äthanol (manchmal auch mit Halogengasen) gefüllt.

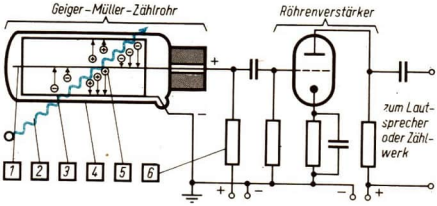


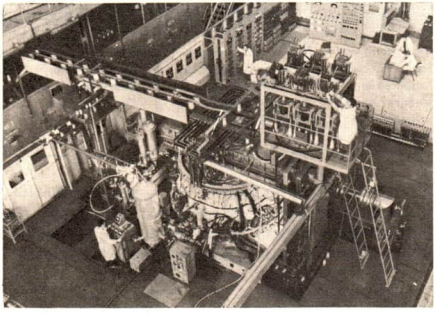
Bild 13/2 Zählrohr
1 – Innenelektrode (Anode)
2 – einfallendes Teilchen
3 – Katode
4 – Zählrohrkammer
5 – ionisierte Gasteilchen
6 – Arbeitswiderstand

Über den Arbeitswiderstand von etwa 10 MΩ legt man eine Gleichspannung von 450 V an ein Halogenzählrohr. Schaltet man über einen Kondensator von 5 nF die hochohmige Seite des Ausgangstransformators eines Lautsprechers in den Kreis, so hört man die von einfallenden Elementarteilchen erzeugten Stromstöße als Prasseln und Knacken im Lautsprecher.

Durch die zwischen Wand und Draht des Zählrohres angelegte Spannung herrscht im Innern des Glasrohres (4) ein starkes elektrisches Feld.

Jedes eintretende geladene Teilchen (2) ionisiert eine bestimmte Anzahl Atome (5) des Füllgases. Die durch Ionisation entstandenen Elektronen und Ionen werden im elektrischen Feld beschleunigt, stoßen mit weiteren neutralen Atomen zusammen und ionisieren auch diese (Stoßionisation). Sie lösen damit eine Elektronenlawine aus, die im Zählrohrkreis einen Stromstoß erzeugt, der am Arbeitswiderstand (6) einen Spannungsstoß bewirkt. Dieser Spannungsstoß wird in einem Zählwerk registriert.

Während im nichtionisierten Zustand der Kammer (4) die gesamte Spannung am Zählrohr anliegt, tritt bei der Entladung am Widerstand (6) ein Spannungsabfall auf. Die Spannung am Zählrohr sinkt, so daß dort die von dem eingetretenen Elementarteilchen ausgelöste Entladung erlischt.



Stabile Atomkerne

Der Aufbau der Atomkerne aus Kernteilchen ist seit langem bekannt. Die Freisetzung von Energie in der Sonne hat ihren Ursprung in dem Verhalten von Atomkernen bei sehr hohem Druck und sehr hoher Temperatur. Welche Wechselwirkungen aber dabei auftreten, wird gegenwärtig noch erforscht. Ein erster sichtbarer Erfolg dabei ist die in dem sowjetischen Reaktor TOKAMAK T 3 herbeigeführte gesteuerte thermonukleare Kernreaktion.

Kernaufbau

Obwohl der Atomkern in bezug auf wesentliche physikalische und chemische Eigenschaften als unteilbares Gebilde erscheint, erweist er sich bezüglich vieler Erscheinungen als ein zusammengesetztes Objekt.

- *Wiederholen Sie die Kenntnisse vom Aufbau der Atomkerne aus dem Chemieunterricht (↗ Chemie in Übersichten)!*

Neutronen und Protonen bilden einen Atomkern. In diesem Falle sind Protonen und Neutronen Objekte, die miteinander durch Beziehungen zu einem einheitlichen Ganzen, einem System verbunden sind. Man bezeichnet Protonen und Neutronen im Atomkern als Nukleonen.

Ein *Modell*, welches von den experimentell gesicherten Ergebnissen ausgeht und wesentliche Eigenschaften des Atomkerns richtig wiedergibt, ist das Tröpfchenmodell. Der Vergleich mit einem Flüssigkeitstropfen liegt nahe, denn in ihm werden die Moleküle auch durch Kräfte aneinander gebunden, die nur geringe Reichweite haben. Dieses Modell gestattet, einige Eigenschaften des Atomkerns zu beschreiben. Da es nicht möglich ist, alle Eigenschaften zu erfassen, verwendet man mehrere Modelle nebeneinander.

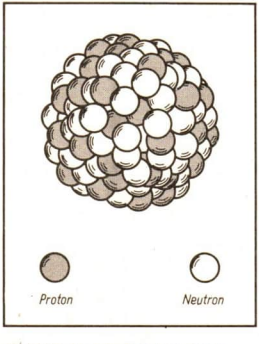


Bild 14/2 Modell eines Atomkerns
Als Elementarteilchen werden Protonen und Neutronen im Atomkern mit dem gemeinsamen Namen Nukleon bezeichnet. Bis auf den Wasserstoffkern, der nur aus einem Proton besteht, sind alle Atomkerne aus mehreren Nukleonen aufgebaut

Das Proton hat annähernd dieselbe Masse wie das Wasserstoffatom. Die relative Masse des Protons ist rund 1. Mit der Anzahl der Protonen im Atomkern ist die Anzahl seiner elektrisch positiven Ladungen bestimmt. Sie wird *Kern-*

ladungszahl Z genannt und stimmt mit der Ordnungszahl überein. Das Neutron hat wie das Proton ungefähr die relative Masse 1. Es ist aber ohne elektrische Ladung. Addiert man die gerundeten relativen Massen aller Z Protonen und N Neutronen einer Atomart, so erhält man die auf eine ganze Zahl gerundete relative Masse dieser Atomart, die als *Massenzahl* A bezeichnet wird.

Massenzahl	$A = Z + N$	(3)

Durch die Kernladungszahl Z und die Massenzahl A sind die beiden Haupteigenschaften des Atomkerns, seine Kernladung und seine Masse, bestimmt.

Teilchen bzw. Element	Symbol	Massenzahl A	Protonenanzahl Z	Neutronenanzahl N	Kernmasse bzw. Teilchenmasse	Schreibweise
Proton	p	1	1	0	1,007 276 u	$^{1}_{1}p$
Neutron	n	1	0	1	1,008 665 u	$^{1}_{0}n$
Helium	He	4	2	2	4,001 605 u	$^{4}_{2}He$
Stickstoff	N	14	7	7	13,999 231 u	$^{14}_{7}N$
Sauerstoff	O	16	8	8	15,990 523 u	$^{16}_{8}O$
Natrium	Na	23	11	12	22,983 73 u	$^{23}_{11}Na$
Kobalt	Co	59	27	32	58,918 37 u	$^{59}_{27}Co$
Jod	J	127	53	74	126,875 25 u	$^{127}_{53}J$
Uran	U	238	92	146	238,000 25 u	$^{238}_{92}U$

Bild 15/1 Aufbau der Atomkerne einiger Elemente (Stand: 1969)

Isotope Kerne. Die Atomkerne ein- und desselben chemischen Elements können die gleiche Anzahl von Protonen und verschieden viele Neutronen besitzen. Diese Atomkerne bezeichnet man als *isotope Kerne*, Atome mit isotopen Kernen werden als Isotope[1] bezeichnet.

Isotope Kerne sind Atomkerne, die bei gleicher Kernladungszahl (Ordnungszahl) durch ihre unterschiedliche Anzahl von Neutronen verschiedene Massenzahlen aufweisen.

[1] isos topos (griech.): gleicher Ort.

Da die chemischen Eigenschaften eines Atoms und seine Stellung im Periodensystem nur durch seine Ordnungszahl bestimmt werden, haben Isotope die gleichen chemischen Eigenschaften und stehen an der gleichen Stelle des Periodensystems. Sie unterscheiden sich aber in manchen physikalischen Eigenschaften (z. B. Kernmasse).
Von den 104 chemischen Elementen kennt man gegenwärtig etwa 1 400 isotope Kerne. Etwa 300 dieser isotopen Kerne erweisen sich gegenüber kleinen Störungen als unempfindlich. Diese beständigen Atomkerne nennt man *stabile Atomkerne.*
Die meisten Elemente bilden ein Gemisch von Isotopen *(Mischelemente),* deren natürliches festes Mischungsverhältnis durch Prozentzahlen angegeben wird und unabhängig vom Fundort das gleiche ist. Die natürliche Mischung hat eine durchschnittliche relative Atommasse, die im Periodensystem angegeben ist. Etwa 20 Elemente bestehen nur aus einem einzigen natürlichen Isotop *(Reinelement).*

Isotope	Z	A	N = A — Z	relative Atommasse A_r	Häufigkeit	Art des Elements
$^{35}_{17}Cl$	17	35	18	35,453	75,4% ($\approx 3/4$)	Mischelement
$^{37}_{17}Cl$	17	37	20		24,6% ($\approx 1/4$)	
$^{238}_{92}U$	92	238	146	238,03	99,274%	Mischelement
$^{235}_{92}U$	92	235	143		0,72%	
$^{234}_{92}U$	92	234	142		0,006%	
$^{23}_{11}Na$	11	23	12	22,9898	100%	Reinelement
$^{27}_{13}Al$	13	27	14	26,9815	100%	Reinelement
$^{31}_{15}P$	15	31	16	30,9738	100%	Reinelement

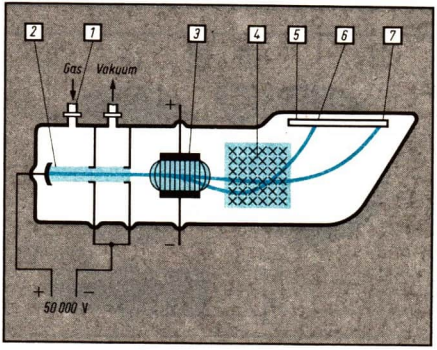
Bild 16/1 Isotope einiger Misch- und Reinelemente

Der natürliche Kohlenstoff enthält außer dem Isotop $^{12}_{6}C$ auch das Isotop $^{13}_{6}C$ in geringen Mengen. Für Kohlenstoff ergibt sich die relative Atommasse von 12,01115. Die zu vergleichenden Betrachtungen verwendete atomare Masseneinheit bezieht sich auf den zwölften Teil des Kohlenstoffisotops $^{12}_{6}C$ (Kern mit 6 Protonen und 6 Neutronen). Man

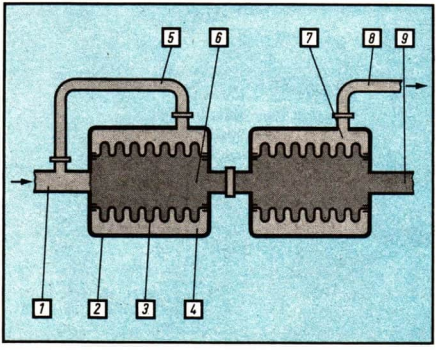
erhält dadurch für die relativen Atommassen Zahlen, die bei Reinelementen nur wenig von der Massenzahl abweichen.

Die Trennung der Isotope. Alle Isotopengemische lassen sich trennen. Zur Isotopentrennung gibt es verschiedene physikalische Verfahren, die auf den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Isotope beruhen. Die Trennverfahren haben besondere Bedeutung für die Gewinnung von reinem Kernbrennstoff ^{235}U.

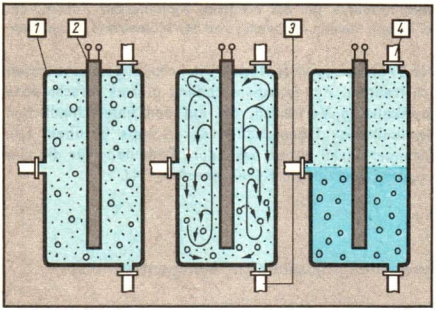
Anwendungsbeispiele zur Isotopentrennung



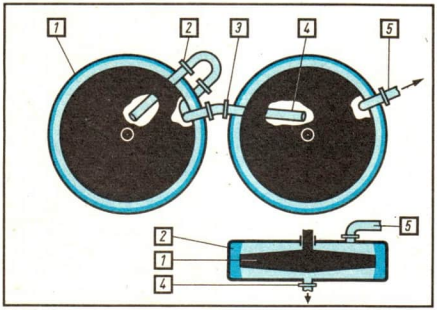
Massenspektrograf von ASTON. Der zu bestimmende Stoff (1) wird in den gasförmigen Zustand überführt und ionisiert. Die Ionen der verschiedenen Isotope werden in einem elektrischen Feld (2) beschleunigt und danach durch ein elektrisches (3) und ein magnetisches (4) Feld entsprechend ihrer unterschiedlichen Geschwindigkeit und Masse verschieden stark abgelenkt.
Alle Ionen gleicher Masse treffen im gleichen Punkt der fotografischen Platte (5) auf. So kann man die Isotopenarten [leichte (6) und schwere Isotope (7)] bestimmen. Aus der Menge der an den verschiedenen Punkten auftreffenden Ionen kann man die prozentuale Zusammensetzung bestimmen.



Stufendiffusion von HERTZ. Das zu trennende Isotopengemisch (1) aus dem gasförmigen Uranhexafluorid (UF_6) besteht aus den Isotopen ^{235}U und ^{238}U und wird durch Zellen (2) mit gasdurchlässigen Membranen (3) gepumpt. Die leichteren Isotope durchdringen die Membranen schneller als die schwereren Isotope, so daß im Raum (4) ein mit leichten Isotopen angereichertes Gas vorhanden ist. Es wird dem Diffusionsprozeß am Eingang wieder zugeführt (5). Im Raum (6) ist ein mit schwereren Isotopen angereichertes Gas vorhanden. Bei genügend vielen Diffusionsstufen kann in der Endphase im Raum (7) z. B. ^{235}U rein gewonnen werden (8), während im Raum (9) ^{238}U anlangt.



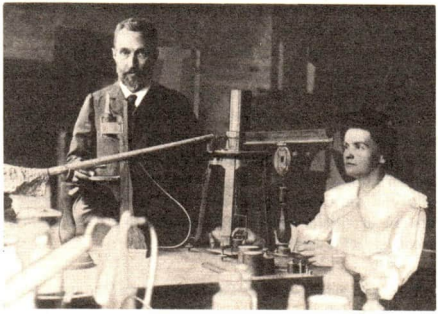
Thermodiffusion von CLUSIUS. Die leichteren Isotope eines Gasgemisches $^{238}U + ^{235}U$ sammeln sich infolge der Wärmeströmung in der Diffusionskammer (1) am Heizkörper (2) und steigen nach oben. Nach einer bestimmten Zeit ist die Trennung der Isotope so deutlich, daß eine Anreicherung des Gemisches im oberen Teil mit ^{235}U und im anderen Teil mit ^{238}U erfolgt ist. Über die Ableitungen (3) und (4) werden die angereicherten Gasgemische weiteren Diffusionsstufen zugeführt.



Gaszentrifuge von SCHULTZ. Das Gasgemisch $^{235}U + ^{238}U$ wird in einer Zentrifuge (1) in Drehbewegung versetzt. Infolge der wirkenden Radialkraft tritt eine Entmischung ein. Das mit schweren Isotopen angereicherte Gemisch kann bei (2) entnommen werden. Es wird der Zentrifugenreihe wieder zugeführt. Das mit ^{235}U angereicherte Gemisch wird bei (3) entnommen und der nächsten Zentrifuge bei (4) zugeführt. Es ist das bisher am schnellsten arbeitende Verfahren zur Gewinnung von ^{235}U (5), da es nicht von der den Isotopen eigenen Diffusionsgeschwindigkeit, sondern von den einwirkenden äußeren Kräften beeinflußt wird.

Isotopentransport. Radioaktive Isotope, vor Jahren noch ein unbekannter Begriff, spielen heute in der automatisierten Produktion, in der Medizin, in der Chemie und bei der Untersuchung biologischer Vorgänge eine große Rolle. Mit ihrer Hilfe können von sonst unzugänglichen Stellen auf Grund der ausgesandten Strahlen Signale übermittelt werden. Der Transport solcher radioaktiv strahlenden Stoffe zu den Verbrauchern erfolgt in Spezialbehältnissen und mit besonders gekennzeichneten Fahrzeugen.

Veränderungen von Atomkernen



Zu den wichtigsten physikalischen Erkenntnissen gehört die Entdekkung, daß Kerne sich ohne äußere Einwirkung umwandeln können. Einen besonderen Anteil an dieser Entdeckung hat das Forscherehepaar MARIE und PIERRE CURIE.

Spontanzerfall

Im Jahre 1896 hat HENRI BECQUEREL nachgewiesen, daß Uranverbindungen Strahlen aussenden, die auf fotografische Platten einwirken. Auch bei Thorium und Aktinium wurde die gleiche Eigenschaft entdeckt. 1898 konnte das Ehepaar CURIE aus Uranerz ein bis dahin unbekanntes Element aussondern, von dem eine sehr starke Strahlung ausgeht. Sie nannten es *Radium* (Ra), „das Strahlende", und die zunächst rätselhaften Vorgänge, die zur Strahlung führen, Radioaktivität.

Instabile Kerne. Betrachtet man die Kerne verschiedener Elemente, so stellt man fest, daß mit zunehmender Kernladungszahl die gegenseitige Abstoßung der Protonen wächst. Die Stabilität der Atomkerne nimmt ab. Es gibt neben den stabilen Kernen auch *instabile Kerne*. Zu diesen instabilen Kernen gehört die überwiegende Zahl der Kerne, deren Kernladungszahl größer als 82 ist.

Die instabilen Kerne zerfallen nach einer bestimmten Zeit ohne äußeren Anlaß und unabhängig von mechanischer, thermischer und anderer Beeinflussung von selbst in andere Atomkerne.

Die instabilen Kerne emittieren Teilchen mit unterschiedlicher kinetischer Energie. Die emittierten Teilchen stellen eine Form der radioaktiven Strahlung dar. Als Begleiterscheinung tritt häufig aus dem Kern eine besonders energiereiche Strahlung aus. Diese Form der radioaktiven Strahlung nennt man γ-Strahlung. Zur Bestimmung der beim Kernzerfall abgegebenen Energie fing man alle emit-

tierten Teilchen eines radioaktiven Präparates in einer Bleikapsel auf, die in einem Eiskalorimeter stand. Die in die Bleikapsel eindringenden Teilchen wurden abgebremst. Dabei wird die kinetische Energie in Wärme umgewandelt. So wurde die Energie als Wärme gemessen.
1 g $^{226}_{88}Ra$ liefert mit seinen Zerfallsprodukten in einer Stunde eine Wärme von etwa 100 cal. Über lange Zeiträume ergeben sich sehr hohe Werte, deshalb richtete sich die Forschung auf das Ziel, die Eigenschaften der Strahlung und die Gesetzmäßigkeiten des spontanen Kernzerfalls zu ermitteln. Folgende *Eigenschaften der radioaktiven Strahlung* stellte man fest:

1. *Durchdringungsvermögen.* Die radioaktive Strahlung wird beim Durchdringen verschiedener Stoffe mehr oder weniger geschwächt.
2. *Ionisierungsvermögen.* Die verschiedenen radioaktiven Strahlen weisen ein unterschiedliches Ionisierungsvermögen auf.
Das kann zur Folge haben:
„Belichtung" fotografischer Schichten;
Fluoreszenz in geeigneten Stoffen;
Trennung elektrischer Ladungen;
} Verwendung zum Nachweis
Beeinflussung chemischer Reaktionen;
Beeinflussung, Schädigung, Tötung lebender Organismen.

Bei der Untersuchung der beim Spontanzerfall emittierten Teilchen stellte man fest, daß es möglich ist, mit Hilfe starker Magnetfelder diese Strahlung in Komponenten zu zerlegen. Die emittierten α-, β^-- und β^+-Teilchen bezeichnet man als α-, β^-- und β^+-Strahlung. Die energiereiche Strahlung, die als Begleiterscheinung aus dem Kern auftritt, nannte man γ-Strahlung. Durch zahlreiche Experimente klärte man die Natur der radioaktiven Strahlenarten.

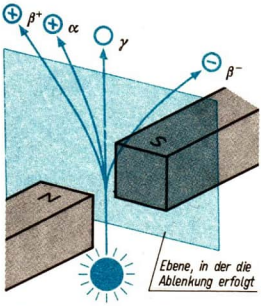


Bild 20/1 Aufspalten radioaktiver Strahlung durch ein Magnetfeld

Die Emission von α-Teilchen

Beim Spontanzerfall verändert der instabile Kern seinen Kernaufbau. Dabei wird Energie freigesetzt. Bei α-Teilchen ist es deren kinetische Energie, mit der sie vom Kern emittiert werden. α-Teilchen sind Atomkerne des Heliums. Sie bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen. Aus der Ablenkung im Magnetfeld errechnete man die relative Atommasse 4.

Bild 21/1 Aufnahme von emittierten α-Teilchen in einer Nebelkammer

α-Teilchen sind Heliumkerne.

Verläßt ein α-Teilchen den instabilen Kern, so entsteht ein Folgekern mit einer um 2 kleineren Kernladungszahl und einer um 4 Einheiten verringerten Massenzahl.

Beispiel: Spontanzerfall von Radium in Radon:

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\alpha \qquad \begin{array}{r} 226 = 222 + 4 \\ 88 = 86 + 2 \end{array}$$

allgemein:

$$^{A}_{Z}\ \text{Elementsymbol} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\ \text{Elementsymbol} + {}^{4}_{2}\alpha$$

Die Emission von β^--Teilchen

Elektronen sind im Atomkern nicht enthalten. Atomkerne mit einem relativen Neutronenüberschuß sind instabil. Der relative Neutronenüberschuß wird dadurch beseitigt, daß sich im instabilen Kern ein Neutron spontan in ein Proton umwandelt und gleichzeitig ein Elektron mit großer Geschwindigkeit emittiert wird.

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}\beta$$

β^--Teilchen sind schnelle Elektronen.

Bei Emission eines β^--Teilchens ändert sich die Massenzahl nicht, da die Masse des Elektrons nur 0,0005 der Protonenmasse beträgt. Die Kernladungszahl nimmt durch die innerhalb des instabilen Kerns erfolgte Umwandlung des Neutrons in ein Proton um 1 zu, da mit dem emittierten Elektron eine negative Ladungseinheit aus dem Kern entfernt wird.

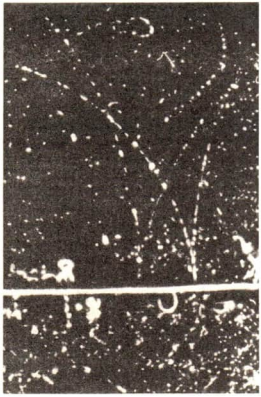
Beispiel: Spontanzerfall von Blei in Wismut:

$$^{214}_{82}\mathrm{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

allgemein:

$$^{A}_{Z}\ \text{Elementsymbol} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\ \text{Elementsymbol} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

Bild 21/2 Nebelkammeraufnahme der Teilchenspuren eines Elektrons und eines Positrons. Die Spur des Positrons verläuft nach rechts, die des Elektrons nach links. Die Nebelkammer befand sich in einem starken Magnetfeld



Die Emission von β^+-Teilchen

Bei Atomkernen mit einem relativen Protonenüberschuß beobachtet man β^+-Emission. Dabei wird Energie freigesetzt. Bei Positronen ist es deren kinetische Energie. Ein Positron wird emittiert, wenn sich ein Proton in ein Neutron umwandelt.

$^{1}_{1}p \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e$

Bei Aussendung des Positrons verringert sich die Kernladung um eine Einheit, die Kernmasse bleibt unverändert.

■ Beispiel:

$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}e$

allgemein:

$^{A}_{Z}$ Elementsymbol $\rightarrow$ $^{A}_{Z-1}$ Elementsymbol $+ ^{0}_{+1}e$

Die bei Emission von α- und β-Teilchen häufig auftretende energiereiche γ-Strahlung ändert die Massenzahl und Kernladungszahl nicht. Mit ihr ist kein Kernzerfall verbunden.

Alphastrahlen	Betastrahlen	Positronstrahlen	Gammastrahlen
$^{4}_{2}He$ oder α	$^{0}_{-1}e$ oder β^{-}	$^{0}_{+1}e$ oder β^{+}	γ
zweifach positiv geladene Heliumkerne	Elektronen	Positronen	energiereiche Strahlung, die als Begleiterscheinung bei Kernumwandlungen auftritt
Ablenkung durch magnetische und elektrische Felder			weder elektrisch noch magnetisch ablenkbar

Näherungsweise gilt für diese Strahlenarten bei gleicher Energie: $D_{\alpha} : D_{\beta} : D_{\gamma} = 1 : 100 : 10000$.

Näherungsweise gilt für diese Strahlenarten bei gleicher Energie: $I_{\alpha} : I_{\beta} : I_{\gamma} = 10000 : 100 : 1$.

Für den Menschen stellen die γ-Strahlen eine besondere Gefahr dar. Sie durchdringen alle Stellen des Körpers und verursachen besonders im Keimdrüsengewebe und den blutbildenden Organen schwere Schäden. Zur Schwächung des Durchdringungsvermögens verwendet man starke Betonwände, Bleiziegel oder Stahlplatten, deren notwendige Dicke von der Energie der γ-Strahlung abhängt (↗ Schutz vor radioaktiver Strahlung, S. 28).

Radioaktive Isotope. Außer den stabilen Isotopen gibt es in der Natur instabile radioaktive Isotope. Sie zeigen in ihren chemischen Eigenschaften gleiches Verhalten wie die zu dem betreffenden Element gehörenden stabilen Isotope. Aus radioaktiven Isotopen entstehen oft wieder radioaktive Isotope. Es ergibt sich eine Folge von Zerfällen, die bei einem stabilen Kern endet.

> Radioaktive Isotope sind instabile Atomkerne, die unter Aussendung von radioaktiver Strahlung mehr oder weniger schnell in stabile Kerne anderer Elemente zerfallen.

Die Halbwertzeit

Die in der Natur vorkommenden instabilen Kerne erschienen den Forschern anfangs in den möglichen Beobachtungszeiten unveränderlich zu sein. Das wäre ein Widerspruch zum Energieerhaltungssatz gewesen. Heute weiß man, daß beim Spontanzerfall die Energie der Atomkerne abnimmt, wenn Kernenergie frei wird (z. B. in Form von kinetischer Energie der emittierten Teilchen).
Genaue Untersuchungen ergaben, daß von einer bestimmten Anzahl instabiler Kerne in gleichen Zeitabständen immer der gleiche Anteil zerfällt, wobei Energie frei wird.

Von 1 g $^{226}_{88}$Radium existieren nach 1622 Jahren noch 0,5 g Radium; innerhalb der nächsten 1622 Jahre zerfällt von diesen 0,5 g Radium wiederum die Hälfte, also 0,25 g Radium.

> Die Zeit, in der jeweils die Hälfte der vorhandenen Atome eines radioaktiven Elements zerfällt, nennt man die Halbwertzeit.

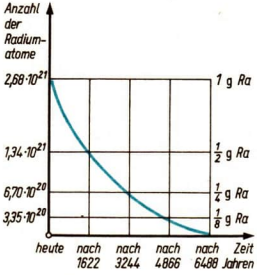


Bild 23/1 Radioaktiver Zerfall von 1 g $^{226}_{88}$Radium

Die Halbwertzeit ist eine charakteristische Größe für den radioaktiven Zerfall.
Beim Spontanzerfall ist eine große Anzahl von Atomen Gegenstand der Beobachtung. Ein Teil dieser Atome zerfällt in der nächsten Sekunde, ein anderer Teil im Laufe der nächsten Stunden oder erst nach Jahren. Wann ein bestimmtes, einzelnes Atom zerfällt, ist zufällig und kann nicht vorausgesagt werden. Wenn es aber zerfällt, so hat der Zerfall in jedem Fall seine Ursache, die durch die

Eigenschaften des Atoms und durch die objektiven Zusammenhänge aller Atome bedingt ist. Die Gesamtheit dieser Bedingungen ist aber nicht bis in alle Einzelheiten auflösbar. Das Gesamtverhalten einer sehr großen Anzahl von Atomen, welches unter den gegebenen Bedingungen notwendig verwirklicht wird, beschreibt ein *statistisches Gesetz.*

▶ Statistische Gesetze enthalten sichere Aussage über das Verhalten und die Eigenschaften einer sehr großen Anzahl von Objekten innerhalb einer bestimmten Anzahl von Möglichkeiten.

Statistische Gesetze sind genauso wie dynamische Gesetze erkennbar und gestatten Voraussagen bestimmter Vorgänge. Durch die Angabe der Halbwertzeit erfolgt die Voraussage, wann die Hälfte der Atome zerfallen ist.
Statistische Gesetze gelten nur für große Gesamtheiten von Objekten. Sie unterscheiden sich von dynamischen Gesetzen, wo auf Grund des Anfangszustandes und der äußeren Bedingungen eines einzelnen Objektes die folgenden Zustände desselben eindeutig und vollständig bestimmt sind (z. B. Bewegungsgleichungen der Mechanik).

● *Nennen Sie weitere Beispiele für das Wirken statistischer Gesetze (↗ Biologie, Klasse 10)!*

■ Aus der Menge der durch radioaktiven Zerfall entstandenen Elemente, die in Gesteinen mit radioaktiven Elementen enthalten sind, und der statistischen Erkenntnis, der Halbwertzeit, schließt man auf das Alter des Gesteins und damit auf das Alter der Formation, in der sich das Gestein befindet. Altersbestimmungen an älteren Gesteinen ergaben für die obersten Schichten der Erde etwa 2 Milliarden Jahre. Geologen und Archäologen bestätigten diese Altersangaben. Danach schätzt man das Alter der Erde auf etwa 4 Milliarden Jahre.

Element	Zahlenwert	Einheit
$^{234}_{92}U$	$2{,}52 \cdot 10^5$	Jahre
$^{230}_{90}Io$	$8 \cdot 10^4$	
$^{226}_{88}Ra$	$1{,}622 \cdot 10^3$	
$^{222}_{86}Rn$	3,825	Tage
$^{218}_{84}Ra\ A$	3,05	Minuten
$^{214}_{82}Ra\ B$	26,8	
$^{214}_{84}Ra\ C$	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	Sekunden

Tabelle 24/1 Halbwertzeiten einiger Elemente.

Der Nachweis der radioaktiven Strahlung

Mit dem Zählrohr (↗ S. 13) ist bereits ein Nachweisgerät für die radioaktive Strahlung beschrieben worden. Physikalische Grundlage der Wirkungsweise ist der Vorgang der Ionisation der Gase. Neben den am häufigsten verwendeten Zählrohren setzt man zum Nachweis der Kernstrahlung auch Fotoplatten und die Nebelkammer ein.

Die Kernspurplatte weist gegenüber den üblichen Fotoplatten einen stark erhöhten Silberbromidgehalt und ein extrem feines Korn auf. Schnell bewegte Teilchen hinterlassen beim Durchdringen der fotografischen Schicht Spuren, die bei der

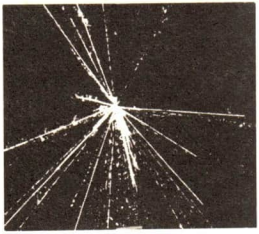


Bild 25/1 Fotoplatte mit Elementarteilchenspuren, die durch die Neutralisierung der Silberatome entstanden sind

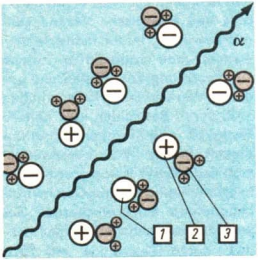


Bild 25/2 Ionen sind Kondensationskeime im Wasserdampf
1 negative Ionen
2 positive Ionen
3 Wassermoleküle (Dipole)

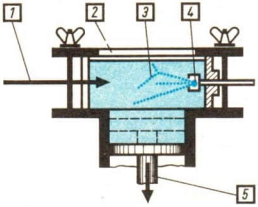


Bild 25/3 Nebelkammer nach WILSON
1 – Lichteinfall
2 – Beobachtungsfenster
3 – Nebelspuren
4 – radioaktives Präparat
5 – Kolben

Entwicklung der Platte sichtbar werden. Es ergeben sich ähnliche Bilder wie bei der Nebelkammer, nur sind diese wesentlich kleiner. Ihre Untersuchung erfolgt unter einem Mikroskop.

Die Nebelkammer. Der englische Physiker CH. T. R. WILSON (1869 bis 1959) beobachtete, daß Ionen als Kondensationskeime für Tröpfchen in übersättigten Dämpfen dienen können (Bild 25/2).
Er baute auf Grund dieser Erkenntnis 1912 eine Nebelkammer zum Sichtbarmachen der Bahnen elektrisch geladener Teilchen.
Die Übersättigung des Dampfes erreichte WILSON durch schnelle Ausdehnung der Luft, die mit Wasserdampf gesättigt war. Der räumliche Verlauf einfallender ionisierender Teilchen kann bei geeigneter Beleuchtung beobachtet und auch fotografiert werden.

Nachweis der Protonen. Freie, nicht im Atomkern gebundene Protonen mit großer Geschwindigkeit ionisieren (wie alle elektrisch geladenen Teilchen) längs ihrer Bahn die Gasatome. In der Nebelkammer wird ein Proton bei fehlendem elektrischen und magnetischen Feld durch die lange, dünne und geradlinige Spur ionisierter Gasatome erkennbar.

Nachweis der Neutronen. Die Neutronen vermögen Gase nicht zu ionisieren. Sie hinterlassen in der Nebelkammer keine Spur. Beim Durchdringen wasserstoffhaltiger Stoffe (Paraffin) trifft gelegentlich ein Neutron auf einen positiv geladenen Wasserstoffkern (↗ Bild 10/1). Dieser Wasserstoffkern übernimmt (wie beim Aufprall einer Stahlkugel auf eine gleich große ruhende) die kinetische Energie und fliegt als Proton davon. Das Proton ionisiert durch seine Ladung Gase und hinterläßt in der Nebelkammer oder Fotoplatte eine deutliche Spur.

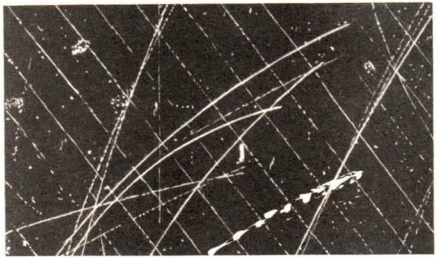
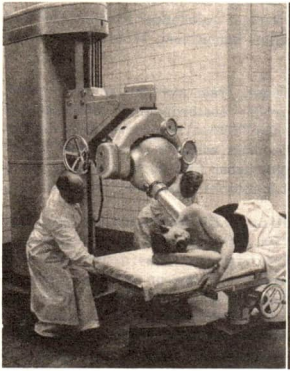


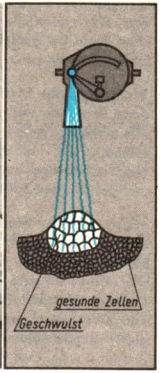
Bild 25/4 Nebelkammeraufnahme von Protonen, die aus wasserstoffhaltigem Gas durch auftreffende Neutronen ausgestoßen wurden. Man erkennt, daß die selbst nicht sichtbaren Neutronen von rechts oben in die in einem Magnetfeld stehende Nebelkammer eingefallen sind

Anwendungsbeispiele für radioaktive Isotope

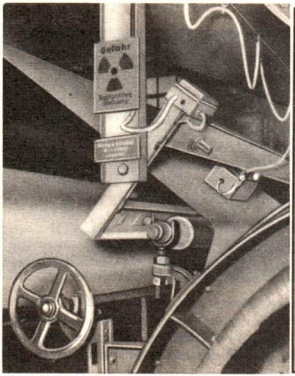
Radioaktive Isotope sind ohne Energiezufuhr strahlungsintensiv, fast ortsunabhängig einsetzbar und bedürfen außer dem Strahlenschutz keiner komplizierten, teuren Anlagen. Die hauptsächlichsten Anwendungsgebiete radioaktiver Isotope sind Medizin, Physik, Landwirtschaft, Werkstoffprüfung, Regel- und Meßtechnik.

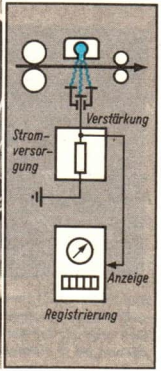
- *Berichten Sie über die Anwendung radioaktiver Isotope in Medizin, Landwirtschaft und Technik!*





Bestrahlungsverfahren. Die von radioaktiven Isotopen ausgesandten Strahlen können bei ihrer Absorption in Stoffen chemische, physikalische und biologische Veränderungen bewirken. In der Industrie verwendet man radioaktive Isotope zur Veredlung von Plasten und anderen Werkstoffen. Plaste erhalten z. B. durch Bestrahlen eine höhere Festigkeit und Temperaturbeständigkeit. In der Medizin verwendet man radioaktive Isotope zur Krankheitserkennung und zur Geschwulstbehandlung. Stark wuchernde Gewebe im menschlichen Körper werden durch Bestrahlen mit $^{60}_{27}Co$ wirksam bekämpft.





Durchstrahlungsverfahren. Auf Grund des Durchdringungsvermögens werden gammastrahlende Isotope bei der Prüfung auf verborgene Materialfehler in Gußteilen, Schweißverbindungen und Schmiedestücken verwendet. Weit verbreitet ist die mit Hilfe einer Strahlenquelle und einer Ionisationskammer durchgeführte berührungslose Dickenmessung von Folien.

Markierungsverfahren. Radioaktive Isotope eines Elementes setzt man ein, wenn der Weg dieses Elements im lebenden Organismus, in Stoffen oder in schwer zugänglichen Anlagen verfolgt werden soll. Mit Strahlungsmeßgeräten werden ihr Verhalten und ihre Ortsveränderung beobachtet. Der Verschleiß einzelner, mit radioaktiven Isotopen präparierter Maschinenteile kann so ohne Ausbau der Teile durch die radioaktive Strahlung der im Schmiermittel abgeführten Verschleißteilchen gemessen werden (Bild 27/1). In der Medizin wie auch in der biologischen Forschung ist dieses Verfahren geeignet, Stoffwechsel, Stofftransport und Stoffablagerung in lebenden Organismen zu beobachten (Bild 27/2).

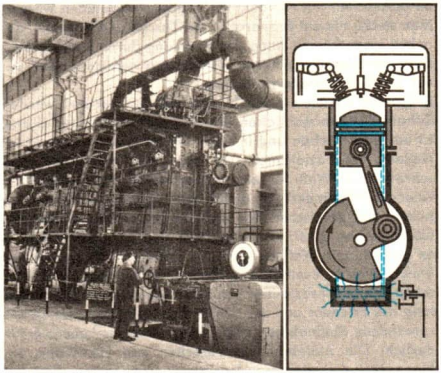


Bild 27/1

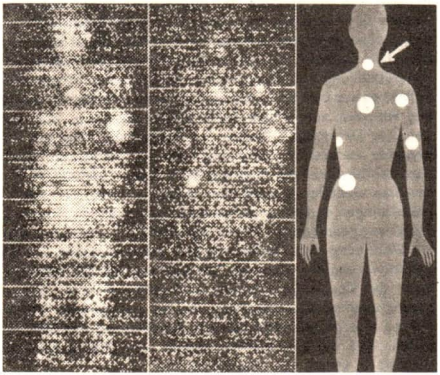


Bild 27/2

Schutz vor radioaktiver Strahlung

Schutz bei Experimenten. Radioaktive Strahlung aller Art kann durch ihre ionisierende Wirkung im menschlichen Organismus zu Schädigungen führen, die je nach der Dauer der Einwirkung, der Art der Strahlung und der betroffenen Organe unterschiedliche biologische Wirkungen zeigen. Die einzelnen Gewebe sind um so empfindlicher, je jünger sie sind. Vor allem geschädigt werden die Keimdrüsen und die blutbildenden Organe. Deshalb muß beim Umgang mit radioaktiven Isotopen die Strahlenschutzverordnung der DDR vom 18. Dezember 1969 beachtet werden.

Grundregel: Eine Gefährdung von Personen und Sachen muß beim Arbeiten mit radioaktiven Isotopen vermieden werden. Man stecke nie ein Präparat in die Tasche und bedenke, daß neben einer Abschirmung der Strahlung durch Bleiziegel der beste Strahlenschutz darin besteht, sich genügend weit von der Strahlenquelle fernzuhalten.

Präparate dürfen nie mit bloßen Händen berührt werden.

Schutz der menschlichen Gesellschaft. Der Imperialismus ist der gefährlichste und in jeder Situation ernstzunehmende Gegner des Sozialismus und des gesellschaftlichen Fortschritts in der Welt. An seinem aggressiven und räuberischen Charakter verändert sich nichts. Wenn der Imperialismus mit Mitteln des politischen und ökonomischen Drucks und der ideologischen Diversion seine Ziele nicht erreichen kann, ist er gewillt, mit Waffengewalt die geschichtlich notwendige Entwicklung zu beeinflussen. Deshalb sind neben dem politischen Kampf der sozialistischen Staatengemeinschaft zur Erhaltung des Friedens und zur Abschaffung der Kernwaffen entsprechende Maßnahmen zum Schutze unseres Lebens erforderlich. Die Atombombenverbrechen von Hiroshima und Nagasaki, die atomare Aufrüstung der imperialistischen Armeen und die Haltung der aggressiven imperialistischen Staaten zu Fragen des friedlichen Zusammenlebens zwingen uns, Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung zu ergreifen. Der zivile Selbstschutz unserer Republik umfaßt Maßnahmen zur Aufklärung und Warnung der Bevölkerung. Er gibt Verhaltensweisen zum Schutze gegen die energiereiche Strahlung und Hinweise zum Schutz gegen die bei der Detonation entstehende Druckwelle. Neben der Aufklärung über die entstehende radioaktive Strahlung und den möglichen Schutz wird die Bevölkerung über das Verhalten in radioaktiv verseuchten Gebieten belehrt. Das Anlegen wirksamer Schutzbekleidungen gegen herabrieselnden radioaktiven Staub und das Verwenden von Schutzmasken oder Behelfsmitteln gegen die Einatmung des Staubes werden genauso geübt wie die Entaktivierung der Kleidung. Bei Kenntnis der Wirkungsfaktoren der Kernwaffen können eine Reihe weiterer Schutzmaßnahmen eingesetzt werden, die bei genügender Vorbereitung und aktiver Mitarbeit der Bevölkerung die Garantie bieten, daß bei eventuellem Einsatz von Kernwaffen die Verluste so gering wie möglich bleiben.

Kernumwandlungen

Nachdem sich die Hypothese von den Kernumwandlungen bewährte, versuchte man durch auf den Kern auftreffende Teilchen Kernumwandlungen herbeizuführen. RUTHERFORD, dem das erstmalig gelang, glaubte bis zu seinem Tode nicht daran, daß die Kernumwandlung praktische Bedeutung erlangen könnte.

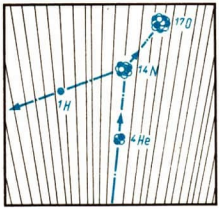


Bild 29/1 Nebelkammeraufnahme einer Kernumwandlung

Kernumwandlung durch α-Teilchen. Nähern sich Teilchen mit positiver Ladung und geringer kinetischer Energie einem Atomkern, so überwinden sie die elektrostatische Abstoßung der Kernladung nicht. Ist die kinetische Energie der positiv geladenen Teilchen groß, so überwinden sie diese Abstoßungskräfte, dringen in den Atomkern ein und lösen eine Kernumwandlung aus. Dadurch entsteht ein neuer Atomkern und Energie wird frei. Es ist die kinetische Energie der Teilchen, die bei der Umwandlung vom Kern emittiert werden. Der entstandene Kern kann stabil sein. In vielen Fällen ist er instabil und zerfällt unter Emission von Teilchen. Eine solche Kernumwandlung schreibt man wie eine chemische Reaktion auf. Auf der linken Seite stehen der ursprüngliche Kern und das in ihn eindringende Teilchen. Die rechte Seite enthält den umgewandelten Kern und das emittierte Teilchen. Nachfolgende Beispiele verdeutlichen diesen Sachverhalt.

Die erste künstliche Kernumwandlung gelang E. RUTHERFORD im Jahre 1919. Er ließ schnelle α-Teilchen, die von Radium mit einer Geschwindigkeit von fast 20000 km · s^{-1} ausgehen, auf Stickstoff auftreffen und konnte nachher Wasserstoffkerne (Protonen) nachweisen. RUTHERFORD gab dafür folgende Erklärung: Ein energiereiches α-Teilchen dringt in einen Stickstoffkern ein. Das dadurch entstandene Gebilde zerfällt sogleich in ein Proton und einen Rest, dessen Massenzahl und Kernladungszahl man errechnen kann, da die Summe der Massenzahlen und der Kernladungszahlen vor und nach der Reaktion gleich sein müssen. Der neue Kern ist ein Sauerstoffisotop.

■ $^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{1}_{1}p + ^{17}_{8}O$ Gleichung der Massenzahlen $14 + 4 = 1 + 17$

Kurzschreibweise

$^{14}_{7}N\ (\alpha, p)\ ^{17}_{8}O$ Gleichung der Kernladungszahlen $7 + 2 = 1 + 8$

Die Klammer drückt aus, daß ein α-Teilchen aufgenommen und ein Proton abgegeben wurde. Dieser Vorgang ist in der Nebelkammer zu beobachten (Bild 30/1).

● *Welche Regel gilt für die oberen und unteren Indizes bei Kernumwandlungen? Begründen Sie das aus allgemeinen Gesetzmäßigkeiten!*

Kernumwandlung durch Neutronen. Wegen des Fehlens elektrischer Ladung können Neutronen in jeden Atomkern eindringen, ohne abgelenkt zu werden. Je geringer ihre Energie und damit ihre Geschwindigkeit ist, desto größer ist die Zeit, in der sich die Neutronen in der Nähe der Kerne aufhalten, desto größer die Wahrscheinlichkeit einer Kernumwandlung, bei der Energie frei wird.

■ $^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{4}_{2}\alpha + ^{7}_{3}Li$ $10 + 1 = 4 + 7$, $5 + 0 = 2 + 3$

$^{10}_{5}B\ (n, \alpha)\ ^{7}_{3}Li$

Die gebildeten Kerne emittieren häufig Elektronen.

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U$$

$$^{239}_{92}U \rightarrow ^{239}_{93}Np + ^{0}_{-1}e$$

$$^{239}_{93}Np \rightarrow ^{239}_{94}Pu + ^{0}_{-1}e$$

Die Herstellung radioaktiver Isotope. Das Auftreffen von Elementarteilchen geeigneter Energie auf vorgegebene Kerne führt häufig zu Kernumwandlungen, deren Folgekerne instabil sind. Diese radioaktiven Kerne zerfallen wie Radium mit einer meßbaren Halbwertzeit in stabile Kerne.

Eine derartige Kernumwandlung beobachteten 1932 erstmals IRENE und FREDERIC JOLIOT-CURIE: Sie ließen α-Teilchen eines Poloniumpräparates auf Aluminiumkerne einwirken. Neben der Emission von Neutronen bildete sich ein in der Natur nicht vorkommendes Phosphorisotop.

$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{30}_{15}P$ $27 + 4 = 1 + 30$, $13 + 2 = 0 + 15$

Außerdem beobachteten sie in der Nebelkammer dünne Bahnen, wie sie Elektronen erzeugen. Aus der Ablenkung im elektrischen Feld schloß man auf eine positive Ladung

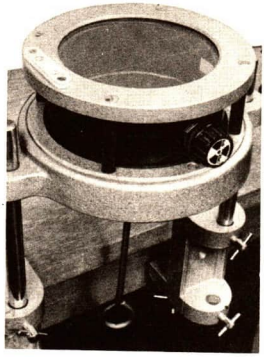


Bild 30/1 Nebelkammer für Schulexperimente

der Teilchen. Die kurz vorher von ANDERSON in der Höhenstrahlung entdeckten Positronen (↗ Tabelle S. 11) wies damit das Forscherehepaar erstmalig bei Kernumwandlungen auf der Erde nach.

Wodurch unterscheiden sich Positronen von Elektronen?

Nach Entfernen des radioaktiven Präparates hörte die Neutronenemission sofort auf, die Positronenemission jedoch dauerte an. Ihre Intensität nahm wie bei den beobachteten radioaktiven Strahlen ab. Das Phosphorisotop zerfiel mit einer Halbwertzeit von 130,6 s unter Aussendung eines Positrons in einen stabilen Siliziumkern.

$$^{30}_{15}P \rightarrow {}^{0}_{+1}e + {}^{30}_{14}Si \qquad \begin{array}{l} 30 = 30 + 0 \\ 15 = 14 + 1 \end{array}$$

Deutung: Im Phosphorkern verwandelt sich ein Proton in ein Neutron. Das dabei gebildete Positron wird emittiert.

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e$$

Radioaktive Kerne entstehen durch Kernumwandlungen.

Will man von einem Element ein radioaktives Isotop erhalten, so wird es der Bestrahlung durch Neutronen ausgesetzt. Die Neutronen dringen in die Kerne des Elements ein und bilden durch Kernumwandlungen radioaktive Isotope.

$$^{59}_{27}Co + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{60}_{27}Co \qquad \begin{array}{l} 59 + 1 = 60 \\ 27 + 0 = 27 \end{array}$$

$^{60}_{27}$Co ist radioaktiv und zerfällt unter Aussendung von β-Strahlung und γ-Strahlung in den Nickelkern $^{60}_{28}$Ni:

$$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e + \gamma \qquad \begin{array}{l} 60 = 60 + 0 \\ 27 = 28 - 1 \end{array}$$

Die Halbwertzeit für $^{60}_{27}$Co beträgt 5,3 Jahre.

$^{60}_{27}$Co ist ein starker γ-Strahler.

Die Kernspaltung

Bei den ersten Versuchen zur künstlich herbeigeführten Kernumwandlung waren zunächst Kerne entstanden, die im Periodensystem in der Nähe des umgewandelten Kernes zu finden sind.

Mit Neutronen aus der Reaktion $^{9}_{4}$Be (α, n) $^{12}_{6}$C erreichten

OTTO HAHN und sein Mitarbeiter FRITZ STRASSMANN Ende 1938 eine *Kernspaltung* bei dem im natürlichen Uran zu 0,7% enthaltenen Uranisotop $^{235}_{92}U$. Sie wiesen daraufhin nach, daß der Urankern in zwei ungefähr gleiche Teile gespalten war. Diesen Vorgang verdeutlicht Bild 32/1.

Ein auftreffendes Neutron dringt in den $^{235}_{92}U$-Kern ein und spaltet diesen in zwei fast gleich große Spaltstücke. Dabei wird Kernenergie frei und gleichzeitig entstehen ein Bariumkern und ein Kryptonkern. Diese entstandenen Kerne sind instabil. Sie besitzen mehr Neutronen, als ihrem stabilen Kern entspricht. Deshalb werden überschüssige Neutronen sofort ausgestoßen, und durch nachfolgende Emission von Elektronen und γ-Strahlung entstehen stabile Kerne.

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{142}_{56}Ba + ^{91}_{36}Kr + 3\,(^{1}_{0}n)$$

Die innere Energie eines Atomkerns wird Kernenergie genannt. Bei der Kernspaltung wird Energie freigesetzt. Diese Energie tritt sofort als Bewegungsenergie der Spaltstücke, der Neutronen und durch γ-Strahlung auf, während der Rest beim weiteren Zerfall der radioaktiven Spaltstücke durch β- und γ-Strahlung ausgestrahlt wird.

Die Bewegungsenergie der Spaltstücke verwandelt sich beim Abbremsen durch die umgebenden Körper in Wärme. Eine derartige Umwandlung mechanischer Energie in Wärme ist aus verschiedenen mechanischen Bremsvorgängen bekannt. Die Messung der Energie erfolgt kalorimetrisch.

Man hat die in Wärme umgewandelte kinetische Energie der Spaltstücke durch Erwärmung einer Flüssigkeit gemessen und daraus die freigesetzte Energie für einen Urankern berechnet. Es ergab sich:

> Bei jeder Spaltung eines Urankerns wird eine Energie von etwa $3{,}2 \cdot 10^{-14}$ kJ frei.

Um zu einem Vergleich mit den durch chemische Vorgänge frei werdenden Energiebeträgen zu gelangen, wird folgendes Beispiel herangezogen:

235 g ^{235}U enthalten $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Atome. Wenn 235 g Uran gespalten würden, erhielte man $6{,}023 \cdot 10^{23} \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-14}$ kJ. Ein Kilogramm würde 1000/235mal so viel, d. h. $8{,}4 \cdot 10^{10}$ kJ liefern. Dieser freigesetzte Energiebetrag soll mit den bei der Verbrennung einiger Stoffe frei werdenden Energiebeträgen verglichen werden.

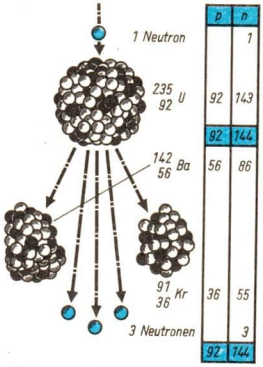
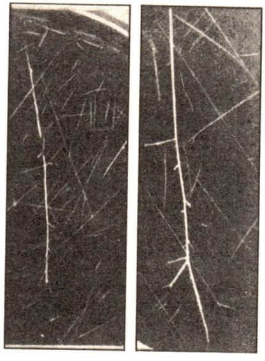


Bild 32/1 Kernspaltung

Bild 32/2 Spuren der Spaltprodukte des Urans. Die Spuren der Spaltprodukte zeigen jedesmal mehrere Abzweigungen. Außerdem sieht man Knicke, die von zahlreichen Zusammenstößen herrühren



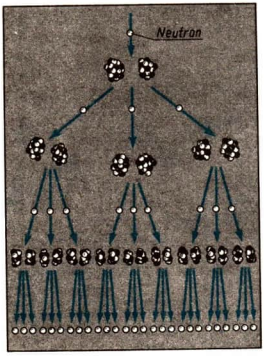
Brennstoff	frei werdender Energiebetrag
lufttrockenes Holz	$17 \cdot 10^3$ kJ/kg
Braunkohle	$25 \cdot 10^3$ kJ/kg
Steinkohle	$34 \cdot 10^3$ kJ/kg
Benzin	$46 \cdot 10^3$ kJ/kg
^{235}Uran (Kernspaltung)	$8{,}4 \cdot 10^{10}$ kJ/kg

Der Betrag der bei vollständiger Spaltung von 1 kg $^{235}_{92}U$ frei werdenden Energie ist über 2 Millionen mal so groß wie bei der Verbrennung von 1 kg Steinkohle.

✳ **Die ungesteuerte Kettenreaktion.** Die Hahnsche Entdeckung der Kernspaltung überprüften sofort zahlreiche Forschergruppen vieler Länder. Die Forscher erkannten, daß bei einer Spaltung 2 bis 3 Neutronen frei werden, die neue Spaltungen auslösen können.
Nimmt man an, daß nach jeder Kernspaltung jeweils drei Neutronen drei weitere $^{235}_{92}U$-Kerne spalten, so wächst die Zahl der Kernspaltungen wie die Potenzen von 3 lawinenartig an.
Bei einer *ungesteuerten Kettenreaktion* nimmt die Anzahl der Kernspaltungen durch Neutronen in sehr kurzer Zeit von selbst lawinenartig zu. Für das Zustandekommen müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Das Spaltmaterial darf keine Fremdstoffe enthalten, die die Neutronen absorbieren.
2. Das spaltbare Material muß in genügend großer Menge vorhanden sein, damit die Neutronen nicht wirkungslos nach außen entweichen.
3. Die frei werdenden Neutronen müssen die zum Auslösen einer neuen Spaltung erforderliche Geschwindigkeit haben.

Bild 33/1 Kettenreaktion



Die gesteuerte Kettenreaktion. Für eine industrielle Energiegewinnung muß die Energie kontinuierlich freigesetzt werden können. In den Elementen Bor und Kadmium wurden Stoffe gefunden, deren Atome Neutronen absorbieren. Damit läßt sich die Anzahl der Kernspaltungen durch Neutronen regeln. Bei einer *gesteuerten Kettenreaktion* wird durch eine Regeleinrichtung die Anzahl der je Sekunde frei werdenden Neutronen annähernd gleich der Anzahl der für die Kernspaltung erforderlichen Neutronen gehalten.

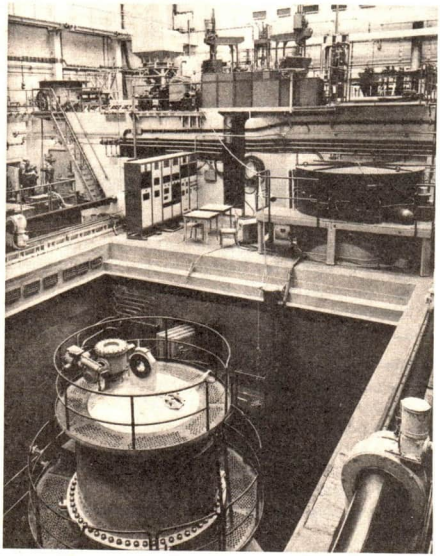


Bild 34/1 Blick in den Reaktorraum des Kernkraftwerkes Rheinsberg

Eine abgeschlossene Anlage, in der eine kontrollierte und gesteuerte Kernspaltungs-Kettenreaktion abläuft, heißt *Kernreaktor*.

Ein Kernreaktor besteht aus folgenden Aufbauelementen (Bild 35/1):

1. *Spaltbares Material* (^{235}U oder ^{239}Pu) in Form von Stäben, Blöcken oder Kugeln angeordnet.
2. *Konstruktionselemente* zum Halten und Umhüllen des spaltbaren Materials.
3. *Bremssubstanzen* (Graphit, Wasser) zum Abbremsen der schnellen Neutronen auf die für die Kernspaltung günstige Geschwindigkeit. Hierzu eignen sich Stoffe, deren Atomkerne nicht größer als das Neutron sind, z. B. das Proton des Wasserstoff-Atomkerns. Bei Zusammenstößen übertragen die Neutronen ihre Bewegungsenergie auf die Protonen. Die abgebremsten Neutronen dringen in die ^{235}U-Kerne ein und spalten diese (↗ S. 32).
4. *Reflektoren* zur Verringerung der nach der Spaltung aus dem Kernspaltungsmaterial austretenden Neutronen.
5. *Regelelemente* aus Bor oder Kadmium zur Regelung der Neutronenanzahl bei der Kettenreaktion.

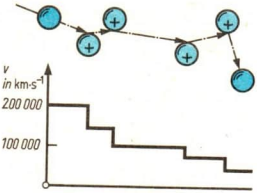
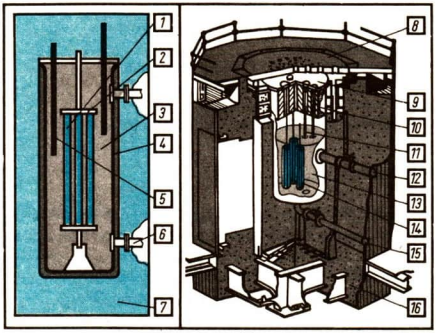


Bild 34/2 Neutronen werden durch Protonen gebremst

Bild 35/1 Prinzip eines Kernreaktors und Ausführungsbeispiel eines Kernreaktors
1 – Spaltbares Material
2 – Konstruktionselemente
3 – Bremssubstanzen
4 – Reflektoren
5 – Regelelemente
6 – Kühlsystem
7 – Strahlenschutzmantel
8 – Abdeckplatte
9 – Deckel mit Beschickungsöffnung
10 – Aluminiumbehälter
11 – Regelstäbe
12 – Abfluß des Energieträgers
13 – Wasserfüllung
14 – Brennstoffelemente
15 – Zufluß des Energieträgers
16 – Betonmantel



6. *Kühlsystem* zur Abführung der durch die Kernspaltung entstandenen Wärme.
7. *Strahlenschutzmantel* aus meterdicken Schwerbetonwänden zur Abschirmung der radioaktiven Strahlung und der Neutronenstrahlung.

Wirkungsweise eines Kernreaktors. In einem mit Spaltmaterial beschickten Reaktor tritt durch das natürliche Vorhandensein von Neutronen eine Kernspaltung ein. Die darauf einsetzende Kettenreaktion erzeugt ständig eine ausreichende Anzahl schneller Neutronen, die in der Bremssubstanz auf die für weitere Kernspaltungen günstige Geschwindigkeit abgebremst werden. Vom Schaltraum aus wird der Neutronenstrom automatisch geregelt. Die in Form von Wärme frei werdende Energie wird durch Energieträger abgeleitet.

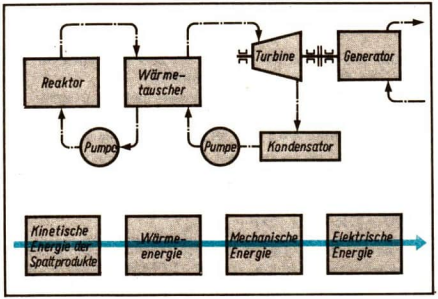


Bild 35/2 Blockschaltbild einer Kernenergieanlage und Energiefluß

Verwendungszweck der Kernreaktoren.
Energiereaktoren (z. B. im Kernkraftwerk).
Forschungsreaktoren
als Neutronenquelle für Forschungszwecke,
zur Erzeugung radioaktiver Isotope,
zum Studium der Reaktorphysik.
Brutreaktoren zur Erzeugung spaltbaren Materials. ✳

Die Kernfusion

✳ Noch größere Energiebeträge als bei der Kernspaltung werden bei der *Fusion leichter Kerne* (Kernverschmelzung) freigesetzt. Die Verschmelzung der Kerne des schweren Wasserstoffs zu einem Heliumkern erfolgt nur bei außergewöhnlich hoher Temperatur und hohem Druck.
Bei der Erzeugung von 1 kg Helium durch Fusion wird eine Energie von etwa 200 Millionen kWh, also 10mal so viel wie bei der Spaltung von 1 kg Uran frei. Daraus ist ersichtlich, daß eine technische Beherrschung thermonuklearer Reaktionen von größter Bedeutung ist. Die technische Energiegewinnung durch Kernverschmelzungen ist eine noch nicht gelöste Aufgabe. Diesem Verfahren zur Gewinnung von Energie gehört aber die Zukunft. In der Sowjetunion wurden am Kurtschatow-Institut bereits erste sichtbare Erfolge bei der gesteuerten Kernfusion erzielt. In dem Plasmareaktor T 3 kann schon für die Zeit von 10^{-3} s eine solche Fusion aufrecht erhalten werden. Bei den durch elektrische Entladung erzeugten Temperaturen von einigen Millionen Grad sind alle Atome in positiv geladene Kerne und Elektronen getrennt. Das Gemisch der zwei entgegengesetzt geladenen Gase ist nach außen hin elektrisch neutral. Starke Magnetfelder drängen dieses Plasma zusammen und leiten die Kernfusion ein.
Die Erkenntnis, daß bei der Heliumsynthese sehr große Energiebeträge frei werden, gab eine Antwort auf die Frage nach dem *Entstehen der Sonnenenergie.*

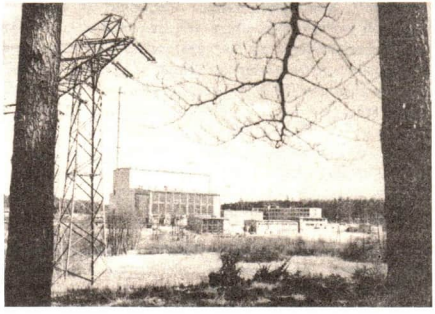
Bekannt ist, daß bei der Bildung von Heliumkernen aus Protonen und Neutronen Energie frei wird.
Alle Fixsterne bestehen aus Protonen und Neutronen.
Es gibt verschiedene Möglichkeiten, nach denen in der hohen Temperatur von etwa $2 \cdot 10^7$ °K des Sonneninnern die stabilen Heliumkerne ${}^4_2He$ (α-Teilchen) entstehen können. Das Ergebnis ist die Bildung dieser Kerne aus 4 Protonen, wobei 2 Positronen frei werden:

$$4\,({}^1_1H) \rightarrow {}^4_2He + 2\,({}^0_{+1}e).$$

Die durch diese Heliumsynthese dauernd ausgestrahlte Sonnenenergie (Leistung von $3{,}7 \cdot 10^{23}$ kW) reicht noch für eine Zeit von etwa 10^{11} Jahren aus. ✳

Entwicklung und Bedeutung der Atomphysik

Am 27. Juni 1954 wurde in der Nähe von Moskau das erste Kernkraftwerk der Welt in Betrieb genommen. Seit dem 9. Mai 1966 arbeitet das erste Kernkraftwerk der DDR bei Rheinsberg mit einer Reaktorleistung von 265 MW. Bei Greifswald ist das Kernkraftwerk Nord in Betrieb, andere sind geplant. Damit erlangt die Erzeugung von Elektroenergie in Kernkraftwerken bei uns immer mehr an Bedeutung.



Der Bau der Atomkerne. Die Forschung auf dem Gebiet der Kernphysik, deren Forschungsgegenstand der Bau der Atomkerne ist, wurde zu einer Zeit aufgenommen, als der Atomkern selbst noch völlig unbekannt war, nämlich 1896 mit der *Entdeckung der Radioaktivität* am Mineral Pechblende durch BECQUEREL. Die Radioaktivität bildete den Ausgangspunkt der Untersuchung des spontanen Zerfalls. Das Forscherehepaar MARIE und PIERRE CURIE griff die Entdeckung BECQUERELs auf. MARIE CURIEs Vorhersage, daß in der Pechblende noch Elemente mit stärkerem Strahlungsvermögen enthalten sein müßten, bestätigte sich. Um die Jahrhundertwende entdeckte das Ehepaar CURIE zwei neue, bisher unbekannte Elemente: Radium und Polonium.

MARIE und PIERRE CURIE übergaben die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeit der Öffentlichkeit, ohne daran eine andere Forderung zu knüpfen als die, die von ihnen entdeckten Strahlungsquellen sollten zum Wohle der gesamten menschlichen Gesellschaft allen zugängig gemacht werden. Damit nahmen sie die gleiche humanistische Haltung wie CONRAD RÖNTGEN ein.

Schätzen Sie die menschliche Haltung verschiedener Wissenschaftler um die Jahrhundertwende ein!
Beurteilen Sie ihre Bedeutung für die Gesellschaft!

Bild 37/2 ERNEST RUTHERFORD

1919 entdeckte RUTHERFORD beim Bestrahlen von reinem Stickstoff mit α-Teilchen die erste erzwungene *Kernumwandlung*. Seine Vermutung, daß ein in den Stickstoffkern eingedrungenes α-Teilchen einen Wasserstoffkern heraus-

schleudert, bestätigten weitere Versuche mit einer mit Stickstoff gefüllten Nebelkammer. Es wurde erkannt, daß der Wasserstoffkern als Kernbestandteil aller Atomkerne eine positive Ladung trägt; er erhielt den Namen *Proton*.
Die bis zu dieser Zeit entwickelte Theorie vom Bau des Atoms stand mit dieser neuen Erkenntnis im Widerspruch, da es keine Erklärung für den Zusammenhalt der Atomkerne aus gleichartig geladenen Teilchen gab. Die von RUTHERFORD 1920 vermutete Existenz neutraler Kernteilchen wies J. CHADWICK (geb. 1891) im Jahre 1932 nach. Man nannte sie *Neutronen*.

Aus experimentellen Befunden über die Eigenschaften und das Verhalten der Kerne formulierten die Physiker eine Hypothese über den Kernaufbau.
Durch ein entwickeltes Modell über das Original versuchten sie, die vielen Einzelkenntnisse zusammenhängend zu deuten. Mit Hilfe des Modells ließen sich einige Eigenschaften der Kerne (z. B. Stabilität) beschreiben. Da ein einzelnes Modell es noch nicht gestattet, alle Eigenschaften des Atomkerns zu erfassen, existieren in der Kernphysik mehrere Modelle über den Atomkern.

Bei Versuchen mit radioaktiven Präparaten entdeckte 1932 das Forscherehepaar IRENE (1897 bis 1956) und FREDERIC JOLIOT-CURIE (1900 bis 1958) durch Kernumwandlungen entstandene *instabile* Kerne, die wie beim Spontanzerfall mit einer meßbaren *Halbwertzeit* zerfielen.
Die vom Ehepaar JOLIOT-CURIE vorausgesehene Möglichkeit der Herstellung von radioaktiven Isotopen findet heute eine ausgedehnte Anwendung.

FREDERIC JOLIOT-CURIE nahm während seines Studiums in Paris gegen jeden Krieg Stellung. Als Praktikant kam er unmittelbar mit Arbeitern in Berührung und lernte ihre sozialen Probleme und den Klassenkampf kennen. Dieser Einfluß bestimmte seine spätere politische Entwicklung. 1942 trat er der Kommunistischen Partei Frankreichs bei. Am Kampf gegen die faschistische Besetzung Frankreichs nahm er von der ersten Stunde an teil. 1946 ernannte man ihn zum Hohen Kommissar für Atomenergie in Frankreich. Da er es ablehnte, Ergebnisse der Atomforschung in einem kapitalistischen Staat militärischen Zwecken dienstbar zu machen, enthob man ihn 1950 seines Amtes.
Als die Weltfriedensbewegung immer mehr erstarkte und 1949 der Weltfriedensrat gegründet wurde, wählte man FREDERIC JOLIOT-CURIE zum Präsidenten. In dieser Eigenschaft wurde er der Initiator des Stockholmer Appells zur Ächtung der Atombombe, zu dem sich 500 Millionen Menschen aller Erdteile durch ihre Unterschrift bekannten. Seine Arbeit für den Frieden wurde 1951 durch die Verleihung des Leninpreises gewürdigt.

Bild 38/1 FREDERIC JOLIOT-CURIE

Die Entdeckung der Kernspaltung. Mit dem experimentellen Nachweis des Neutrons begann eine Periode revolutionierender Entdeckungen. 1934 beobachtete E. FERMI (1901 bis 1955), daß beim Beschuß von Uran mit Neutronen verschiedene radioaktive Elemente entstehen.
1936 gelang es der Forschergruppe OTTO HAHN (1879 bis 1968), LISE MEITNER (geb. 1878) und FRITZ STRASSMANN (geb. 1902), das erste Transuran Neptunium nachzuweisen. Weitere Transurane entdeckte man später. Im Herbst 1938 fanden HAHN und STRASSMANN, daß beim Beschuß von $^{235}_{92}$U-Kernen die Elemente Barium und Krypton entstehen. Größtes Aufsehen erregte diese Entdeckung dadurch, daß JOLIOT-CURIE mit seinen Mitarbeitern im März 1939 weitere Neutronen unter den Spaltprodukten des Urans fand, die von neuem Kerne spalten, also eine Kettenreaktion ermöglichen können.
Die Entdeckung der *Kernspaltung* leitete kurz vor Ausbruch des zweiten Weltkrieges eine neue Etappe der Kernforschung ein, die vor allem in den USA verstärkt betrieben wurde. Dabei zeigte sich, welcher Verbrechen an der Menschheit der Kapitalismus fähig ist. Kaltblütig wurde der Abwurf der Atombomben auf die Bewohner der japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki befohlen. Viele hunderttausend Menschen mußten sterben, weil die amerikanischen Monopolherren diese Bombe als Druckmittel der amerikanischen Politik der Stärke brauchten, um, wie sie glaubten, ihre Pläne zur Unterdrückung anderer Völker besser durchsetzen zu können.

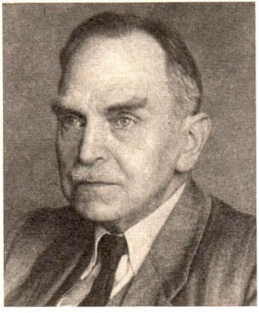


Bild 39/1 OTTO HAHN

Nach dem Verbrechen von Hiroshima und Nagasaki im August 1945 wandten sich OTTO HAHN und andere Wissenschaftler immer wieder gegen die Anwendung von Kernwaffen. Im April 1957 unterzeichnete er den Appell der „Göttinger achtzehn Atomphysiker" gegen die Mitwirkung an der Herstellung, Erprobung oder beim Einsatz von Atomwaffen.

F. JOLIOT-CURIE, HAHN, EINSTEIN und andere Physiker erkannten, daß naturwissenschaftliche Forschungsarbeit immer immanente Konsequenzen für das Leben der Gesellschaft in sich trägt. Daraus resultiert die unabwendbare politische Verantwortung der Naturwissenschaftler für die Anwendung von Forschungsergebnissen. EINSTEIN, ein bedeutender Physiker der Neuzeit bestätigte diese Verantwortung in einer seiner Botschaften:

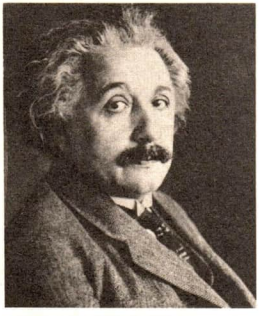


Bild 39/2 ALBERT EINSTEIN

Auf uns Wissenschaftlern, die diese ungeheure Kraft entfesselt haben, liegt die überwältigende Verantwortung, die Atomenergie so zu lenken, daß sie dem Wohle der Menschheit und nicht zu ihrer Vernichtung dient!

Diese Verantwortung fordert vom Wissenschaftler persönliche Konsequenzen und führt in der kapitalistischen Gesellschaft immer zu Konflikten, da die Aufgabe der Wissenschaft, dem Fortschritt der Menschheit zu dienen, nicht mit den Interessen der herrschenden Klasse übereinstimmt.
In der sozialistischen Gesellschaftsordnung stimmen die Interessen der Wissenschaftler mit den Interessen der Gesellschaft überein. Die allseitige Mehrung des Nationaleinkommens, unsere Jugend zur eindeutigen Erkenntnis eines wissenschaftlichen Weltbildes zu führen, allgemeine Kenntnisse über die Natur und die Stellung des Menschen zur Natur zu verbreiten, sind einige Beispiele der Verantwortung, die vom Wissenschaftler und auch von der Gesellschaft getragen werden.
Für die Verbesserung der Lebensbedingungen ergeben sich zum Beispiel durch den ständig steigenden Bedarf an Elektroenergie gesellschaftliche Bedürfnisse, die eine industrielle Nutzung der Kernenergie fordern. Die Entwicklung der Kernkraftwerkstechnik zwingt zu umfassender Planung. Für die Auswahl der Entwicklungsaufgaben, die gegenwärtig und zukünftig für die Volkswirtschaft wichtig sind, tragen auch die Wissenschaftler eine hohe Verantwortung.
Die Übereinstimmung zwischen den gesellschaftlichen Gesamtinteressen und dem humanistischen Auftrag der Wissenschaft verbietet in unserer Gesellschaftsordnung von vornherein jeden Mißbrauch der Wissenschaft. Deshalb ist es verständlich, wenn in der Verfassung unserer Republik im Artikel 17, Abschnitt 4, festgelegt wurde:

„Jeder gegen den Frieden, die Völkerverständigung, gegen das Leben und die Würde des Menschen gerichtete Mißbrauch der Wissenschaft ist verboten."

1959 unterbreitete die Sowjetunion vor der Vollversammlung der Vereinten Nationen den Vorschlag zur Einstellung der Produktion der Kernwaffen und trat für die Verwendung des spaltbaren Materials für ausschließlich friedliche, wirtschaftliche und wissenschaftliche Zwecke ein.
Dem im Juli 1963 in Moskau von der UdSSR, den USA und Großbritannien beschlossenen Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und im Wasser, das einen ersten Schritt zur Verwirklichung eines Atomwaffenverzichts darstellt, traten, ebenso wie die DDR, viele andere Staaten bei. Aus dem antagonistischen Widerspruch zwischen imperialistischer Kriegspolitik und dem Interesse der Völker an der Erhaltung des Friedens er-

wächst ein immer stärkerer Widerstand aller friedliebenden Menschen gegen die Rüstungs- und Kriegspolitik imperialistischer Kreise. Durch den gemeinsamen Kampf der internationalen Arbeiterklasse unter Führung der marxistisch-leninistischen Arbeiterparteien zusammen mit allen friedlichen Menschen ist es möglich, einen Kernwaffenkrieg aus dem Leben der Gesellschaft zu verbannen, auch wenn die kapitalistische Gesellschaftsordnung in einem Teil der Welt noch fortbesteht.

Die Bedeutung der Atomphysik. Vor wenigen Jahrzehnten war die Atomphysik noch das Forschungsgebiet einiger weniger Wissenschaftler. Später wurden bedeutende Mittel und Arbeitskräfte für diese Forschungen bereitgestellt, weil deutlich wurde, daß mit der Kenntnis von Vorgängen innerhalb der kleinsten Teilchen der Stoffe wichtige Erscheinungen der Natur erkannt und erklärt werden können.
Im Forschungszentrum in Dubna errangen sowjetische Physiker gemeinsam mit Wissenschaftlern anderer sozialistischer Länder beachtliche Erfolge bei der Untersuchung der Struktur der Atomkerne und der Entdeckung neuer Elementarteilchen. Die Theorien der Atomkerne und der Wechselwirkung zwischen den Teilchen sind in voller Entwicklung.
Größte Bedeutung erlangte die Umwandlung der Kernenergie in Elektroenergie in Kernkraftwerken. Seit der Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerkes der Welt in der UdSSR 1954 verwirklichten viele Länder Entwicklungsprogramme zur großindustriellen Nutzung der Kern-

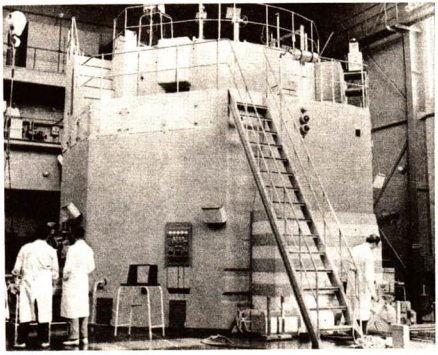


Bild 41/1 Blick in den Reaktorraum in Rossendorf bei Dresden

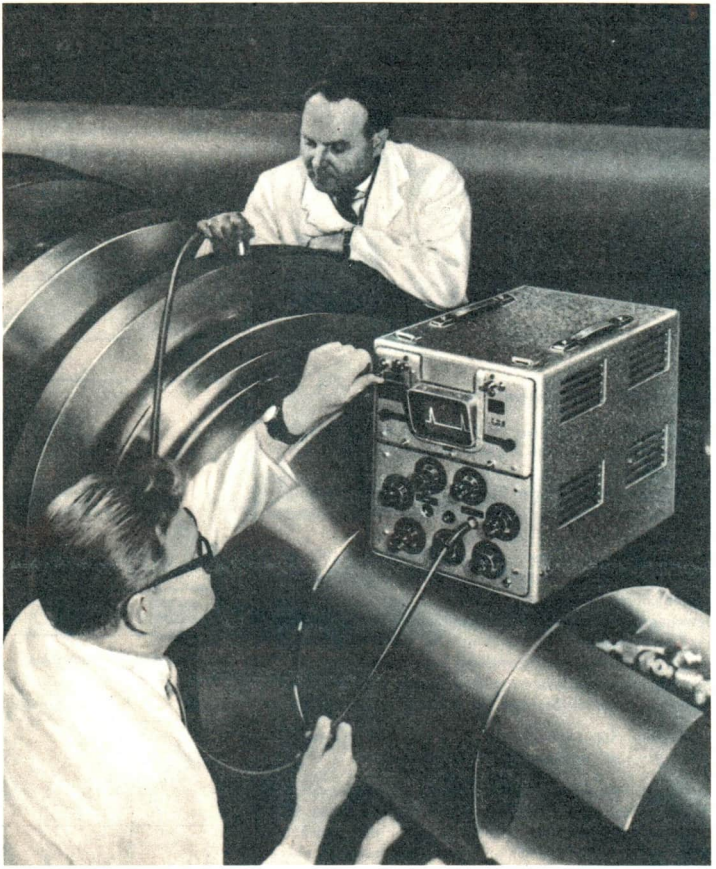
energie. Die installierte Leistung des in Bjelojarsk errichteten Kernkraftwerkes beträgt z. B. 100 MW. Das Kernkraftwerk Nowo-Woronesh arbeitet seit 1964 mit einer Leistung von 210 MW. Im Kernforschungszentrum Melekess betreibt man einen Reaktor mit einer Leistung von 100 MW. Die Erfahrungen auf dem Gebiet der Reaktortechnik stellte die UdSSR der DDR durch großzügige Unterstützung beim Bau des ersten Kernreaktors in Rossendorf bei Dresden zur Verfügung.

Der Ende 1957 in Betrieb genommene Reaktor dient zur Durchführung physikalischer Untersuchungen und zur Erzeugung radioaktiver Isotope, die man in der Medizin, der Industrie und der Landwirtschaft einsetzt. Ein zweiter Reaktor dient ausschließlich Forschungsaufgaben.

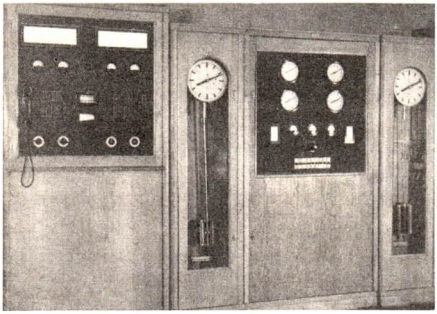
Der stetig wachsende Energiebedarf in der DDR erfordert die Ausnutzung der Kernenergie für die Volkswirtschaft. Der Bau des Kernkraftwerkes in Rheinsberg (Leistung: 70 MW) und seine Inbetriebnahme im Mai 1966 war ein erster Schritt. Ein weiteres in der Nähe von Greifswald, das Kernkraftwerk Nord, befindet sich ebenfalls bereits in Betrieb.

Gegenwärtig wird Elektroenergie in unserer Republik vorwiegend in Wärmekraftwerken erzeugt, wobei als Primärenergie die Verbrennungswärme der Braunkohle zur Verfügung steht. Infolge ungünstiger geologischer Bedingungen steigen in den nächsten Jahrzehnten die Förderkosten der Braunkohle. Gleichzeitig sinken die Selbstkosten für die in Kernkraftwerken gewonnene Elektroenergie. Die Kernkraftwerke bilden dann eine ökonomische Lösung des Energieproblems. Die beim Bau und dem Betrieb der ersten Kernkraftwerke gesammelten Erfahrungen sind eine gute Grundlage für den erfolgreichen Strukturwandel in der Energiewirtschaft unserer Republik.

Bild 42/1 Der Atomeisbrecher „Lenin" ist mit drei Druckwasserreaktoren ausgestattet und arbeitet mit Uran als Brennstoff



Schwingungen



Mechanische Schwingungen

Die Zeitmessung ist die Grundlage vieler physikalischer Untersuchungen. Mechanische Uhren, die eine sehr genaue Zeitmessung ermöglichen, gibt es erst, seitdem durch die Benutzung des Pendels für einen gleichmäßigen Gang gesorgt wurde. Das Uhrpendel hat eine bestimmte Bewegungsart; es führt eine mechanische Schwingung aus.

Bewegungsarten — Bewegungsformen

Ein Körper wird auf einer Geraden, also mit gleichbleibender Richtung, bewegt. Diese Bewegungsform heißt **geradlinige Bewegung.**
Ein Körper wird auf einer Bahn bewegt, deren Richtung nicht gleichbleibend ist. Diese Bewegungsform bezeichnet man als **krummlinige Bewegung.**
Ein Sonderfall der krummlinigen Bewegung ist die Kreisbewegung, bei der ein Körper fortwährend gleichmäßig seine Richtung ändert.
Bewegen sich Körper auf ihren Bahnen mit gleichbleibender Geschwindigkeit ($F = 0$), dann wird diese Bewegungsart als **gleichförmige Bewegung** bezeichnet.
Eine beschleunigte Bewegung ($F \neq 0$) bezeichnet man dagegen als **ungleichförmige Bewegung.**

- *Beschreiben Sie mathematisch (z. B. $v_2 > v_1$, $> \alpha_2 = \alpha_1$, $a = 0$ usw.) die verschiedenen Bewegungsarten!*

Im Physikunterricht in Klasse 9 wurden Bewegungsvorgänge untersucht, bei denen ein physikalischer *Körper* auf einer geradlinigen *Bahn* (Richtung) immer den gleichen *Richtungssinn* beibehielt. Unter diesen Bedingungen kehrt der Körper nicht an seinen Ausgangspunkt zurück.
Eine andere Form der Bewegung findet statt, wenn ein Körper auf seiner Bahn an einem bestimmten Punkt, das heißt nach einer bestimmten Zeit, den Richtungssinn seiner Bewegung ändert, zum Ausgangspunkt zurückkehrt, dort wieder seinen Richtungssinn ändert usw. Man nennt einen solchen Vorgang **Schwingen.**

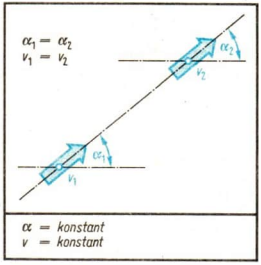


Bild 44/2 Geradlinige gleichförmige Bewegung

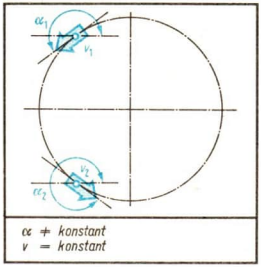


Bild 44/3 Gleichförmige Kreisbewegung

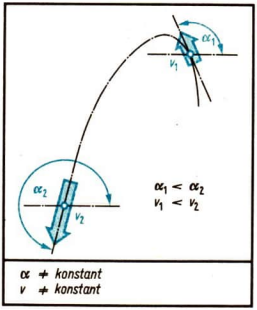


Bild 45/1 Krummlinige ungleichförmige Bewegung

1. Die Pendel der im Bild 44/1 gezeigten Uhren schwingen hin und her.
2. Die Unruh einer Taschenuhr schwingt hin und her.
3. Das Werkzeug einer Feilmaschine schwingt hin und her.
4. Das freie Ende des Sprungbrettes schwingt nach dem Absprung eines Springers auf und ab.

Der Gang einer Uhr muß gleichmäßig sein. In gleichen Zeitabständen, man sagt periodisch, werden deshalb die Zeiger gleichmäßig um ein Stück weitergedreht. Diesen regelmäßigen periodischen Vorgang steuert die Unruh (oder ein Pendel).
Mit Hilfe von Experimenten und Schlußfolgerungen sollen die Gesetzmäßigkeiten des genannten Vorganges gefunden werden.
Als Ersatz für die schwingende Unruh wird ein *Funktionsmodell* geschaffen, mit dem experimentell Erkenntnisse über das Schwingen gefunden werden können.

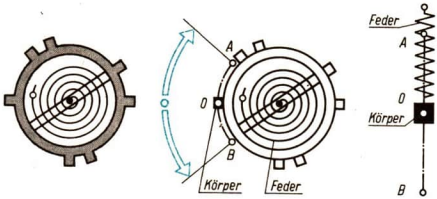


Bild 45/2 Unruh einer Taschenuhr

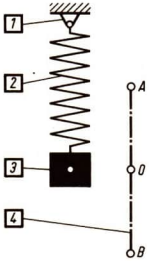


Bild 45/3 Funktionsmodell zum Untersuchen des Schwingens – Federschwinger
1 – Befestigungspunkt
2 – Feder
3 – Körper
4 – Bahn
A, B — Umkehrpunkte
0 — Ruhepunkt

Aus der Unruh (Bild 45/2) wählt man einen sehr kleinen Teil als Körpermodell aus. Dieser Körper wird beim Schwingen durch eine Federkraft stets in seiner Bewegungsrichtung, das heißt auf der gekrümmten Bahn, zuerst beschleunigt und dann so verzögert, daß er in den Umkehrpunkten A und B jeweils zur Ruhe kommt und durch die potentielle Energie der gespannten Feder mit entgegengesetztem Richtungssinn beschleunigt wird.
Ordnet man den Körper so an, daß er auf einer Geraden schwingt und daß die Federkraft einer Zug- und Druckfeder auf dieser Geraden auf den Körper wirkt, dann erhält man als Modell einen einfachen *Federschwinger*.
Unter einem Schwinger versteht man im allgemeinen ein schwingungsfähiges System; es besteht meist aus mehreren beweglich gelagerten Körpern, die miteinander mechanisch verbunden sind (↗ S. 47).

Welcher gesetzmäßige Zusammenhang besteht zwischen einer auf eine Schraubenfeder wirkenden Kraft und der Längenänderung der Schraubenfeder?

Wenn man den Bewegungsablauf eines Federschwingers (Bild 46/1) untersucht, stellt man fest:

1. Der Körper schwingt um seinen Ruhepunkt und durchläuft eine Bahn zwischen zwei Umkehrpunkten.
2. Der Körper geht durch einen bestimmten Punkt der Bahn abwechselnd mit verschiedenem Richtungssinn hindurch.
3. Der Körper erreicht die Umkehrpunkte bzw. durchläuft den Ruhepunkt wie auch jeden anderen Punkt seiner Bahn im gleichen Richtungssinn in jeweils gleichen Zeitabständen; dieser Vorgang erfolgt also **periodisch.**
4. Die **Ortskoordinate** y des Körpers wird *periodisch verändert.* Die **Federkraft** F_s wird *periodisch verändert.* Die **Geschwindigkeit** v des Körpers wird *periodisch verändert.*

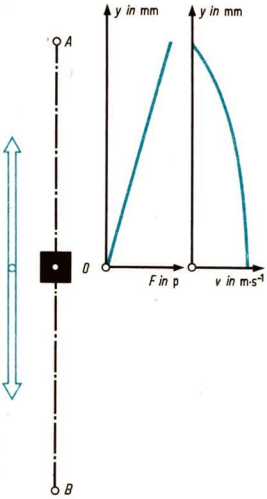


Bild 46/1

Der mechanische Schwinger

2 Der Körper eines Federschwingers (Bild 46/2) befindet sich in Ruhe (statisches Gleichgewicht). Er wird aus seiner Ruhelage gezogen; er wird ausgelenkt. Die hierfür aufzuwendende Kraft hängt von der Auslenkung des Körpers vom Ruhepunkt ab; sie wächst mit zunehmender Entfernung, denn dabei muß die Feder gespannt werden (Bild 46/1).

Die dafür notwendige Arbeit ist als potentielle Energie W_{pot} in bezug auf den Ruhepunkt in der Feder (rücktreibende Kraft) gespeichert. Gibt man den Körper frei, so wird Beschleunigungsarbeit verrichtet und die potentielle Energie in kinetische Energie W_{kin} umgewandelt. Beim Durchgang durch den Ruhepunkt hat der Körper kinetische Energie, die Feder hat keine potentielle Energie. Auf Grund der Trägheit kommt der Körper nicht zur Ruhe, er bewegt sich weiter und verrichtet Spannarbeit, bis die kinetische Energie völlig in potentielle Energie der Feder umgewandelt ist. Damit ist der andere Umkehrpunkt erreicht. Der Vorgang beginnt von neuem mit dem Entspannen der Feder und Beschleunigen des Körpers.

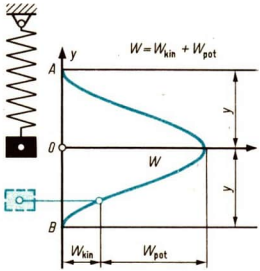


Bild 46/2 Der ausgelenkte Körper eines Federschwingers ändert durch eine rücktreibende Kraft an den Umkehrpunkten den Richtungssinn seiner Geschwindigkeit und wird durch die Trägheit über seinen Ruhepunkt hinwegbewegt. Damit wird der andere Umkehrpunkt erreicht, und der Vorgang beginnt von neuem

> Ein mechanischer Schwinger schwingt, wenn er durch Energiezufuhr aus seinem statischen Gleichgewicht gebracht und danach freigegeben wird. Dabei findet fortwährend eine Energieumwandlung statt.

Federschwinger (Bild 47/1) besitzen als Energiespeicher Federn und einen beweglichen Körper. Die Bahn des Schwingerkörpers kann geradlinig oder kreisbogenförmig verlaufen.

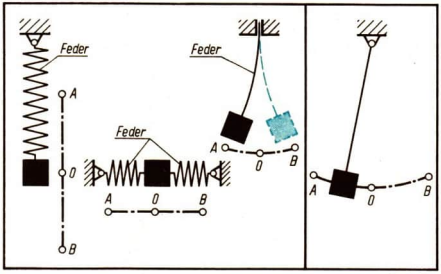


Bild 47/1 und 47/2 Schwingerarten

Beim *Pendelschwinger* (Bild 47/2) ist der Energiespeicher für die potentielle Energie der gehobene Pendelkörper und für die kinetische Energie der sich bewegende Pendelkörper. Die Bahn des Schwingerkörpers verläuft kreisbogenförmig.
Beim mechanischen Schwinger wird die Energie zwischen zwei Energiespeichern ständig ausgetauscht.

Schwingerart	Energiespeicher	Energieform
Federschwinger	bewegter Körper (Masse)	kinetische Energie
	gespannte Feder (Federkraft)	potentielle Energie
Pendelschwinger	bewegter Körper (Masse)	kinetische Energie
	gehobener Körper (Gewichtskraft)	potentielle Energie

Beschreiben Sie die Veränderung der Geschwindigkeit des Körpers beim Schwingen (siehe auch Bild 46/1)!

Beim Federschwinger sind die eine Bewegung verursachende Federkraft und die Geschwindigkeit Begriffe aus der Mechanik, deshalb bezeichnet man den in den Bildern 45/3 und 46/1 dargestellten Vorgang als **mechanische Schwingung.** Der Vorgang wiederholt sich in gleichen Zeitabständen; er findet zeitlich periodisch statt.

Die zeitlich periodische Änderung einer mechanischen Größe beschreibt die mechanische Schwingung.

Wenn man diesen Satz verallgemeinert, dann kann man sagen: Jeder physikalische Vorgang, bei dem sich eine oder mehrere beliebige physikalische Größen wie z. B. die Ortskoordinate y eines schwingenden Körpers (Bild 46/1) periodisch ändern, stellt eine Schwingung dar.
In der Akustik wird das Schwingen von Körpern zum Erzeugen von Tönen benutzt. Die Frequenz (S. 48) der schwingenden Körper bestimmt die Tonhöhe.

- Die schwingenden Saiten der Streich- und Zupfinstrumente und des Klaviers, die schwingenden Platten des Xylophons, die schwingenden Arme der Stimmgabel und die schwingenden Luftsäulen der Blasinstrumente sind Beispiele dafür.

In den weiteren Abschnitten wird im wesentlichen die zeitlich periodische Änderung des Abstandes eines schwingenden Körpers von seinem Ruhepunkt behandelt, weil diese Größe und deren Veränderung leicht erfaßbar sind.

- *Beschreiben Sie an dem dargestellten mechanischen Schwinger Stimmgabel den Vorgang der entsprechenden mechanischen Schwingung durch mechanische Größen!*

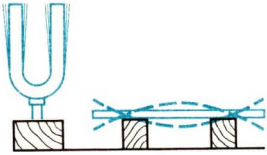


Bild 48/1 Stimmgabel und schwingende Platte

Die Kenngrößen einer Schwingung

Für die Beschreibung der in diesem Abschnitt behandelten besonderen Form einer mechanischen Schwingung sind bestimmte charakteristische Angaben gebräuchlich.
Man bezeichnet sie als **Kenngrößen**

Kenngröße	Formelzeichen	Erläuterung	Beziehungen
Elongation	y	Momentanwert der sich verändernden physikalischen Größe	—
Amplitude	y_{max}	Maximalwert der sich verändernden physikalischen Größe	—
Periode oder **Schwingungsdauer**	T	Zeit einer vollen Schwingung, d. h. eines vollständigen Hin- und Herganges[1]	$T = \frac{t}{n}$ $T = \frac{1}{f}$
Frequenz	f	Quotient aus einer Anzahl von Schwingungen und der dazugehörigen Zeit	$f = \frac{n}{t}$ $f = \frac{1}{T}$

[1] n: Beliebige Anzahl von Schwingungen; t: dazugehörige Zeit

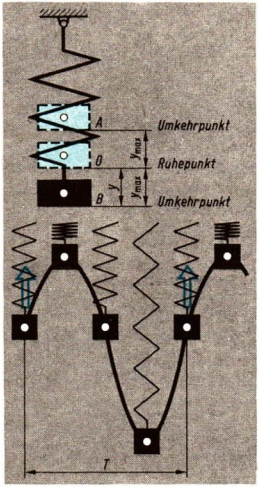


Bild 48/2 Kenngrößen am Federschwinger

Geht der Körper eines Federschwingers nach der Zeit T im gleichen Richtungssinn durch den gleichen Punkt, so sagt man, es ist eine Schwingung erfolgt.
Es ist also zu beachten, daß der Begriff „Schwingung" in zweierlei Weise verwendet wird: einmal als Ausdruck für eine *ständige* periodische Veränderung einer physikalischen Größe und zum anderen für einen *einmaligen* Ablauf dieser Veränderung während einer Schwingungsdauer.

Führt ein Federschwinger in der Zeit von 40 s insgesamt 50 Schwingungen aus, so ergibt sich die Periode:

$$T = \frac{t}{n};\ T = \frac{40}{50}\ \text{s};\ T = 0{,}8\ \text{s}$$

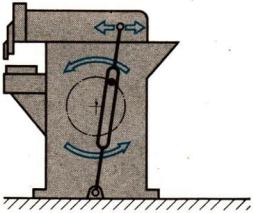
Beim gewählten Zahlenbeispiel ergibt sich eine Frequenz von:

$$f = \frac{n}{t};\ f = \frac{50}{40}\ \text{s}^{-1};\ f = 1{,}25\ \text{s}^{-1}$$

Zu Ehren des Physikers HEINRICH HERTZ benutzt man für die Einheit s^{-1} die Bezeichnung **Hertz** (Hz).
1 Hz = 1 s^{-1}
Größere Frequenzeinheiten sind
1 kHz = 10^3 Hz (Kilohertz)
1 MHz = 10^6 Hz (Megahertz)
1 GHz = 10^9 Hz (Gigahertz).

Aus der Beziehung $f = \frac{1}{T}$ (↗ Tabelle S. 48) geht hervor, daß die Schwingungsdauer der reziproke Wert der Frequenz ist.

Von welchen Größen sind beim Federschwinger die Größen Elongation und Frequenz abhängig?



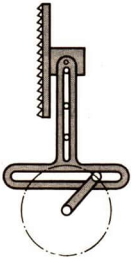


Bild 49/1 Kurbeltrieb an der Feilmaschine und an der Kurzhobelmaschine

Die Gleichung der harmonischen Schwingung

Im Bild 49/1 ist ein mechanischer Schwinger am Beispiel des Kurbeltriebes der Feilmaschine dargestellt worden. Solche Schwinger, bei denen eine zeitlich periodische Änderung einer mechanischen Größe mit Hilfe einer gleichförmigen *Kreisbewegung* erzielt wird, sind aus der Technik vielfach bekannt, sie erzeugen *harmonische Schwingungen* (meist aber nur angenähert harmonische Schwingungen wie z. B. beim Kolbenmotor oder bei der Kurzhobelmaschine).
Im folgenden soll untersucht werden, wie die sich bei einer harmonischen Schwingung ständig verändernde physikalische Größe y, die Elongation, berechnet werden kann.

Allgemein gilt:
$y = f(t)$

Die Herleitung einer Gleichung für die Größe y in Abhängigkeit von der Zeit kann an dem Getriebe der Feilmaschine (Bild 50/1) vorgenommen werden, das eine harmonische Schwingung erzeugt.

Bei einer Drehung der Kurbel führt die Kreuzschleife eine geradlinige Bewegung aus. Die Projektion des vom Punkt P der Kurbel zurückgelegten Weges und der von der Zeigerspitze Z in der Zeit t zurückgelegte Weg y sind gleich. Die Kreuzschleife mit der Zeigerspitze Z führt eine harmonische Schwingung aus, wenn der Punkt P der Kurbel auf der Kreisbahn einmal umläuft.

Nach der Definition für den Sinus eines Winkels kann man die Elongation y (Bild 50/2) errechnen:

$$y = y_{max} \cdot \sin \varphi \qquad (4)$$

Es ist zu untersuchen, mit welchen Größen der Kreisbewegung des Punktes P eine Beziehung zur harmonischen Schwingung der Zeigerspitze hergestellt werden kann.

Die Kurbel vollführt einen vollen Umlauf in der Zeit T. Der dabei während der Zeit T überstrichene Winkel beträgt im Bogenmaß 2π. Während der Zeit t wird der Winkel φ überstrichen. Ist die Zeit t ein Vielfaches von T, dann ist der überstrichene Winkel das gleiche Vielfache von 2π.

Es gilt die Proportion:

$\varphi : 2\pi = t : T$. Daraus ergibt sich

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \cdot t \qquad (5)$$

Den Ausdruck $\frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$ bezeichnet man als

Kreisfrequenz	$\omega = 2\pi \cdot f$	(6)

Setzt man in die Gleichung (4) für die Elongation
$y = y_{max} \cdot \sin \varphi$
die für φ hergeleitete Beziehung aus der harmonischen Schwingung ein,

$$\varphi = 2\pi \cdot f \cdot t, \qquad (7)$$

$$\varphi = \omega \cdot t, \qquad (8)$$

so erhält man die Gleichung für den

Momentanwert der Auslenkung (Elongation)	$y = y_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$	(9)

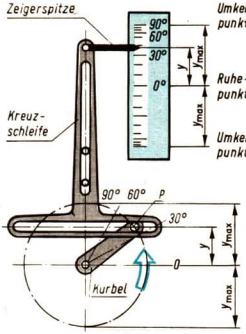


Bild 50/1 Kreuzschleifengetriebe
Beim Kreuzschleifengetriebe bewegt eine umlaufende Kurbel die Kreuzschleife bei einer Umdrehung einmal zwischen den beiden Umkehrpunkten hin und her. Der Abstand der beiden Umkehrpunkte ist so groß wie der Kurbelkreisbahndurchmesser

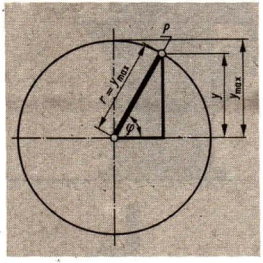


Bild 50/2 Zusammenhang zwischen Elongation und Amplitude in Abhängigkeit vom Drehwinkel

Diese Gleichung (9) entspricht der Funktion $y = a \cdot \sin bx$, die im Mathematikunterricht behandelt wurde.

Stellen Sie fest, bei welchen Werten für $\omega \cdot t$ die Elongation ein Maximum bzw. ein Minimum erreicht!

Es wird festgestellt: Wenn der Punkt P eine Kreisbewegung mit konstanter Kreisfrequenz ausführt, dann läßt sich das Weg-Zeit-Gesetz der Koordinate y durch eine Sinusfunktion beschreiben. Das ist aber gleichzeitig das Bewegungsgesetz für den Punkt Z der Kreuzschleife nach Bild 50/1.

> Harmonische Schwingungen als zeitlich periodische Vorgänge lassen sich durch Sinusfunktionen mathematisch erfassen.

Sind auch Kosinusfunktionen anwendbar?
Welche Koordinate des Punktes P kann durch eine Kosinusfunktion beschrieben werden? Welche Frequenz tritt dabei auf, und wie groß ist die Amplitude?

Welche Elongation besitzt ein Federschwinger mit der Frequenz $f = 2$ Hz und der Amplitude $y_{max} = 3$ cm zu den Zeiten $t_1 = 4$ s und $t_2 = 4{,}2$ s?

Gegeben:

$f = 2\ \text{Hz} = 2\ \text{s}^{-1}$
$y_{max} = 3\ \text{cm}$
$t_1 = 4\ \text{s}\ (t_2 = 4{,}2\ \text{s})$

Gesucht:

$y_1\ (y_2)$

Lösung:

$y = y_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$
$y_1 = y_{max} \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t_1$
$y_1 = 3\ \text{cm} \cdot \sin 2\pi \cdot 2\ \text{s}^{-1} \cdot 4\ \text{s}$
$\underline{\underline{y_1 = 3\ \text{cm} \cdot \sin 16\pi}}$

Der Sinus des Winkels 16π ist Null, so daß die Elongation zur angegebenen Zeit t_1 ebenfalls Null ist.

Die grafische Darstellung einer Schwingung

Schwingungen müssen sehr oft aufgezeichnet werden, um bestimmte Prozesse auch nachträglich noch mit Hilfe der Aufzeichnungen auswerten zu können.
Würde die Zeigerspitze Z der Kreuzschleife (Bild 50/1) z. B. zum Aufzeichnen verwendet werden, so ergäbe sich infolge des ständigen Auf- und Niedergehens von Z eine Linie, die nicht erkennen ließe, wie groß der Betrag y zur beliebigen Zeit t ist. Wird die Skale während der Schwingung in Abhängigkeit von der Zeit seitlich verschoben, dann wird der Zeigerspitzenausschlag $y = f(t)$ sichtbar.

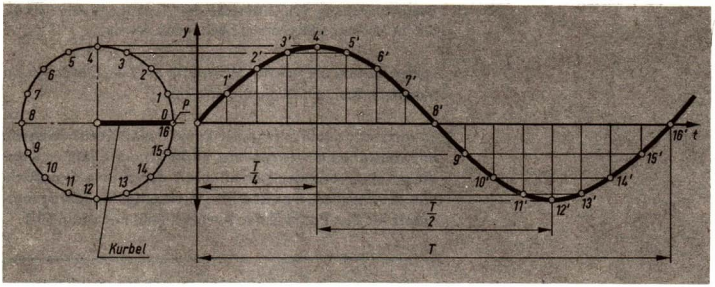


Bild 52/1

Von der Kreisbewegung des Punktes P der Kurbel (Bild 50/1) läßt sich die grafische Darstellung einer harmonischen Schwingung ableiten; diese ergibt eine Sinuskurve. Mit mathematischen Hilfsmitteln kann die Sinuskurve *konstruiert* werden.
Auf der Abszissenachse (Bild 52/1) werden die Winkelstellungen der Kurbel von 10° zu 10° aufgetragen. Mit Hilfe der Sinusfunktion und der Kurbellänge r kann der Wert der Elongation für jede Kurbelstellung errechnet und auf der Ordinatenachse aufgetragen werden. Die Verbindungslinie aller errechneten Punkte gibt die Sinuskurve als grafische Darstellung einer Schwingung.

● *Welche Größe ist für das Diagramm beim Federschwinger auf der Ordinatenachse aufzutragen?*

■ Konstruieren Sie das *y-t*-Diagramm der Schwingung des Federschwingers aus der Aufgabe auf S. 51, und prüfen Sie die rechnerische Lösung mit Hilfe des Diagramms!

Schwingungsdauer eines Fadenpendels

Pendelschwinger eignen sich auf Grund ihrer gleichmäßigen Schwingungen als Zeitteiler. HUYGENS hat den Pendelschwinger im Jahre 1673 als Regler erstmals in einer Uhr verwendet. Die konstante Schwingungsdauer des Pendelschwingers dient als Zeitteiler und ermöglicht den gleichmäßigen Lauf des Uhrwerkes.

Es ist nun zu untersuchen, von welchen Größen die Schwingungsdauer eines Pendelschwingers abhängt! Dazu muß man die beim Schwingungsvorgang wirkenden Gesetzmäßigkeiten auf Grund der gegebenen Sachverhalte untersuchen.

Ein Fadenpendel wird benutzt, weil man bei diesem die gesamte Masse des Pendelschwingers (bestehend aus Faden und Pendelkörper) fast genau im Schwerpunkt des Pendelkörpers angeordnet annehmen kann. Die Masse des Fadens wird dabei unbeachtet gelassen.

Vorüberlegung. Beim Schwingen treten Beschleunigungen auf. Ursache dieser Vorgänge ist die Gravitation zwischen Erde und Pendelkörper. Demzufolge muß man den Zusammenhang zwischen Schwingungsdauer und Masse des Pendelkörpers und der Fallbeschleunigung untersuchen:

Hypothesen:

$T = f(m)$; (10)
$T = f(g)$. (11)

Auf die Bewegung des Pendelschwingers wirkt die Widerstandskraft der Luft, in der die Bewegung stattfindet, ein:

$T = f(W_R)$. (12)

Die Bewegung des Pendelschwingers findet auf einem Kreisbahnabschnitt statt, demzufolge ist zu prüfen, welche Abhängigkeit der Schwingungsdauer von dem Kreisbahnradius, also der Pendellänge, und vom Auslenkungswinkel des Pendelschwingers besteht:

$T = f(l)$, (13)
$T = f(\alpha)$. (14)

Um eine gesetzmäßige Beziehung zu ermitteln, muß man in Meßreihen die Größen untersuchen, die bei unterschiedlichen Bedingungen immer wieder ein wertmäßig gleiches Ergebnis liefern. Stellt sich heraus, daß eine der Hypothesen unter auch nur einer Bedingung falsch ist, dannn muß diese verworfen werden, weil dann keine Verallgemeinerung möglich ist.

Die **experimentelle Untersuchung** der Abhängigkeiten (10 bis (14) führt man mit einem langen Pendelschwinger mit großer Masse in einem abgeschlossenen Raum (Treppenhaus der Schule oder eines Wohnhochhauses, Feuerwehrturm) aus (Bild 54/1). Dabei wird die Geschwindigkeit v des Pendelkörpers sehr gering sein, und weil infolge der geringen Masse der beim Schwingen zu verdrängenden Luft W_R sehr klein ist, soll Abhängigkeit (12) nicht untersucht werden. Abhängigkeit (11) kann nur untersucht werden, wenn Messungen an zwei verschieden hohen Orten vorgenommen werden können.
In diesem Falle wird $T = f(g)$ gegeben.

Die Abhängigkeit (14) besteht aus mathematischen Überlegungen nur für Winkel $\alpha < 5°$. Sie wird deshalb experimentell nicht untersucht.
Als Pendelkörper eignet sich eine mit Sand oder Wasser gefüllte große Flasche und als Verbindungsstück ein dünner Dederonfaden (Angelschnur).

● *Wie bestimmen Sie experimentell den Schwerpunkt des Pendelkörpers (↗ Physik in Übersichten)?*

Bei der experimentellen Bestimmung von T ist zu beachten, daß immer nur eine der anderen Größe verändert wird. Demzufolge werden zwei Meßreihen notwendig für die Abhängigkeiten (10) und (13).
Bei der **Auswertung** der Meßreihen ist zu prüfen, welche mathematische Beziehung zwischen der abhängigen Variablen T und der unabhängigen Variablen x der jeweiligen Versuchsreihe bestehen könnte bzw. ihr nahekommt. Solche Beziehungen können sein:

$$T \sim x,\ T \sim x^2,\ T \sim x^3,\ T \sim \sqrt{x},\ T \sim \sqrt[3]{x}$$

$$T \sim x^{-1},\ T \sim x^{-2},\ T \sim x^{-3},\ T \sim \sqrt[-2]{x},\ T \sim \sqrt[-3]{x}.$$

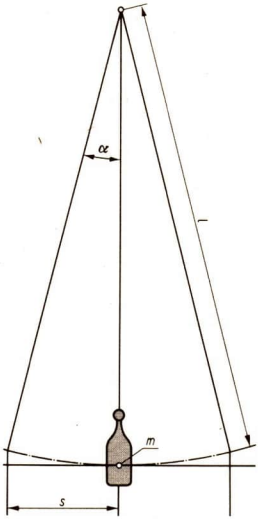


Bild 54/1 Errechnen Sie den Auslenkwinkel α aus l und s! Überlegen Sie, welche Meßungenauigkeiten bei Ihrem Experiment die einzelnen Meßergebnisse entscheidend beeinflussen können

Versuchsreihe 1 – Masse und Schwingungsdauer

Die Messung wird durchgeführt mit drei Pendelkörpern mit voneinander verschiedener Masse (l, g und α sind konstant).

Nr.	Masse des Pendelkörpers m in kg	Anzahl der Schwingungen n	Zeit der Schwingungen t in s	Schwingungsdauer T in s	Beziehungen für T

Versuchsreihe 2 Pendelschwingerlänge und Schwingungsdauer

Die Messung wird durchgeführt mit drei Pendelfäden mit voneinander verschiedener Länge (m, g und α sind konstant).

Nr.	Länge des Pendelschwingers l in m	Anzahl der Schwingungen n	Zeit der Schwingungen t in s	Schwingungsdauer T in s	Beziehungen für T

Aus den Versuchsreihen muß sich eine Gleichung von folgender Form ergeben:

$$T = k \cdot \sqrt{l} \qquad (15)$$

Damit ist festgestellt, daß die Schwingungsdauer unabhängig ist von der Masse des Pendelkörpers. Die Hypothese $T = f(m)$ muß verworfen werden. Diese Gleichung (15) gilt nur für Auslenkwinkel, die gleich oder kleiner sind als 5°, sie hat einen Definitionsbereich von $l > 0$.

Der Proportionalitätsfaktor k ist, ohne daß das hier bewiesen werden soll:

$$k = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \qquad (16)$$

Berechnen Sie k, indem Sie $g = 9{,}81\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ einsetzen, und überprüfen Sie die Werte der letzten Spalte im Meßprotokoll der Versuchsreihe 2, in der der Quotient $\frac{T}{\sqrt{l}}$ als konstanter Betrag auftauchen mußte!

Aus diesen experimentellen Untersuchungen kann man das im Jahre 1673 von CHRISTIAN HUYGENS formulierte Gesetz für einen Pendelschwinger bestimmen!

Periode eines Pendelschwingers	$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ (17)

Leiten Sie aus Gleichung (17) die Gleichung für die Frequenz eines Pendelschwingers ab!

Im Turm der Prager St.-Veits-Kathedrale steuert ein Pendelschwinger mit einer Länge von 4,11 m den Gang der Uhr. Berechnen Sie die Periode der Pendelschwingung!

Gegeben:

$l = 4{,}11\ \mathrm{m}$

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

Gesucht:

T

Lösung:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 6{,}28 \sqrt{\frac{4{,}11\ \mathrm{m}}{9{,}81\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}}}$$

$$\underline{\underline{T = 4{,}065\ \mathrm{s}}}$$

Ungedämpfte und gedämpfte Schwingung

Bisher wurde der Federschwinger oder der Pendelschwinger als ein abgeschlossenes System betrachtet, das nicht mit anderen Systemen seiner Umwelt in Beziehung steht und deshalb weder Energie zugeführt erhält noch abgibt. Unter dieser Bedingung ist die im Schwinger gespeicherte mechanische Energie konstant; sie setzt sich zu jedem Zeitpunkt aus einem Anteil potentieller Energie und einem Anteil kinetischer Energie zusammen. Während des Schwingens ist die Amplitude y_{max} deshalb konstant. Nach außen, an andere Systeme, wird bei konstanter Amplitude keine Energie abgegeben. Solch eine Schwingung bezeichnet man als *ungedämpfte Schwingung*.

> Schwingungen mit gleichbleibender Amplitude heißen ungedämpfte Schwingungen.

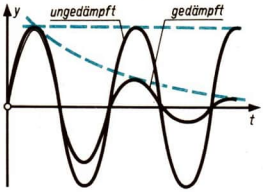


Bild 56/1 *y-t*-Diagramm bei ungedämpfter und gedämpfter Schwingung

Im Gegensatz dazu heißen Schwingungen mit abnehmender Amplitude *gedämpfte Schwingungen*.
Bei ihnen bleibt die im Schwinger gespeicherte Energie während des Schwingens nicht konstant, sie wird allmählich nach außen abgegeben. Die Amplitude ist nicht konstant.

> Schwingungen mit abnehmender Amplitude heißen gedämpfte Schwingungen.

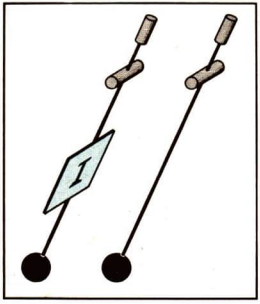


Bild 56/2

Die Dämpfung ist ein Vorgang, bei dem eine Energieform in eine andere Energieform umgewandelt und an die Umgebung weitergeleitet wird.

● *Welche Energieformen sind Ihnen bekannt?*

Die mechanische Energie des Schwingers wird bei der Dämpfung durch Reibung in eine andere Energieform umgewandelt. Dieses Beispiel lehrt, daß ein Erhaltungssatz, hier der Erhaltungssatz für die mechanische Energie, stets nur beschränkte Gültigkeit hat.
Der Betrag der Reibungs- oder Dämpfungskraft hat wesentlichen Einfluß auf den Schwingungsverlauf, wie man einem Versuch nach Bild 56/2 entnehmen kann.

3 ▼ Ohne Dämpfungsfläche ist die Dämpfungskraft gering. Die Amplitude nimmt nur langsam ab (Bild 56/3a), mit Dämpfungsfläche nimmt die Amplitude sehr schnell ab. Die Schwingung ist nach kurzer Zeit beendet.

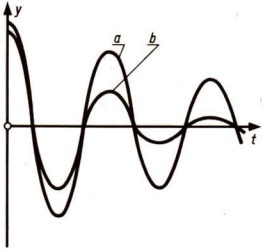


Bild 56/3

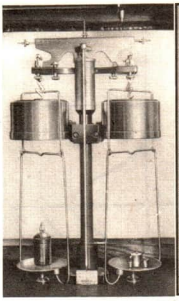
Anwendungsbeispiele zur Dämpfung

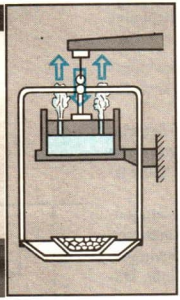
Analysenwaage. Um ein langwährendes Schwingen des Waagebalkens zu vermeiden, werden die Schwingungen gedämpft. Die Dämpfungskraft wird durch den Widerstand beim Durchströmen der Luft durch die kleinen Öffnungen im Kolben hervorgerufen.

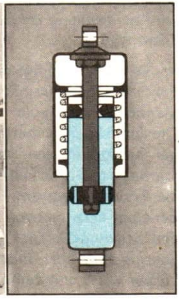
Stoßdämpfer. Das durch den Kolben strömende Öl dämpft die Schwingungen sehr schnell, die sonst fortwährend von den Rädern durch die Federn auf das Fahrzeug übertragen würden.

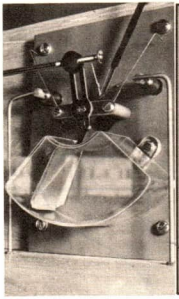
Meßgerät. Bei der Anzeige eines Meßwertes soll der Zeiger nach dem Ausschlag möglichst wenige Schwingungen ausführen, eine Luftdämpfung gewährleistet dies.

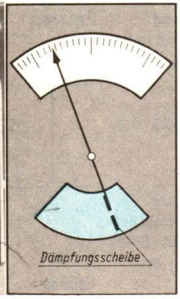
Flugzeug. Die Dämpfungsflächen (1) am Flugzeug verhindern, daß bei einem Ruderflächenausschlag (2) das Flugzeug um die entsprechende Drehachse (3) pendelt, und erreichen, daß es bei einer eingetretenen Pendelbewegung schnell wieder eine Ruhelage einnimmt.

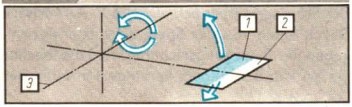












Die erzwungene Schwingung

Ein Federschwinger kann durch einen einmaligen Anstoß zum Schwingen angeregt werden. Er hat eine bestimmte Frequenz, die **Eigenfrequenz** f_0. Sie ist unabhängig von der Amplitude, aber abhängig von der Federbeschaffenheit, der Dämpfungskraft und der Masse des Schwingers.

> Ein Schwinger führt nach einmaligem Anstoß Eigenschwingungen aus. Die dabei auftretende Frequenz heißt Eigenfrequenz f_0.

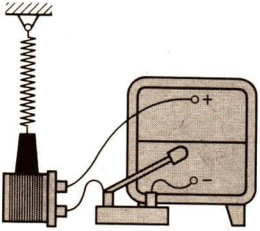


Bild 58/1

Solch eine Schwingungsart bezeichnet man als *freie Schwingung*.
Ein Federschwinger kann auch auf andere Weise erregt werden (Bild 58/1).

4 ▼ Mit Hilfe einer Morsetaste kann der Stromkreis in der Spule periodisch geschlossen und geöffnet werden. Der Eisenkörper wird im Rhythmus der Erregung angezogen. Es entsteht eine Schwingung.

Im Versuch 4 erfolgt die Erregung des Federschwingers durch einen anderen Schwinger, in diesem Falle durch das Magnetfeld der Spule.
Die durch Energieübertragung von einem fremden Schwinger hervorgerufene Schwingung nennt man *erzwungene Schwingung*. Die Schaltfrequenz im Stromkreis der Spule ist die **Erregerfrequenz** f_E.
Bei einer erzwungenen Schwingung wird dem schwingenden Schwingerkörper (Bild 58/1) von außen kinetische Energie zugeführt, indem eine Kraft auf den Schwingerkörper wirkt und damit dessen Bewegung beeinflußt. Dabei können folgende Fälle eintreten:

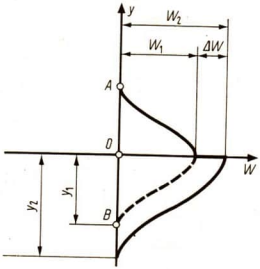


Bild 58/2

Der Schwingerkörper befindet sich in Abwärtsbewegung:
Durch einen von der Spule hervorgerufenen Anstoß in Bewegungsrichtung wird die mechanische Energie W_1 des Schwingers vergrößert durch Energiezufuhr ΔW.
$W_2 > W_1$
Aus dem Energie-Amplituden-Diagramm (Bild 58/2) ist zu erkennen, daß die Amplitude dabei größer wird.
$y_2 > y_1$

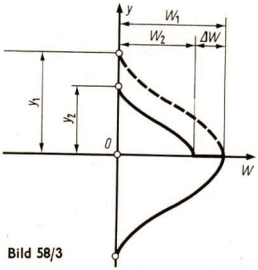


Bild 58/3

Der Schwingerkörper befindet sich in Aufwärtsbewegung:
Durch einen von der Spule hervorgerufenen Anstoß entgegen der Bewegungsrichtung wird die mechanische Energie W_1 des Schwingers verringert um den Betrag ΔW.
$W_2 < W_1$.

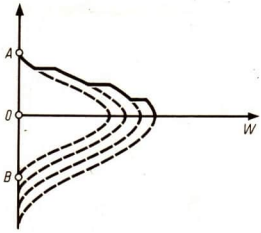


Bild 59/1

Aus dem Energie-Amplituden-Diagramm (Bild 58/3) ist zu erkennen, daß die Amplitude kleiner wird.

$y_2 < y_1$

Bei mehrmaliger Energiezufuhr kann die Amplitude (Bild 59/1) so groß (klein) werden, daß der Federschwinger unter Umständen zerstört wird (bzw. der Schwinger kommt vollständig zur Ruhe).

Die Resonanz

Jeder Schwinger wird durch die Dämpfung in seiner Bewegung gehemmt. Er kommt nach einer bestimmten Zeit zur Ruhe.

Soll ein Schwinger ständig schwingen, so muß die durch die Dämpfung abgeführte Energie ständig zugeführt werden. Hierfür kommt der Fall nach Bild 58/2 in Frage, das heißt, die Energie muß

1. in der Eigenfrequenz des Schwingers und
2. zur richtigen Zeit

zugeführt werden.

Erregt man den Federschwinger aus Versuch 4 mit einer Frequenz $f_E \ll f_0$, so ist die Amplitude der Schwingungen nur klein. Vergrößert man die Frequenz, so wird die Amplitude größer. Bei einer Erregerfrequenz $f_E \approx f_0$ (bei gedämpfter Schwingung) wird die Amplitude der erzwungenen Schwingung am größten. Bei weiterer Erhöhung der Erregerfrequenz nimmt die Amplitude wieder ab.

Erfolgen also die Anstöße des Schwingers mit einer anderen Frequenz als der Eigenfrequenz des angestoßenen Schwingers, dann ist die Amplitude klein, weil die den Anstoß verursachende Kraft teils antreibend, teils hemmend wirkt (Bilder 59/2, 58/2 und 58/3). Den Zustand, bei dem Erregerfrequenz und Eigenfrequenz etwa übereinstimmen und damit die größtmögliche Amplitude erreicht wird, bezeichnet man als **Resonanz.**

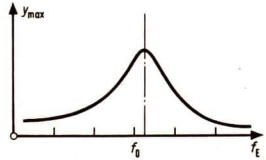


Bild 59/2 Resonanzkurve eines Schwingers mit der Eigenfrequenz f_0 bei veränderlicher Erregerfrequenz

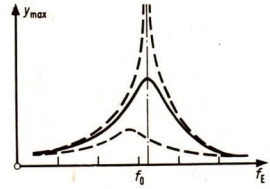


Bild 59/3 Resonanzkurven eines Schwingers bei verschiedener Dämpfung

Ist die durch die Dämpfung des erregten Schwingers abgeführte Energie kleiner als die zugeführte Energie, so nimmt bei Resonanz die Amplitude des erregten Schwingers zu. Das kann zur Zerstörung der Schwingerfeder oder des gesamten Schwingers führen. Dieser Vorgang hat in der Technik besondere Bedeutung, weil dadurch Menschenleben gefährdet werden und großer Sachschaden entstehen können.

An einem Schwinger treten bei periodisch einwirkender Kraft Schwingungen sehr großer Amplituden auf, wenn f_E mit f_0 übereinstimmt.

✳ Der Verlauf der Resonanzkurve (Bild 59/3) hängt von der Dämpfung des schwingenden Systems ab. Je größer die Dämpfungskraft, um so kleiner ist die Amplitude der erzwungenen Schwingung. Dabei verschiebt sich das Maximum der Amplitude nach Frequenzen, die kleiner als f_0 sind. ✳

Erklären Sie die Kurven des Resonators nach Bild 59/1!

Eine Energieübertragung auf einen Schwinger kann auch von einem anderen Schwinger erfolgen (Bild 60/1).
Bei mechanischen Schwingern muß dazu eine mechanische Verbindung hergestellt werden. Man bezeichnet eine solche Verbindung als **Kopplung.**
Bei einem Anstoß des Pendels (1) wird durch die Kopplung (2) die Energie allmählich auf Pendel (3) übertragen, Pendel (1) kommt dabei zur Ruhe. Danach kann die Energie von Pendel (3) durch die Kopplung wieder auf Pendel (1) übertragen werden.

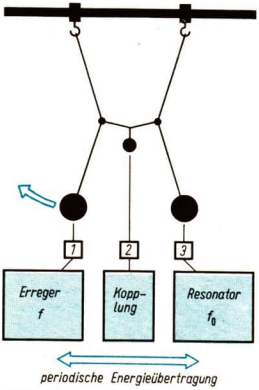
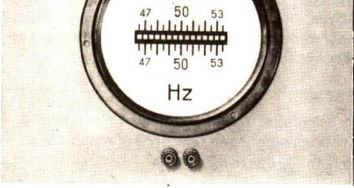
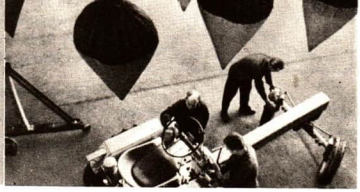


Bild 60/1 Bei zwei gekoppelten Pendeln wird die Schwingungsenergie vom Erreger (1) über die Kopplung (2) auf den Resonator (3) übertragen

Anwendungsbeispiele zur Resonanz

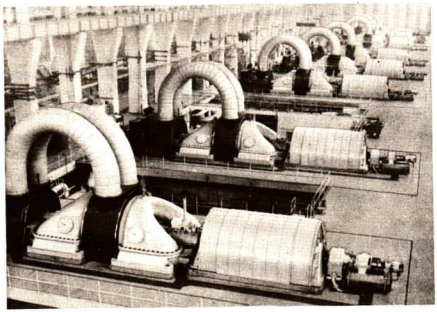
Frequenzmessung. Der Zungenfrequenzmesser besteht aus einer Reihe elastischer Stahlzungen mit verschiedenen Eigenfrequenzen. Bei Anlegen einer Wechselspannung (↗ S. 62) an den Elektromagneten des Gerätes zeigt die Zunge den stärksten Ausschlag, für die $f_E = f_0$.
Resonanzverminderung. In Arbeitsräumen mit rhythmisch arbeitenden Maschinen (Schreibmaschinen, Webstühle) werden zur Verminderung der Geräuschbelästigung „schallschluckende" Bauteile an den Wänden und Decken angebracht. Diese Bauteile bestehen aus elastischen Stoffen. Bei Auftreffen von rhythmischen Schallwellen dämpfen sie sehr stark, weil die Eigenfrequenz dieser Bauteile sehr weit unter den Frequenzen der zu dämpfenden Schallwellen liegt. Dadurch wird sehr wenig Energie reflektiert.





Elektromagnetische Schwingungen

Eine gesicherte Energieversorgung ist in einem hochindustrialisierten Land wie z. B. der DDR eine Notwendigkeit. Der Energietransport erfolgt in einem weitverzweigten internationalen Verbundnetz durch elektrischen Wechselstrom. Die bei der Energieumwandlung in den Generatoren induzierte Spannung und die Stromstärke ändern sich periodisch.



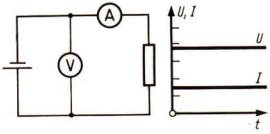


Bild 61/2

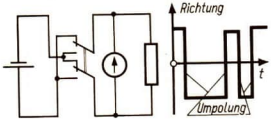


Bild 61/3

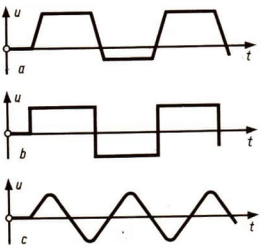


Bild 61/4

Der elektrische Wechselstrom

Eine Gleichspannungsquelle (galvanisches Element) liefert einen elektrischen Strom, der in einem Stromkreis immer gleiche Richtung besitzt. Spannung U und Stromstärke I ändern ihren Betrag zeitlich nicht (Bild 61/2).
Wenn die *elektrischen* Größen Spannung U und Stromstärke I periodisch geändert werden, dann bezeichnet man diesen Vorgang als **elektrische Schwingung.**
Eine elektrische Schwingung wird durch folgenden Versuch herbeigeführt:

Mit einem Umschalter wird der Leiterkreis umgepolt. Der Zeiger des Galvanometers mit Nullpunktmittellage zeigt einmal nach links und einmal nach rechts, je nachdem, wie der Leiterkreis gepolt ist. Die Richtung des Stromes im Leiterkreis wird gewechselt. 5

Der im Versuch 5 erzeugte Strom wird als *Wechselstrom* bezeichnet. Beim Umpolen der Spannungsquelle ändert sich nur die Richtung des Stromes, die Stromstärke und die Spannung haben einen konstanten Maximalwert.
Nach Versuch 5 entstehen in einem Diagramm keine Wechselstromkurven, die der grafischen Darstellung einer harmonischen Schwingung (↗ S. 52) ähnlich sind.
Eine wichtige Sonderstellung unter den Kurvenformen nimmt die sinusförmige Spannungskurve beziehungsweise die sinusförmige Stromstärkekurve ein (Bild 62/1). Solch eine Kurvenform wurde bei der harmonischen Schwingung (↗ S. 50) bereits untersucht und eine Gleichung dafür entwickelt.

In der Praxis ist man bemüht, solche harmonischen Wechselspannungen zu erzeugen.

Momentanwert der Wechselspannung. Mit einem Oszillografen kann man nachweisen, daß die dem Wechselstromnetz entnommene Spannung eine zeitlich veränderliche Größe ist und durch eine sinusförmige Spannungskurve im Oszillografen angezeigt wird. Das bedeutet, daß der Wechselstrom im Stromversorgungsnetz ein harmonischer Wechselstrom ist.

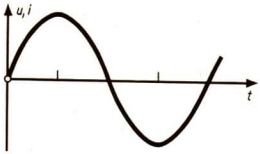


Bild 62/1

- *Formulieren Sie in Worten die Gleichung für den Momentanwert der Auslenkung eines Schwingers!*

Die veränderliche physikalische Größe ist in diesem Fall die Spannung u, die im Gegensatz zur Gleichspannung U mit kleinem Buchstaben gekennzeichnet wird.
Die Gleichung lautet analog zu Gleichung (9) für den

Momentanwert der Wechselspannung	$u = u_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$ (18)

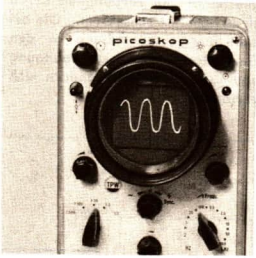


Bild 62/2 Oszillografenschirmbild mit angezeigter harmonischer Wechselspannung

Momentanwert der Wechselstromstärke. Befindet sich in einem von Wechselstrom durchflossenen Stromkreis ein Gerätewiderstand wie z. B. ein Schichtwiderstand, dann fließt ein Strom, dessen Stromstärke nach dem Ohmschen Gesetz von den Größen u und R abhängt. Die Größe R ist konstant, während die Größe u eine periodisch veränderliche Größe darstellt, es besteht die Beziehung

$i = f(u)$.

Daraus wird abgeleitet, daß auch die Stromstärke im Wechselstromkreis eine harmonische Schwingung ist, und man erhält die Gleichung für den

Momentanwert der Wechselstromstärke	$i = i_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$ (19)

Kenngrößen des Wechselstroms. Wechselspannung u und Wechselstromstärke i sind periodische Funktionen der Zeit und stellen damit elektrische Schwingungen dar.

$u = f_1(t)$ (20)
$i = f_2(t)$ (21)

Die Gleichung (9) für den Momentanwert der Auslenkung und die Gleichung (18) für den Momentanwert der elektrischen Wechselspannung sowie die Gleichung (19) für den Momentanwert der elektrischen Wechselstromstärke zeigen eine Übereinstimmung des Aufbaus der mathematischen Glieder. Die allgemeingültige Gleichung für den Momentanwert bei einer beliebigen harmonischen Schwingungsart lautet:

Momentanwert einer sich zeitlich periodisch verändernden physikalischen Größe	$x = x_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$ (22)

Bei dieser allgemeingültigen Gleichung ist zu beachten, daß sie nur gelten kann, wenn ein zeitlich periodischer harmonischer Vorgang vorliegt. Diese Bedingung ist immer dann als erfüllt zu betrachten, wenn eine gleichförmige Kreisbewegung mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$ auftritt. In den Gleichungen (18), (19) und (22) ist die Kreisfrequenz enthalten. Der von den Kraftwerken den Energieabnehmern gelieferte elektrische Wechselstrom mit der Frequenz $50\ s^{-1}$ hat eine Kreisfrequenz von

Gegeben:

$f = 50\ s^{-1}$

Gesucht:

ω

Lösung:

$\omega = 2\pi \cdot f$

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50\ s^{-1}$

$\underline{\underline{\omega = 314\ s^{-1}.}}$

Die **Frequenz des Wechselstromes** ist international eingeführt und wird durch eine konstante Drehzahl in den Generatoren von z. B. $n = 3000\ min^{-1}$ erreicht.

Errechnen Sie die Periode des elektrischen Wechselstroms mit der Frequenz 50 Hz!

Gegeben:

$f = 50\ s^{-1}$

Gesucht:

T

Lösung:

$T = \frac{1}{f}$

$T = \frac{1}{50\ s^{-1}}$

$\underline{\underline{T = 0{,}02\ s}}$

Erzeugung des Wechselstromes

Induktion einer Wechselspannung. Im Physikunterricht der Klasse 9 wurden elektrische und magnetische Felder als Träger von Energie untersucht. Dabei wurde die Induktion einer elektrischen Spannung bei der Bewegung eines elektrischen Leiters durch ein Magnetfeld bzw. eines Magnetfeldes an einem elektrischen Leiter vorbei experimentell demonstriert. Die Erkenntnis daraus war:
Mechanische Arbeit wird umgewandelt in elektrische Arbeit.

- *Wiederholen Sie mit „Physik in Übersichten" die Begriffe Induktionsvorgang, Lenzsches Gesetz, Induktionsgesetz!*

Der Wechselstromgenerator. Die einfachste Weise, Wechselspannungen entsprechend Bild 62/1 zu erzeugen, besteht darin, eine ebene Leiterschleife oder eine Spule in einem homogenen Magnetfeld mit gleichbleibender Kreisfrequenz zu drehen (Bild 65/1). Der von der Leiterschleife umschlossene Teil des Magnetfeldes wird dabei ständig vergrößert oder verkleinert. Die Änderung des von der Leiterschleife umschlossenen Teiles des Magnetfeldes ist ein Maß für die induzierte Spannung u. Hierbei ist die induzierte Spannung am größten, wenn die durch das Magnetfeld geführten Teile der Leiterschleife rechtwinklig zu den Feldlinien bewegt werden. Steht die Ebene der Leiterschleife (Bild 65/1) genau senkrecht auf den Feldlinien, wechselt die Polarität der induzierten Spannung, und die Richtung des Stromes kehrt sich um.
Die technische Verwirklichung dieses physikalischen Prinzips zeigt Bild 65/1. Eine Spule wird in einem Magnetfeld gedreht, so daß der Betrag der von der Spule umschlossenen Fläche, die vom Magnetfeld erfaßt wird, in Abhängigkeit von der Stellung im Magnetfeld verändert wird. Diese Veränderung erfolgt bei gleichmäßiger Drehbewegung zeitlich periodisch; es wird eine harmonische Wechselspannung induziert.
Aus technischen Gründen ist es zweckmäßig, solche Induktionsmaschinen nach folgendem Prinzip zu bauen (Bild 64/1):
Das Magnetfeld erzeugt man in einem drehbaren Rotor (Leiterschleife) durch Anlegen einer Gleichspannung. Bei der Drehung des Rotormagnetfeldes wird in den feststehenden Statorspulen eine Wechselspannung induziert. Die dabei aufgewendete mechanische Energie wird bei der Induktion in elektrische Energie eines Wechselstromes umgewandelt.

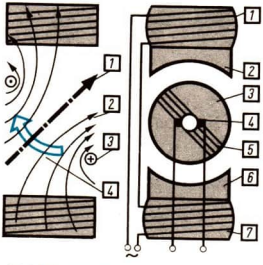


Bild 64/1 Wechselstromgenerator

Physikalisches Prinzip
1 Richtung des Rotorfeldes
2 Rotorfeldlinien
3 Rotorspule
4 Drehbewegung

Technischer Aufbau
1, 7 Statorspule
2, 6 Polschuh
3 Rotor
4 Schleifkontakt (Stromzuführung)
5 Rotorspule

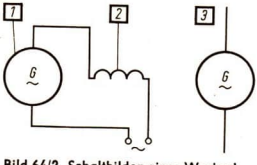


Bild 64/2 Schaltbilder eines Wechselstromgenerators
1 Rotor
2 Stator
3 Symbol eines Generators

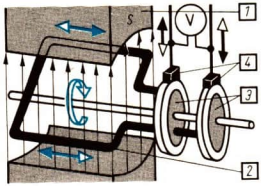


Bild 65/1 Prinzip eines Wechselstromgenerators mit (feststehenden) Statorspulen (1) und einer drehbaren Induktionsspule (2). Die induzierte Spannung kann an den beiden Schleifringen (3) gemessen werden. Der elektrische Wechselstrom wird von den Schleifringen durch die Bürsten (4) abgenommen. Bei Hochspannungsgeneratoren würden an den Bürsten starker Verschleiß und Funkenbildung eintreten, deshalb bevorzugt man in der Technik Generatoren, die nach dem Prinzip im Bild 64/1 konstruiert sind. Bei diesen wird über die Bürsten eine Gleichspannung von nur etwa 200 V zugeführt, während der abgeführte Strom eine Spannung von z. B. 10000 V und eine Stromstärke von z. B. 7000 A hat

Energieumwandlung im Elektrogenerator. Dem Generator wird mechanische Energie durch eine Antriebsmaschine zugeführt. Durch die physikalische Erscheinung der Induktion bei der Drehung des Rotors wird elektrische Energie in einem elektrischen Leiter erzeugt. Ein Teil der zugeführten Energie wird durch Reibung in den Rotorlagern, an den Bürsten und in der den Rotor umgebenden Luft in Wärme und Bewegungsenergie der Luft umgewandelt. Dieser Teil der zugeführten Energie geht für die Umwandlung in elektrischer Energie verloren. Ein weiterer Teil der Energie muß als Wärme durch Kühlung aus dem Generator abgeleitet werden, weil durch die bei der Induktion in den Eisenkörpern entstehenden Wirbelströme und durch den elektrischen Widerstand der Leiter dieser Teil in Wärme umgewandelt wird und damit für die Umwandlung in elektrische Energie verloren geht (Bild 65/2).

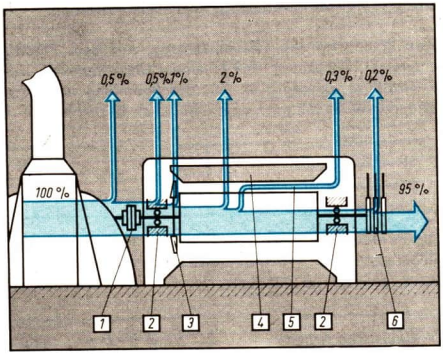


Bild 65/2 Energieumwandlung im Elektrogenerator
1 – Kupplung
2 – Lager
3 – Lüfter
4 – Stator
5 – Kühlgas
6 – Schleifkontakte

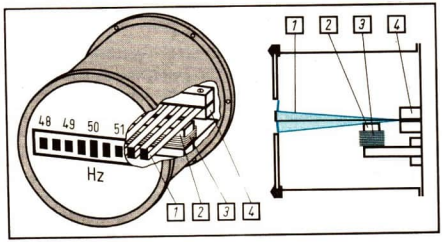


Bild 65/3 Zungenfrequenzmesser

Messen der Wechselstromfrequenz. Die elektrische Wechselspannung ist eine zeitlich periodisch veränder-

liche Größe. Die Veränderung der Größe u kann mit Hilfe des *Elektronenstrahloszillografen* als u-t-Kurve sichtbar gemacht werden. Ein anderes, weit verbreitetes Anzeigegerät ist der *Zungenfrequenzmesser* (Bild 65/3). Es funktioniert nach folgendem Prinzip: Ein Wechselstrom erzeugt zwischen den Polen eines Elektromagneten (2, 3) ein wechselndes Magnetfeld gleicher Frequenz, das mit dem *Zungenfrequenzmesser* nachgewiesen werden kann. In diesem befindet sich eine Reihe elastischer Stahlzungen (1) unterschiedlicher Eigenfrequenz. Bei Resonanz einer bestimmten Zunge kann die entsprechende Frequenz des Wechselstromes abgelesen werden. Die in Resonanz schwingende Zunge zeigt den weitesten Ausschlag (5) am vorn im Sichtfeld (4) des Meßgerätes sichtbaren Ende der Zunge.

Die Gesetzmäßigkeiten im Wechselstromkreis

Zur Wiederholung (Gleichstrom). Aus dem Physikunterricht ist bekannt, daß in einem *Gleichstromkreis* die Stromstärke abhängig ist von der Spannung und dem Widerstand. Es gilt nach dem Ohmschen Gesetz für die

Stromstärke (Gleichstrom)	$I = \frac{U}{R}$	(23)

Die in einem solchen Gleichstromkreis vom elektrischen Strom verrichtete Arbeit ist gleich dem Produkt aus Spannung, Stromstärke und Zeit.

Elektrische Arbeit (Gleichstrom)	$W_{el} = U \cdot I \cdot t$	(24)

Das Diagramm für die Arbeit eines Gleichstromes zeigt Bild 66/1. Von der Zeit t_1 bis zur Zeit t_2 wurde von diesem Gleichstrom die Arbeit verrichtet, die der farbigen Fläche im Diagramm entspricht.

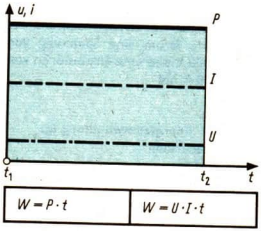


Bild 66/1

Die Effektivwerte des Wechselstroms. Die Stromstärke i und die Spannung u eines elektrischen Wechselstroms lassen sich mit den üblichen Meßgeräten nicht unmittelbar messen, da sich diese Größen fortwährend ändern (Bild 62/1).
Die üblichen Gleichstrommeßgeräte sind für Wechselstrommessungen unbrauchbar. Die Zeiger dieser Geräte

können sich auf Grund ihrer mechanischen Trägheit nicht schnell genug bewegen und bleiben demzufolge auf der Nullmarke der Skale stehen, unabhängig davon, wie groß die Maximalwerte der Wechselspannung oder der Wechselstromstärke sind. Vergleichbar mit den einfach zu messenden Gleichstromgrößen U und I sind nur bestimmte Mittelwerte der Wechselstromgrößen u und i.
Diese Mittelwerte werden als **Effektivwerte** bezeichnet.
Die Mittelwerte der Wechselstromgrößen u und i werden mit besonderen Wechselstrommeßgeräten gemessen. Solche Meßgeräte sind das *Rundspul-Dreheisenmeßgerät* und das *Drehspulmeßgerät* mit vorgeschaltetem Gleichrichter.

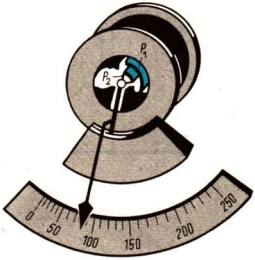


Bild 67/1 Rundspul-Dreheisenmeßgerät Die Platten P_1 und P_2 werden gleichnamig magnetisiert und stoßen einander ab. Die Feder für die rücktreibende Kraft ist nicht mit dargestellt. Wird das Gerät von einem Wechselstrom durchflossen, so zeigt es einen Mittelwert an. Dieser Mittelwert ist der Effektivwert des Wechelstroms

Ein Weicheisenkörper wird von einer stromdurchflossenen Spule angezogen; die Federkraft wirkt der magnetischen Anziehungskraft entgegen, und es bildet sich ein Kräftegleichgewicht heraus. Die jeweilige Federdehnung ist ein Maß für die effektive Wechselstromstärke (Bild 67/2). 6

Erklären Sie die Wirkungsweise eines Rundspul-Dreheisenmeßgerätes und demonstrieren Sie seine Wirkungsweise an einem Modell!
Warum sind Dreheisengeräte nach entsprechender Eichung für die Messung in Gleich- und Wechselstromkreisen geeignet?

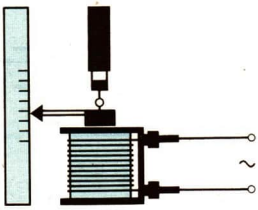


Bild 67/2

An den Meßgeräten für Wechselstromgrößen werden stets nur die Effektivwerte angezeigt und abgelesen. Wenn im folgenden die Spannung U und die Stromstärke I des Wechselstromes genannt werden, sind stets die Effektivwerte gemeint.
Daraus kann man für einen harmonischen Wechselstrom ableiten:
$U < u_{max}$ $I < i_{max}$

Die Leistung im Gleichstromkreis. Fließt in einem geschlossenen Leiterkreis ein elektrischer Strom, so wird die elektrische Energie je nach benutztem Schaltelement in andere Energieformen umgewandelt – in einer Glühlampe beispielsweise in Licht- und Wärmeenergie, in einem Elektromotor vorwiegend in mechanische Energie.
Mit Hilfe eines Stromstärkemeßgerätes und eines Spannungsmeßgerätes läßt sich die elektrische Leistung in einem Gleichstromkreis experimentell bestimmen.

Mit je einem Meßgerät für Stromstärke und Spannung wird die Leistung einer Glühlampe ermittelt. Geben Sie dazu das entsprechende Schaltbild an! 7

Suchen Sie aus „Physik in Übersichten" die Gleichung zur Berechnung der elektrischen Leistung heraus! Geben Sie deren Inhalt mit eigenen Worten wieder!

Um die elektrische Leistung direkt zu ermitteln, wird vielfach ein Leistungsmeßgerät (Wattmeter) verwendet. An einem solchen Meßgerät kann man im Gegensatz zur (indirekten) Stromstärke-Spannungs-Meßmethode die Leistung unmittelbar ablesen.
Im Bild 68/1 ist eine Versuchsanordnung zur direkten Leistungsbestimmung mit einem Leistungsmeßgerät in einem Gleichstromkreis wiedergegeben. Zwecks Kontrolle sind zusätzlich ein Meßgerät für Stromstärke und für Spannung eingeschaltet. Das Produkt $U \cdot I$, das indirekt nach der Stromstärke-Spannungs-Meßmethode ermittelt wird, ist gleich dem Wert, den das Leistungsmeßgerät anzeigt.
Oft ist es zweckmäßig, in einem Diagramm die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Zeit darzustellen (Bild 66/1).
Man trägt dazu Spannung und Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit grafisch auf und bildet für jede Zeit das Produkt $U_t \cdot I_t$.
Bei gleichbleibender Spannung und Stromstärke erhält man als Leistungs-Zeit-Darstellung eine Gerade parallel zur Zeitachse. Die farbige Fläche ist dann ein Maß für die elektrische Arbeit von der Zeit t_1 bis zur Zeit t_2 (Bild 68/2).

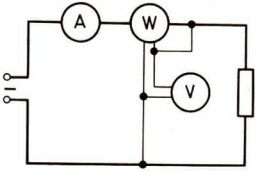


Bild 68/1

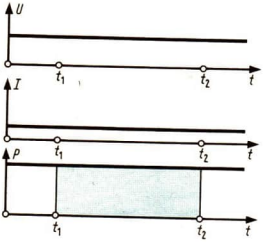


Bild 68/2

Suchen Sie aus „Physik in Übersichten" die Gleichung zur Berechnung der elektrischen Arbeit heraus! Begründen Sie die Gleichung mit Hilfe des Leistungs-Zeit-Diagramms!

Die Wechselstromwiderstände. Der Widerstand eines Schaltelements in einem Gleichstromkreis wird z. B. mit Hilfe einer Stromstärke- und einer Spannungsmessung bestimmt. Legt man an ein Ohmsches Schaltelement (Schichtwiderstand) statt einer Gleichspannung U eine Wechselspannung mit dem Effektivwert U, so fließt in dem Stromkreis ein Wechselstrom, dessen Effektivwert mit dem Wert des Gleichstroms übereinstimmt (Bild 68/3).
Bei einem Schaltelement mit Ohmschen Widerstand R in einem Stromkreis sind also bei gleichen Spannungsbeträgen die Gleich- und Wechselstromstärken gleich groß, es gilt allgemein:

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

Ein Ohmsches Schaltelement bildet im Wechselstromkreis wie im Gleichstromkreis nur einen Ohmschen Widerstand.

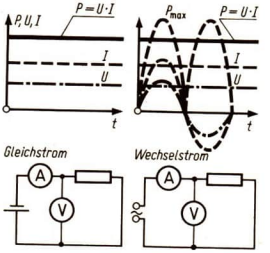


Bild 68/3 Vergleich von Spannung, Stromstärke, Leistung und Arbeit eines Wechselstromes mit den entsprechenden Größen eines Gleichstromes

Aus der Darstellung in Bild 68/3 geht hervor, daß die Leistung eines Wechselstromes in einem durch einen Ohmschen Widerstand geschlossenen Stromkreis und die Leistung eines Gleichstromes in einem solchen Stromkreis nach derselben Gleichung berechnet werden können.

Leistung eines Wechselstromes (Ohmscher Widerstand)	$P = U \cdot I$	(25)

Erklären Sie die Gleichheit der Gleichung (25) mit der Gleichung für die Leistung eines Gleichstromes nach Bild 68/3!

Die meisten elektrischen Geräte enthalten aber nicht nur Ohmsche Widerstände; es sind auch Kondensatoren und Spulen eingebaut.
Im Gegensatz zu einem Schichtwiderstand zeigt eine Spule in einem Wechselstromkreis eine andere Wirkung als in einem Gleichstromkreis.

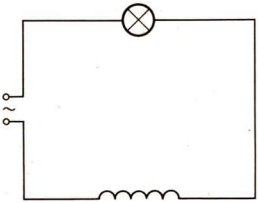


Bild 69/1 Spule im Wechselstromkreis

Eine 60-W-Glühlampe und eine Spule mit 1 500 Windungen werden in Reihe geschaltet und an das 50-Hz-Wechselstromnetz gelegt (Bild 69/1). Die Glühlampe leuchtet mit einer bestimmten Helligkeit. Wird die Spule ohne Änderung des Ohmschen Widerstandes auf einen geschlossenen Eisenkern gesetzt, dann sinkt die Stromstärke, und die Glühlampe erlischt. Wird an Stelle der Wechselspannung eine entsprechende Gleichspannung verwendet, tritt eine solche Erscheinung nicht auf; die Glühlampe leuchtet in beiden Fällen (Spule mit und ohne Eisenkern) mit gleicher Helligkeit.

Die Ursache dieses Vorganges ist folgende:
Es tritt eine wechselnde Selbstinduktionsspannung auf, die der anliegenden Wechselspannung stets entgegengerichtet ist (Lenzsches Gesetz). Damit erreicht die Wechselstromstärke nicht den gleichen Wert wie im Gleichstromkreis.
Je größer die Induktivität im Wechselstromkeis ist, um so größer ist die Gegenspannung und um so geringer ist die Stromstärke. Man bezeichnet die Ursache dieser Wirkung als **induktiven Widerstand** X_L.

Ein induktives Schaltelement (Spule) bildet im Gleichstromkreis zusätzlich zu dem ihm eigenen Ohmschen Widerstand keinen Widerstand, im Wechselstromkreis dagegen bildet ein induktives Schaltelement zusätzlich zu seinem Ohmschen Widerstand einen induktiven Widerstand.

Ähnlich wie eine Spule zeigt auch ein Kondensator in einem Wechselstromkreis eine andere Wirkung als in einem Gleichstromkreis.

Schaltet man einen Kondensator in einen Gleichstromkreis, fließt nur kurzzeitig ein Gleichstrom (Ladestrom), der sowohl vor als auch hinter dem Kondensator nachweisbar ist (Bild 70/1).

Beim Aufladen des Kondensators tritt zunächst eine hohe Stromstärke auf. Mit zunehmender Ladung auf den Kondensatorplatten steigt die Kondensatorspannung, sie wirkt als Gegenspannung zur Spannungsquelle. Infolge der kleiner werdenden Spannungsdifferenz zwischen Spannungsquelle und Kondensator wird die Ladestromstärke ständig geringer. Ist die Kondensatorspannung gleich der Ladespannung, so fließt kein Strom mehr (Bild 70/2). Wird die Spannungsquelle umgepolt, so werden die Ladungen auf den Kondensatorplatten zunächst abtransportiert, danach wiederholt sich der Ladeprozeß wie im ersten Falle, nur daß die Platten jetzt umgekehrt aufgeladen werden. Wechselt man die Polarität der Spannungsquelle hinreichend schnell (Wechselspannung), so fließen in dem Stromkreis fortwährend Ladeströme entgegengesetzter Richtung, allerdings, durch die Ladevorgänge bedingt, **zeitlich verschoben** gegenüber dem Strom in einem Stromkreis ohne Kondensator. Der Richtungswechsel der Ladeströme und die sich ändernde Stromstärke führen zu einem Wechselstromfluß im Kondensatorkreis. Die Kapazität des Kondensators bestimmt dabei die effektive Stromstärke; er bildet damit für einen Wechselstrom einen Widerstand.

Wird also eine Wechselspannung an den Kondensator gelegt, fließt in dem Stromkreis fortwährend ein Wechselstrom. Die Spannung erreicht ihr Maximum erst zu einer späteren Zeit als die Stromstärke. Je größer die Kapazität des Kondensators ist, um so größer ist die Stromstärke.

Man bezeichnet die Ursache dieser Wirkung als **kapazitiven Widerstand** X_C.

9 Schaltet man beispielsweise zwei Glühlampen und einen Kondensator geeigneter Kapazität hintereinander in einen Wechselstromkreis, dann glühen die Lampenwendel mehr oder weniger hell. Wird die Kapazität des Kondensators vergrößert, so steigt die Stromstärke, und die Glühlampen leuchten heller (Bild 70/3).

Das Verhalten eines Wechselstromes bei einem kapazitiven bzw. einem induktiven Widerstand im Stromkreis zeigt auch der Versuch 10 (Bild 70/4).

10 Bei Gleichstrom leuchtet nur die Lampe im Stromkreis mit dem induktiven Widerstand.

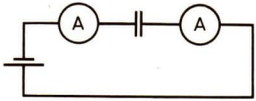


Bild 70/1

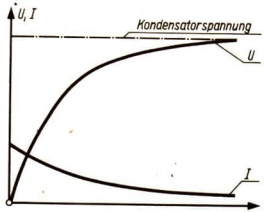


Bild 70/2

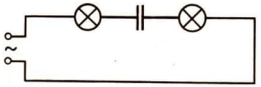


Bild 70/3

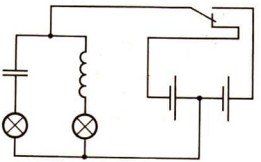
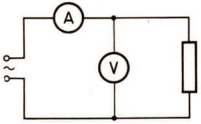
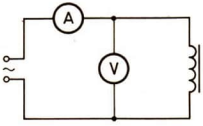
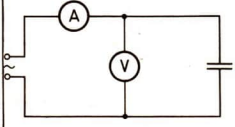
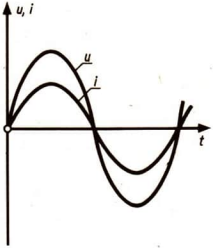
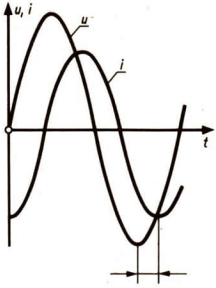
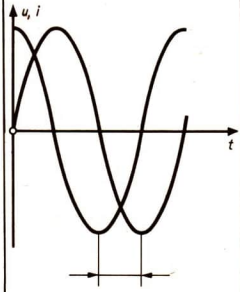


Bild 70/4

Mit steigender Schaltfrequenz des Ein- und Ausschaltens beginnt auch die Lampe im Stromkreis mit dem kapazitiven Widerstand zu leuchten.

> Ein kapazitives Schaltelement (Kondensator) bildet im Gleichstromkreis einen unendlich großen Widerstand. Im Wechselstromkreis ist der kapazitive Widerstand abhängig von der Kapazität des Schaltelementes.

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Wirkung von Schaltelementen mit einem rein Ohmschen, rein kapazitiven oder rein induktiven Widerstand in einem Wechselstromkreis.

Ohmscher Widerstand	Induktiver Widerstand	Kapazitiver Widerstand
		
Zwischen der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve besteht keine zeitliche Verschiebung. Spannung und Stromstärke schwingen synchron.	Zwischen der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve besteht eine Verschiebung; das Spannungsmaximum tritt **vor** dem Stromstärkemaximum auf.	Zwischen der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve besteht eine Verschiebung; das Spannungsmaximum tritt **nach** dem Stromstärkemaximum auf.
		

Synchron sich verändernde Größen (Spannung, Stromstärke) erreichen zur selben Zeit ihre entsprechenden Maximal- und Minimalwerte; die Absolutwerte können dabei unterschiedlich sein. Verändern sich physikalische Größen nicht synchron zueinander, dann erreichen sie ihre Maximal- und Minimalwerte zu verschiedenen Zeiten. Die Zeitverschiebung wird durch die Zeitdifferenz oder die Winkeldifferenz angegeben (Bild 72/1).

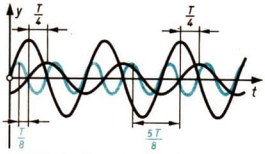


Bild 72/1 Zeitliche Verschiebung harmonischer Größen

> Die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Schaltelemente in einem Gleichstromkreis beziehungsweise in einem Wechselstromkreis zeigen, daß die Gesetze des Gleichstromkreises nicht ohne weiteres auf den Wechselstromkreis übertragen werden können.

Bei einer solchen zeitlichen Verschiebung der Höchstwerte der Spannung und der Stromstärke verschieben sich auch alle anderen Werte dieser Größen gleichsinnig. Zeichnet man die Kurven dieser Größen in ein Zeitdiagramm, dann erscheinen diese Kurven gegeneinander verschoben; man spricht deshalb in solchen Fällen von der zeitlichen Verschiebung der Spannungs- und Stromstärkekurve.

Arbeit und Leistung im Wechselstromkreis

Für den Gleichstromkreis wurde die Leistung in Abhängigkeit von der Zeit in einem Leistungs-Zeit-Diagramm bereits dargestellt (↗ S. 66). Ein entsprechendes Diagramm kann man auch für den Wechselstromkreis zeichnen. Dazu wird das Produkt aus u_t und i_t für jede Zeit gebildet.
Für ein Schaltelement mit einem Ohmschen Widerstand ist das Diagramm im Bild 72/2 gezeichnet.
Die Konstruktion führt auf einen zeitlich-periodischen Leistungsverlauf. Die Wechselstromleistung schwankt periodisch zwischen 0 und dem Maximalwert

$p_{max} = u_{max} \cdot i_{max}$

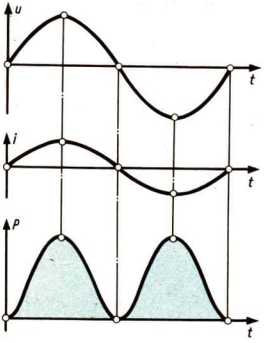


Bild 72/2

Begründen Sie, daß die Leistungskurve nur im positiven Bereich verläuft, obwohl Spannung und Stromstärke auch negative Werte annehmen!

Die Fläche unterhalb der Leistungskurve war für den Gleichstrom ein Maß für die elektrische Arbeit. Entspre-

Bild 73/1

chend ist auch im Wechselstromkreis die farbige Fläche im Bild 72/2 ein Maß für die elektrische Arbeit.
Die Arbeit im Wechselstromkreis kann man mit Hilfe der Effektivwerte U und I (↗ S. 67) berechnen. Für ein Schaltelement mit einem Ohmschen Widerstand gilt:

Elektrische Arbeit (Wechselstrom, Ohmscher Widerstand)	$W_{el} = U \cdot I \cdot t$	(26)

Wird zusätzlich ein Kondensator in den Wechselstromkreis geschaltet (Bild 73/1), so tritt zwischen Spannungs- und Stromstärkekurve eine zeitliche Verschiebung auf (↗ S. 71).
Das Leistungs-Zeit-Diagramm zeigt jetzt den in Bild 73/2 dargestellten Verlauf. Die Leistungskurve liegt z. T. über und z. T. unter der Zeitachse.
In der Zeit, in der die Leistungskurve oberhalb der Zeitachse liegt und der Flächeninhalt zwischen Kurve und Zeitachse positiv ist, wird von der Spannungsquelle Energie an den Stromkreis abgegeben; in der Zeit dagegen, in der die Kurve unterhalb der Zeitachse liegt und der Flächeninhalt zwischen Leistungskurve und Zeitachse negativ ist, fließt mit dem Abbau des elektrischen Feldes im Kondensator elektrische Energie aus dem Stromkreis in die Spannungsquelle zurück. Die von der Spannungsquelle abgegebene Energie während einer Periode ist durch die Flächendifferenz der farbigen „plus"-Fläche und der farbigen „minus"-Fläche gegeben (Bild 73/2). Ähnlich wie bei einem Kondensator liegen die Verhältnisse bei einer Spule mit ihrem induktiven und ihrem Ohmschen Widerstand. Der Energierückfluß zur Spannungsquelle wird hier durch den jeweiligen Zusammenbruch des Magnetfeldes der Spule hervorgerufen.
Liegt in einem Wechselstromkreis ein Kondensator (kapazitiver Widerstand), dann beträgt die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve $\frac{T}{4}$. Die entsprechende Leistungskurve ist im Bild 73/3 dargestellt.

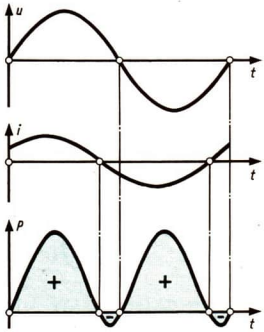


Bild 73/2

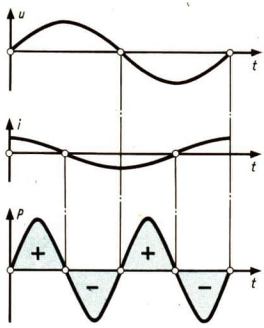


Bild 73/3

Diskutieren Sie die Leistungskurve nach Bild 73/3!

Vergleichen Sie die „plus"-Fläche mit der „minus"-Fläche! Welchen Schluß können Sie daraus für die an den Stromkreis abgegebene und an die Spannungsquelle zurückgegebene elektrische Energie ziehen?

Es sei angenommen, daß eine Wechselspannungsquelle mit einem rein induktiven Widerstand belastet wird. Auch in diesem Fall beträgt die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve $\frac{T}{4}$.

● *Zeichnen Sie die Stromstärke-Zeit-Kurve und die Spannungs-Zeit-Kurve bei induktiver Belastung!*
Konstruieren Sie die Leistungskurve bei induktiver Belastung und diskutieren Sie ihren physikalischen Inhalt!

Zum Messen der Leistung im Wechselstromkreis benutzt man einen Leistungsmesser. Um das Verfahren der Leistungsmessung im Wechselstromkreis zu zeigen, führt man den Versuch (Bild 68/1) mit Wechselstrom durch.

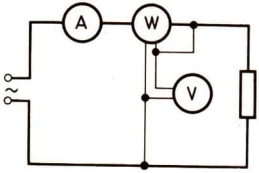


Bild 74/1

11 ▼ In den Wechselstromkreis wird zunächst ein Schaltelement mit einem Ohmschen Widerstand gelegt (Bild 74/1). Bildet man auf Grund einer Stromstärke-Spannung-Messung das Produkt aus U und I und vergleicht es mit dem vom Leistungsmesser angezeigten Effektivwert P, so stimmen beide Werte überein.

12 ▼ Es wird zusätzlich ein Kondensator in den Stromkreis geschaltet. Der vom Leistungsmesser angezeigte Wert ist kleiner als das Produkt aus U und I.

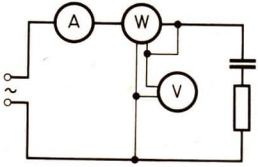


Bild 74/2

Entsprechend der eingesetzten Meßgeräte erhält man zwei Meßergebnisse für die Leistung.
Das aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke gebildete Produkt nennt man die **Scheinleistung** P_S, ihre Einheit ist das Voltampere (VA). Die vom Leistungsmesser angezeigte Leistung bezeichnet man als **Wirkleistung** P_W, ihre Einheit ist das Watt (W).

$$P_S = U \cdot I \qquad (27)$$

$$P_W < P_S \qquad (28)$$

Der Unterschied zwischen Wirkleistung und Scheinleistung ist durch die zeitliche Verschiebung zwischen Spannungs- und Stromstärkekurve bedingt.

▶ Wirkleistung	$P_W = P_S \cdot \cos\varphi$	(29)
	$P_W = U \cdot I \cdot \cos\varphi$	(30)

Leistungsfaktor	$\cos\varphi = \frac{P_W}{P_S}$	(31)

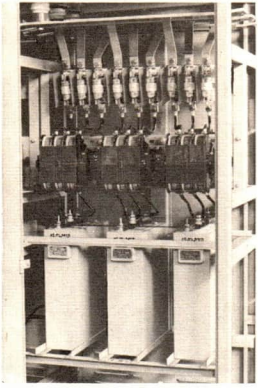
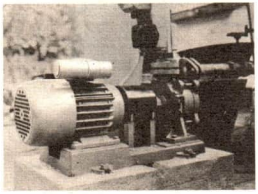


Bild 75/1 Kondensatoren in einer Anlage zur Entlastung des Leitungsnetzes

Der Leistungsfaktor ist bei harmonischen Wechselstromgrößen gleich $\cos \varphi$.
Aus dem Mathematikunterricht ist bekannt, daß gilt:
$0 \leqq |\cos \varphi| \leqq 1$

Wenden Sie diese Beziehung auf Gleichung (29) an und erörtern Sie, welche Wirkleistungen sich für die Extremwerte des Leistungsfaktors ergeben!

Die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve spielt in der Praxis eine außerordentlich große Rolle. Elektrische Maschinen enthalten Spulen zur Erzeugung von magnetischen Feldern. Die zum Aufbau des magnetischen Feldes benötigte Energie („positive" Fläche) wird beim Zusammenbrechen des magnetischen Feldes wieder in Energie des elektrischen Stromes umgewandelt („negative" Fläche) und an das Netz zurückgegeben.
Bei einer zeitlichen Verschiebung zwischen der Spannungs- und der Stromstärkekurve wird fortwährend mehr Energie im Leitungsnetz hin- und hertransportiert als am Einsatzort entnommen wird. Das erfordert in den Kraftwerken Generatoren mit wesentlich größerer Leistung und führt zu einer starken Belastung des Leitungsnetzes sowie zu erhöhten Leitungsverlusten durch die Umwandlung elektrischer Energie in Wärme in den Leitungen. Man ist deshalb bemüht, die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve im Leitungsnetz so niedrig wie möglich zu halten. Die durch einen induktiven Widerstand hervorgerufene zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve kann durch Kondensatoren ausgeglichen werden, da Kondensatoren eine entgegengesetzte zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve bewirken (S. 71). In den Betrieben werden deshalb Kondensatoren parallel zu den elektrischen Maschinen geschaltet. Damit wird die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke und Spannung verringert (Bild 75/1).



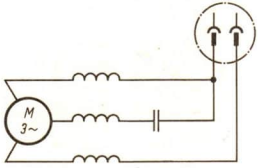


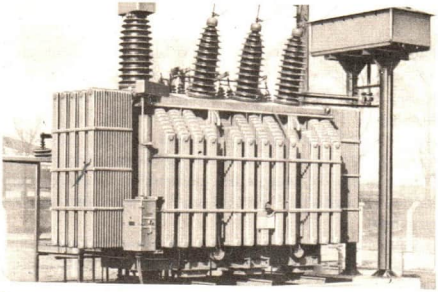
Bild 75/2 Drehstrommotor mit Kondensator zum Anschluß an Wechselstrom

Welche ökonomische Bedeutung haben diese Anlagen?

Andererseits ist es möglich, Wechselstrom aus einem Zweileitersystem durch Einschalten eines Kondensators mit einer entsprechenden Schaltung (Bild 75/2) zum Betrieb von Drehstrommotoren zu verwenden. Der Kondensator bewirkt, daß in dem dritten Leiter ein zeitlich verschobener Strom fließt.

Der Transformator

Die bisher betrachteten elektrischen Erscheinungen im Wechselstromkreis stellen zum Teil periodische Veränderungen elektrischer Größen dar. Dabei wurde nicht besonders darauf eingegangen, daß die elektrischen Leiter von elektromagnetischen Feldern umgeben sind, die ebenfalls periodischen Veränderungen unterliegen. Von diesem Abschnitt an werden solche Erscheinungen im besonderen untersucht.



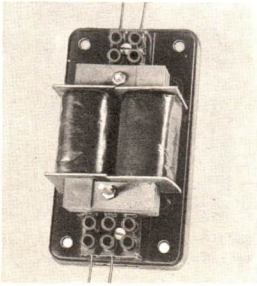


Bild 76/1 Großtransformator
Bild 76/2 Kleintransformator

Aufbau und Wirkungsweise des Transformators. Zur Zeit wird im allgemeinen die Energieversorgung mit Wechselstrom der Energieversorgung mit Gleichstrom vorgezogen, da beim Wechselstrom die Spannungen oder Stromstärken mit Hilfe von Transformatoren den technischen Bedürfnissen leicht angepaßt werden können (Bild 76/1).

Fließt Wechselstrom durch eine Spule, so entsteht im Raum um die Spule herum ein magnetisches Wechselfeld (Bild 76/3). Stellt man unmittelbar neben der Spule eine zweite Spule auf, so daß das Magnetfeld der stromdurchflossenen Spule auch die Windungsflächen der zweiten Spule durchsetzt (Bild 76/4), dann wird in der zweiten Spule eine Wechselspannung induziert. Beide Spulen sind durch das magnetische Feld induktiv gekoppelt. Die elektrische Energie wird durch elektromagnetische Induktion auf die zweite Spule übertragen. Die induktive Kopplung läßt sich verstärken, wenn man beide Spulen auf einen geschlossenen Eisenkern bringt (Bild 77/1). Das von der stromdurchflossenen Spule erzeugte magnetische Feld besteht jetzt fast ausschließlich innerhalb des geschlossenen Eisenkerns. Eine solche Vorrichtung aus Eisenkern und zwei Spulen bezeichnet man als **Transformator.**

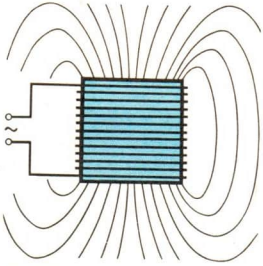


Bild 76/3

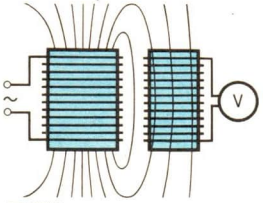


Bild 76/4

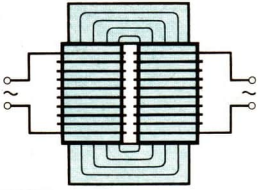


Bild 77/1

Die Spule auf der Eingangsseite wird als Primärspule bezeichnet, die Spule auf der Ausgangsseite heißt Sekundärspule. Die Energieübertragung zwischen Primär- und Sekundärspule wird durch das magnetische Wechselfeld hervorgerufen, eine elektrisch leitende Verbindung zwischen den Spulen besteht bei dieser Transformatorenform nicht.

Im Transformator wird keine Energie gespeichert. Die elektromagnetische Schwingung in der Primärspule erzeugt in der Sekundärspule eine elektromagnetische Schwingung gleicher Frequenz, d. h., der Primärstromkreis erregt im Sekundärstromkreis eine erzwungene elektrische Schwingung.

Spannungsübersetzung. Erhöht man die an der Primärspule eines Transformators liegende Spannung, so erhöht sich auch die Stromstärke des Wechselstromes. Der Strom schwankt jetzt ständig zwischen höheren Werten i_{max}. Es tritt eine größere Stromstärkeänderung auf. Daraus ergibt sich eine stärkere Änderung des magnetischen Feldes. Infolge der elektromagnetischen Induktion ist zu erwarten, daß dann in der Sekundärspule eine größere Spannung entsteht.

Zwischen Sekundärspannung U_2 eines Transformators und Primärspannung U_1 muß ein funktionaler Zusammenhang bestehen: $U_2 = f(U_1)$

Die induzierte Spannung hängt nach dem Induktionsgesetz auch von der Windungsanzahl N_2 der Spule ab, in der diese Spannung induziert wird. Für den Transformator ist deshalb zu erwarten: $U_2 = f(N_2)$

Schließlich kann die Sekundärspannung auch von der Windungsanzahl der Primärspule N_1 abhängen:

$$U_2 = f(N_1)$$

Die Sekundärspannung kann auch von der Form und Beschaffenheit des Eisenkerns abhängen.

Um eine gesetzmäßige Beziehung zwischen der Sekundärspannung U_2 und den Größen U_1, N_1 und N_2 zu ermitteln, sind Meßreihen notwendig, bei denen jeweils nur eine der untersuchten Größen verändert wird, während die übrigen konstant bleiben.

Bei der Auswertung der Meßreihen ist zu prüfen, welche mathematische Beziehung zwischen U_2 und den Größen U_1, N_1 und N_2 besteht.

Dazu werden drei Meßreihen durchgeführt (↗ Schülerexperiment S 3, S. 167):

Meßreihe 1

Abhängigkeit der Sekundärspannung von der Primärspannung,

Meßreihe 2
Abhängigkeit der Sekundärspannung von der Windungsanzahl der Sekundärspule,
Meßreihe 3
Abhängigkeit der Sekundärspannung von der Windungsanzahl der Primärspule.

● *Welche Größen müssen bei den einzelnen Meßreihen konstant bleiben?*

Verwendet man für alle Versuche einen geblätterten, geschlossenen Eisenkern, so hängt die Sekundärspannung nicht vom Eisenkern ab. Die Spannungen werden dabei immer am unbelasteten Transformator gemessen, d. h., wenn im Sekundärkreis kein Strom fließt (Leerlauf).
Man bezeichnet als *Spannungsübersetzung* das Verhältnis von Primärspannung zu Sekundärspannung $\frac{U_1}{U_2}$. Es wird immer am *unbelasteten* Transformator gemessen. Aus den Meßreihen ergibt sich:

Spannungsverhältnis (Leerlauf)	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	(32)

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

In der Praxis werden Transformatoren meist belastet, d. h., es fließt im Sekundärkreis ein Strom.

13 ▼ In den Sekundärstromkreis eines Transformators ist ein Ohmscher Widerstand geschaltet. Es werden die Sekundärspannung und die Sekundärstromstärke für verschiedene Einstellungen des veränderlichen Widerstandes gemessen.

Als Ergebnis aus Versuch 13 erhält man die Feststellung: Mit wachsender Belastung wird die Sekundärspannung des Transformators kleiner.
In einem weiteren Versuch soll festgestellt werden, ob bei Belastung auch im Primärkreis des Transformators Veränderungen auftreten.

14 ▼ In den Primärstromkreis wird ein Strommeßgerät geschaltet, und die Belastung wird verändert (Bild 78/1).

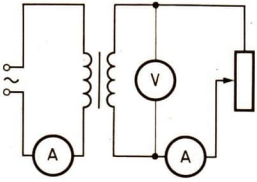


Bild 78/1

Der Versuch 14 zeigt, daß durch Vergrößern der Sekundärstromstärke eine Vergrößerung der Primärstromstärke eintritt. Der Sekundärstromkreis wirkt auf den Primärstromkreis zurück.

Die im Versuch 14 erkannte Rückwirkung läßt sich durch den Satz von der Erhaltung der Energie erklären. Schaltet man in den Sekundärstromkreis eines Transformators z. B. ein Gerät mit einem Ohmschen Widerstand, dann fließt ein Strom. In dem Widerstandsgerät wird dabei elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Diese im Sekundärstromkreis umgewandelte Energie muß zuvor im Primärstromkreis zugeführt werden. Aus der Gleichung zur Berechnung der elektrischen Energie folgt, daß die Stromstärke im Primärstromkreis ansteigen muß.

Stromstärkeübersetzung. Für die weiteren Untersuchungen wird ein Modell benutzt, der *ideale Transformator*. Dieser läßt sich in der Praxis nur annähernd verwirklichen, das Modell ermöglicht es aber, viele Vorgänge vereinfacht darzustellen und besser zu erklären.

Beim idealen Transformator erfolgt die Energieübertragung vom Primärkreis zum Sekundärkreis verlustlos. Aus dem Energieerhaltungssatz ergibt sich deshalb:

Elektrische Energie im Primärstromkreis	=	elektrische Energie im Sekundärstromkreis
$U_1 \cdot I_1 \cdot t \cdot \cos \varphi_1$	$=$	$U_2 \cdot I_2 \cdot t \cdot \cos \varphi_2$

Die elektrische Leistung am idealen Transformator ist:

$$U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \qquad (33)$$

Im allgemeinen ist die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke- und Spannungskurve im Primär- und Sekundärkreis verschieden.

Wird ein Transformator sekundär mit einem Ohmschen Widerstand belastet, so tritt im Sekundärstromkreis keine zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke und Spannung auf. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ hat dann den Wert 1. Wie gezeigt (↗ Versuch 14), ergibt eine Erhöhung der Sekundärstromstärke auch eine Erhöhung der Primärstromstärke. Für große Belastungen durch Ohmsche Widerstände ist auch im Primärstromkreis nur eine Wirkleistung meßbar, d. h., der Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ hat den Wert 1.

Setzen Sie in Gleichung (33) $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = 1$ *!*
Lösen Sie die Gleichung (33) so auf, daß auf der einen Seite nur Spannungen, auf der anderen Seite nur Stromstärken stehen!
Formulieren Sie den Inhalt der Gleichung (33) mit eigenen Worten!

In einem weiteren Experiment soll untersucht werden, wie das Verhältnis der Stromstärken vom Verhältnis der Windungszahlen abhängt.

15 Die Sekundärspule des Transformators ist mit dem Stromstärkemeßgerät A_2 (Bild 80/1) kurzzuschließen; der Innenwiderstand des Meßgerätes kann dabei vernachlässigt werden. Mit Hilfe eines Schiebewiderstandes werden verschiedene Primärstromstärken eingestellt. Die dazugehörigen Stromstärken im Sekundärkreis des Transformators werden am Stromstärkemeßgerät A_2 abgelesen.

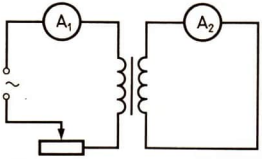


Bild 80/1

Die Auswertung dieses Experimentes ergibt:

Stromstärkeverhältnis (Kurzschluß)	$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$	(34)

Der Wirkungsgrad des Transformators. Aus Gleichung (33) ergibt sich: Beim idealen Transformator ist die Primärleistung gleich der Sekundärleistung.

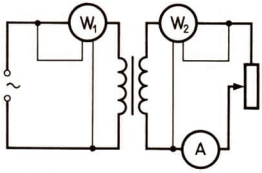


Bild 80/2

16 Bei einem Kleintransformator wird die Primär- und die Sekundärleistung durch zwei Leistungsmesser gemessen (Bild 80/2).

Der Versuch 16 zeigt: Die Primärleistung ist größer als die Sekundärleistung.
Der Quotient aus Sekundärleistung und Primärleistung ist der

Wirkungsgrad	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	(35)

Es gilt dabei $0 < \eta < 1$
Die Ursache für diesen Sachverhalt ist in der Tatsache begründet, daß an jedem realen Transformator Energieverluste auftreten.
✳ Die Verluste setzen sich zusammen aus:
Stromwärmeverlust, hervorgerufen durch den Ohmschen Widerstand, *Induktionsverlust*, hervorgerufen durch Ummagnetisierung, Wirbelströme, Feldstreuung.
Die Wirbelströme sind Induktionsströme, die durch das magnetische Wechselfeld im Eisenkern entstehen (↗ Physik in Übersichten). Durch geeignete Wahl der Werkstoffe (Legieren mit Silizium), durch Blätterung der Eisenkerne, durch zweckmäßige Wicklung der Spulen usw. können die Verluste in bestimmten Grenzen gehalten werden, so daß der Wirkungsgrad der Großtransformatoren über 95% betragen kann.
Dieser Zusammenhang läßt sich übersichtlich in einem Energieumwandlungsdiagramm darstellen. ✳

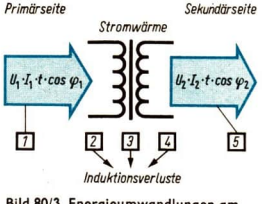


Bild 80/3 Energieumwandlungen am Transformator
1 – Primärenergie
2 – Ummagnetisierung
3 – Wirbelströme
4 – Feldstreuung
5 – Sekundärenergie

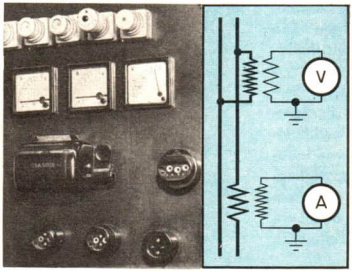
Anwendungsbeispiele zum Transformator

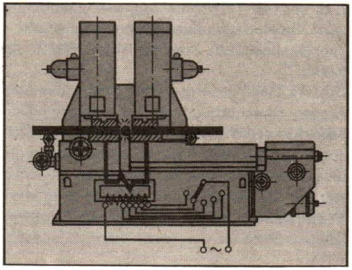
Meßwandler. Sie dienen zur Erweiterung des Meßbereichs und zur Trennung der Niederspannungsmeßschaltung vom Hochspannungsnetz. Sie werden zumeist bei Stromstärken $I > 200$ A und bei Spannungen $U > 600$ V angewendet.

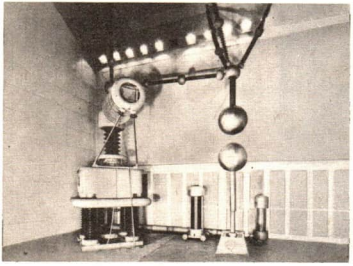
Widerstandsschweißung. Auch bei Schweißmaschinen wird das Transformatorprinzip angewendet. Zwei Werkstückteile werden zusammengepreßt und in den Sekundärkreis eines Transformators mit sehr kleiner Windungsanzahl gelegt. An der Berührungsstelle besteht ein Übergangswiderstand, der bei Stromfluß zu einer starken Erwärmung und Verschmelzung der Teile führt. Hierbei treten auf Grund des Übersetzungsverhältnisses bei kleinen Spannungen Stromstärken von etwa 10000 A auf.

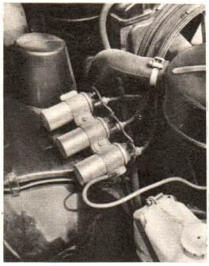
Prüftransformator. Mit den Prüftransformatoren werden Hochspannungen erzeugt. Mit diesen hohen Spannungen überprüft man beispielsweise Isolierstoffe auf elektrische Durchschlagfestigkeit.

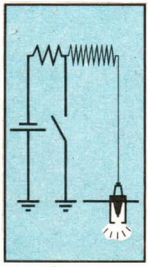
Zündspule. Die Zündspule eines Kraftfahrzeuges ist ein Transformator. Sie liefert die hohe Spannung von etwa 12000 V zum Funkenüberschlag zwischen den Elektroden der Zündkerze bei einer Primärspannung von 6 V oder 12 V.











Bedeutung des Transformators

Die Energieübertragung in Hochspannungsfreileitungen ist ohne Transformator nicht durchführbar. Die Wärmekraftwerke der DDR befinden sich im allgemeinen in der Nähe von Braunkohlenlagerstätten.

● *Erklären Sie die Standortverteilung der Großkraftwerke und der Braunkohlenlagerstätten in der DDR!*

In den oftmals sehr langen Freileitungen können große Spannungsabfälle und damit Leistungsverluste auftreten. Der Leistungsverlust hängt dabei vom Quadrat der Stromstärke und dem Ohmschen Widerstand der Leitungen ab. Daraus folgt, daß man bei konstantem Widerstand die Stromstärke möglichst gering halten muß, um eine verlustarme Energiefortleitung zu erreichen. Das ist bei einer gegebenen Leistung nur möglich, wenn man den Wechselstrom mit hoher Spannung (220 kV, 380 kV) fortleitet.
Die im Generator erzeugte Spannung wird durch Transformatoren erhöht. Beim Energieabnehmer führt die Verwendung von sehr hohen Spannungen zu Schwierigkeiten, z. B. bei der Verwirklichung des Unfallschutzes. Deshalb wird die Hochspannung stufenweise wieder auf die beim Energieabnehmer erforderlichen Werte herabtransformiert.
Um die Elektroenergieversorgung eines Landes vor Störungen zu schützen, um den unterschiedlichen Energiebedarf zu verschiedenen Tageszeiten und den unterschiedlichen Energiebedarf verschiedener Abnehmer, wie Industrie, Haushalte und Verkehrswesen, günstig zu decken, werden die Versorgungsnetze der Kraftwerke zu einem **Verbundnetz** vereinigt. Fällt ein Kraftwerk oder ein Leitungsabschnitt aus, dann können andere Kraftwerke

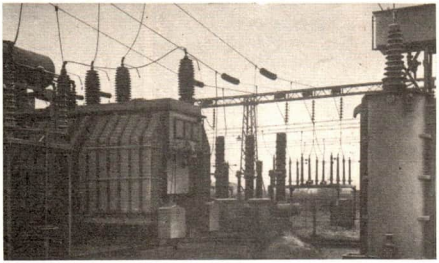


Bild 82/1 Umspannwerk

die Versorgung mit übernehmen, oder der Strom wird über andere Leitungsabschnitte dem Energieabnehmer zugeführt. In den Spitzenzeiten decken Spitzenkraftwerke, besonders Pumpspeicherwerke, den zusätzlichen Bedarf an Elektroenergie.

Wiederholen Sie Ihre Kenntnisse aus dem polytechnischen Unterricht und dem Geographieunterricht über verschiedene Energiequellen und Kraftwerksarten in der DDR!

Neben derart technischen Erwägungen spielen auch ökonomische Belange eine große Rolle. Durch das Zusammenschalten werden die einzelnen Kraftwerke wirtschaftlicher ausgenutzt. Im Bedarfsfalle können weitentlegene Kraftwerke zur Energiedeckung beitragen. Der Bau einer Fernleitung von 500 km Länge mit einer Übertragungsleistung von 700 MW vom Großkraftwerk Bustin in der Ukraine nach Budapest kostet zum Beispiel soviel wie der Bau eines Kraftwerkes in Ungarn mit einer Leistung von nur 125 MW.
Nach den Vereinbarungen im Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe wurden die Versorgungsnetze der DDR, der ČSSR, der Volksrepubliken Polen und Bulgarien, der Ungarischen Volksrepublik, der Sozialistischen Republik Rumänien und der Sowjetunion zum größten übernationalen Versorgungssystem der Welt zusammengefaßt.
Mit Hilfe der Sowjetunion sind in den einzelnen sozialistischen Ländern zahlreiche Kraftwerke errichtet worden. So wurden zur Verwirklichung des Energieprogramms der DDR von den Betrieben des sowjetischen Energiemaschinenbaues die entsprechenden Maschinen, Geräte und Ausrüstungen geliefert.
Die Vorteile eines Verbundsystems für die sozialistischen Staaten liegen auf der Hand. Länder, die eine zu geringe eigene Erzeugung an Elektroenergie haben, erhalten von den Bruderländern über das Verbundnetz Elektroenergie. Da die Spitzenbelastungszeiten in den einzelnen Ländern unterschiedlich sind (↗ Bild 84/1), ist eine rationellere Nutzung der in den Kraftwerken installierten Leistung möglich. Grenzgebiete, die von den Kraftwerken des eigenen Landes weit entfernt sind, werden aus nahe gelegenen Kraftwerken der Bruderländer gespeist.

Erläutern Sie diese Tatsache an Beispielen aus dem Geographieunterricht der Klasse 10!

Durch die enge Zusammenarbeit der sozialistischen Länder bei der Versorgung mit Elektroenergie wird die Wirtschaft in den einzelnen Ländern gefördert. Auch dadurch

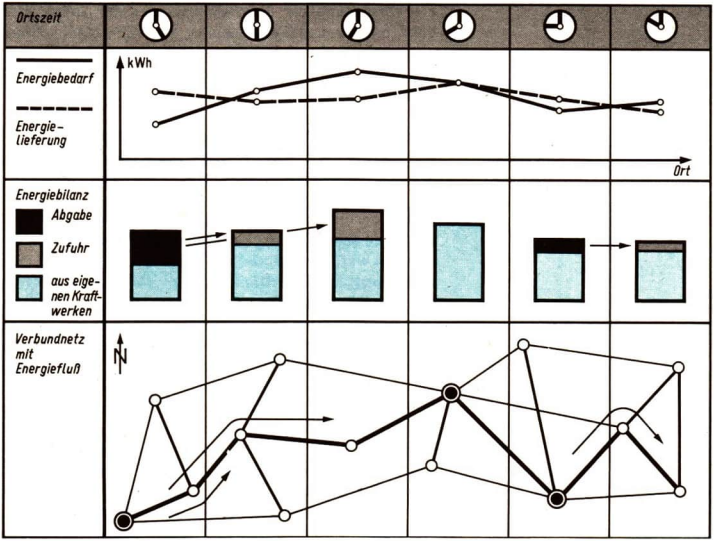


Bild 84/1 Prinzip eines Verbundnetzes

wachsen die ökonomische Stärke, die wirtschaftliche und politische Einheit der Staaten des RGW. So trägt jeder einzelne Staat dazu bei, das gesamte sozialistische Lager zu stärken.

Elektrifizierung und Volkswirtschaft. In einem hochindustrialisierten Land wie der DDR werden an die Versorgung der Industrie, der Landwirtschaft und des Verkehrswesens mit elektrischer Energie hohe Anforderungen gestellt. Die Leistungen der Energiewirtschaft bestimmen weitgehend das Entwicklungstempo der gesamten Volkswirtschaft. Aus diesem Grunde hat die Regierung der Deutschen Demokratischen Republik dem Neubau von Kraftwerken, der Rekonstruktion bestehender Kraftwerke und dem Ausbau des Versorgungsnetzes große Aufmerksamkeit geschenkt. Die Mechanisierung und Automatisierung in der industriellen und landwirtschaftlichen Produktion, der Übergang zum elektrischen Eisenbahnbetrieb, das Vordringen der Elektronik, der größere Einsatz elektrischer Geräte im Verwaltungswesen und in den Haushalten erfordern immer mehr Elektroenergie. Einen be-

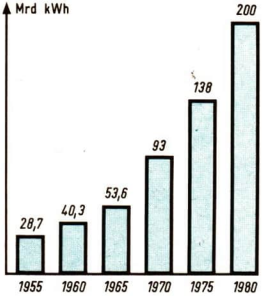


Bild 84/2 Erzeugung von Elektroenergie in der DDR

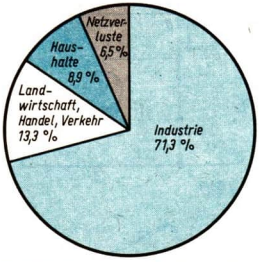


Bild 85/1 Energiebedarf in den verschiedenen Wirtschaftszweigen

sonders hohen Bedarf an elektrischer Energie hat die chemische Industrie, die eine Schlüsselstellung in der Volkswirtschaft der DDR einnimmt. Mit dem weiteren Ausbau solcher energieintensiven Betriebe, wie z. B. des Petrolchemischen Kombinats Schwedt, des Werkes Leuna II und des Chemiefaserkombinats in Wilhelm-Pieck-Stadt Guben stieg der Bedarf an Elektroenergie weiter an.

Begründen Sie das Anwachsen des Bedarfs an elektrischer Energie! Fertigen Sie dazu ein Exzerpt aus dem Lehrbuch an!

Die Deutsche Demokratische Republik gehört in der Pro-Kopf-Erzeugung von Elektroenergie zu den führenden Staaten der Welt; sie übertrifft in dieser Beziehung Industrieländer wie Frankreich, Westdeutschland, Italien, die ČSSR und Österreich. Die jährliche Zuwachsrate bei der Erzeugung von Elektroenergie beträgt für die DDR etwa 8 Prozent.

Zeigen Sie an Beispielen aus der produktiven Arbeit und aus der Tagespresse die Bedeutung der Elektrifizierung für die weitere Entwicklung der Volkswirtschaft und der ökonomischen Stärkung der DDR!

Der elektrische Schwingkreis

Beim elektrischen Wechselstrom ändert sich die Spannung periodisch.

Weisen Sie nach, daß der Wechselstrom als eine elektromagnetische Schwingung zu betrachten ist! Wiederholen Sie hierzu den Begriff Schwingung und wenden Sie ihn auf den Wechselstrom an!

Mit Wechselstromgeneratoren (↗ S. 64) werden meist Wechselspannungen mit einer Frequenz von 50 Hz erzeugt. Die Erzeugung wesentlich höherer Frequenzen mit solchen Generatoren stößt auf technische Schwierigkeiten. Bei höheren Frequenzen treten aber völlig neue, für die moderne Technik höchst bedeutungsvolle Eigenschaften in Erscheinung. Diese Erscheinungen stehen im Zusammenhang mit den um einen elektrischen Leiter auftretenden elektrischen und magnetischen Feldern.
Die Erzeugung solcher *elektromagnetischer Schwingungen* mit unterschiedlichen Frequenzen soll untersucht werden. Dazu betrachtet man zunächst die beiden felderzeugenden Bauelemente *Spule* und *Kondensator*.

Schließt man eine Spule an eine Gleichspannungsquelle an, dann wird um die Spule ein magnetisches Feld aufgebaut. Elektrische Energie wird dabei in Form der Energie des magnetischen Feldes gespeichert. Wird ein Kondensator an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, so wird er aufgeladen. Elektrische Energie wird dabei in Form der Energie des elektrischen Feldes gespeichert.
Jedes schwingfähige System, in dem Eigenschwingungen auftreten können, enthält Bauelemente, die Energie speichern können; im Bereich der elektromagnetischen Erscheinungen sind das Spulen und Kondensatoren.
Der Einfluß dieser Bauelemente auf den Elektronenstrom in einem Stromkreis soll untersucht werden.

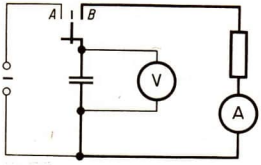


Bild 86/1

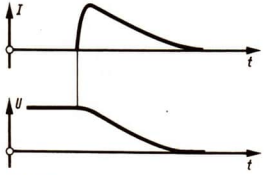


Bild 86/2

17 ▼ Ein Kondensator wird nach dem Aufladen (Schalterstellung A) mit einem Ohmschen Widerstand in einen Stromkreis geschaltet (Schalterstellung B, Bild 86/1). Der Zeiger des Stromstärkemeßgerätes geht nach dem Ausschlag allmählich zurück, der Zeiger des Spannungsmeßgerätes zeigt einen der Stromstärkeabnahme ähnlichen Verlauf der Spannungsabnahme an.

Ergebnis: Die Entladung des Kondensators führt zu keiner Schwingung im Stromkreis (Bild 86/2).

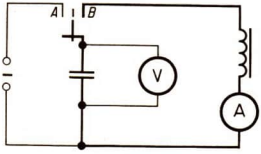


Bild 86/3

18 ▼ Ein Kondensator wird nach dem Aufladen mit einer Induktionsspule in einen Stromkreis geschaltet (Bild 86/3). Die Zeiger der Meßgeräte pendeln um ihre Nullpunkte. Die Geräte zeigen einen abklingenden Wechselstrom mit niedriger Frequenz an.

19 ▼ Schaltet man einen Oszillografen in den Stromkreis (Bild 86/4), dann wird das Spannungs-Zeit-Diagramm auf dem Bildschirm sichtbar. Die Veränderung der elektrischen Größen Spannung und Stromstärke stellen einen Wechselstrom dar.

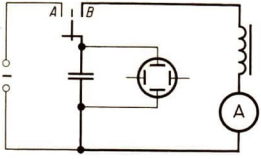


Bild 86/4

Die Versuche 18 und 19 bestätigen: In einem Stromkreis, bestehend aus Kondensator, Verbindungsleitern und Induktionsspule, treten zeitlich periodische Änderungen der Spannung, Stromstärke und der Feldstärken, d. h. elektromagnetische Schwingungen, auf (Bild 86/5). Man bezeichnet solch einen Stromkreis als **Schwingkreis.**
Das Bild auf dem Oszillografen zeigt dabei abnehmende Amplituden. Die entstandene Schwingung ist eine gedämpfte Schwingung.
Vergleichen Sie das Oszillografenbild mit Bild 56/1! Das Bild am Katodenstrahloszillografen ist ein Spannungs-Zeit-Diagramm. An Stelle der Spannung kann man auch die Stromstärke oder die elektrische Feldstärke am Kondensator auf der Ordinatenachse abtragen.

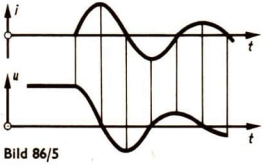


Bild 86/5

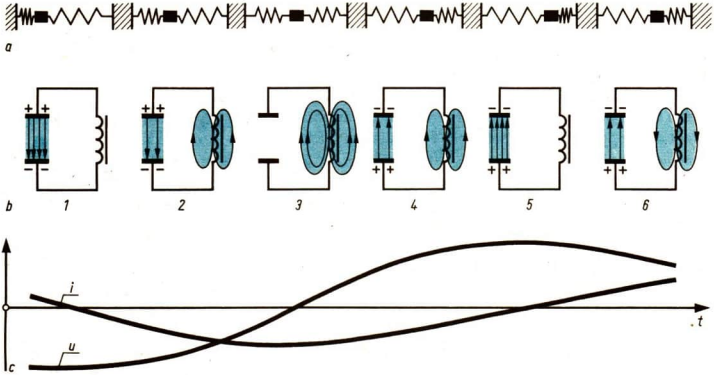


Bild 87/1 Der Körper des Federschwingers (Bild 87/1 a), der dem elektrischen Schwingkreis (Bild 87/1 b) zum Vergleich gegenübergestellt ist, bewegt sich infolge seiner Trägheit durch den Ruhepunkt hindurch, in dem er ohne Vorhandensein träger Masse zur Ruhe kommen müßte, weil sich dann in diesem Punkt die antreibenden Kräfte aufheben

Zu Beginn einer elektromagnetischen Schwingung ist der Kondensator aufgeladen. In diesem Zustand ist in ihm elektrische Feldenergie gespeichert. Diese Energie wird bei der Entladung über einen Ohmschen Widerstand im wesentlichen in Wärme umgewandelt, die der Elektronenstrom in den Leitern des Stromkreises erzeugt. Bei Vorhandensein eines induktiven Widerstandes im Stromkreis jedoch wird der größte Teil der im Kondensator gespeicherten Energie mit dem Anwachsen des Entladestromes in magnetische Feldenergie der Spule umgewandelt. Die nunmehr im magnetischen Feld der Spule gespeicherte Energie wandelt sich wieder in elektrische Feldenergie des sich neu aufladenden Kondensators um, und zwar aus folgendem Grunde: Jede Änderung der Stromstärke verursacht in der Spule eine Selbstinduktionsspannung, die der Änderung der Stromstärke entgegenwirkt (Lenzsches Gesetz). Das bedeutet, daß zu Beginn des Entladevorgangs, wenn der Entladestrom anwächst, die Zunahme der Stromstärke verzögert wird. Das bedeutet ferner: Wenn der Kondensator fast entladen ist und die Stromstärke wieder abnimmt, wird nun diese Abnahme durch die Spule verzögert. Dadurch fließt der Strom weiter, wenn der Kondensator schon entladen ist. Der Kondensator wird mit umgekehrter Polarität wieder aufgeladen. Man kann diese Eigenschaft einer Spule mit der Trägheit eines Körpers in der Mechanik vergleichen.

Energieumwandlung im elektrischen Schwingkreis

Solange der Kondensator aufgeladen ist, herrscht zwischen dessen Platten ein elektrisches Feld; die gespeicherte Energie ist der Spannung proportional (Bild 87/1). Solange Strom fließt, besteht um die stromführenden Leiter und vor allem in der Spule ein magnetisches Feld; die gespeicherte Energie ist der Stromstärke proportional.
Jede Schwingung beruht auf Energieumwandlungen. Bei einer mechanischen Schwingung eines Federschwingers (Bild 87/1) wandeln sich fortwährend kinetische Energie und potentielle Energie ineinander um. Bei der elektromagnetischen Schwingung wandeln sich fortwährend die Energien elektrischer und magnetischer Felder ineinander um. Man spricht deshalb von *elektromagnetischen Schwingungen* in einem elektrischen Schwingkreis. Die sich periodisch auf- und abbauenden Felder nennt man *Wechselfelder*.

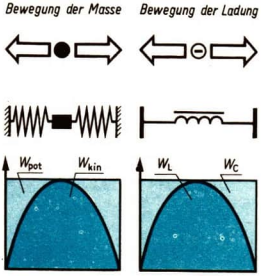
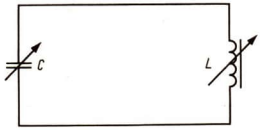


Bild 88/1 Federschwinger und Schwingkreis mit Energiediagramm. Der Schwingkreis ist gestreckt dargestellt

- *Stellen Sie an Hand des Bildes 88/1 die einander entsprechenden Erscheinungen und Vorgänge einer elektromagnetischen und einer mechanischen Schwingung in Form einer Tabelle gegenüber!*

Wie bei Transformatoren treten auch in elektrischen Schwingkreisen unerwünschte Energieumwandlungen auf. Die Energien des elektrischen und des magnetischen Feldes werden nicht vollständig ineinander umgewandelt. Ein Teil der Energie wird in Wärme umgewandelt. Dies äußert sich hauptsächlich in der Erwärmung der Leiter infolge des unvermeidlichen Ohmschen Widerstandes, in der Erwärmung des Eisenkerns infolge der ständigen Ummagnetisierung und der Wirbelströme und der Erwärmung des Dielektrikums im Kondensator. Durch diesen Energieentzug verringert sich die zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld ausgetauschte Energie, die Stromstärke- und Spannungsamplituden nehmen ab. Es handelt sich also um eine *gedämpfte* elektromagnetische Schwingung. Die *Dämpfung* hängt im wesentlichen von den beiden genannten Ursachen ab: vom Ohmschen Widerstand des Schwingkreises und von der Beschaffenheit der Spulen, insbesondere von deren Eisenkernen.



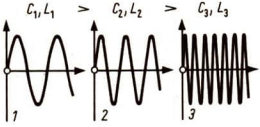


Bild 89/1 Einfluß der Kapazität und der Induktivität auf die Frequenz

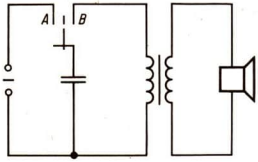


Bild 89/2

Die Frequenz der elektromagnetischen Schwingung

Bei der elektromagnetischen Schwingung werden Ladungsträger im Schwingkreis hin- und herbewegt. Spannung und Stromstärke ändern sich periodisch. Schwingungsdauer und Frequenz der Schwingung hängen von der Kapazität C des Kondensators und von der Induktivität L der Spule ab.

Ein Kondensator wird nach dem Aufladen mit einer Induktionsspule in einen Stromkreis geschaltet. An den Schwingkreis wird ein Katodenstrahloszillograf angeschlossen. Die Induktivität der Spule wird durch Verschieben des Eisenkerns verändert. Nacheinander werden Kondensatoren verschiedener Kapazität in den Schwingkreis geschaltet (Bild 86/4). 20 ▼

Deuten Sie die beim Versuch 20 entstehenden Oszillografenbilder (vgl. Bild 89/1)!

Der Versuch 20 wird wiederholt und dabei zur Anzeige der Schwingungen ein Lautsprecher verwendet. Dieser wird induktiv mit dem Schwingkreis gekoppelt (↗ S. 76).

Durch Verändern der Induktivität, zum Beispiel durch Verschieben des Eisenkerns der Spulen, oder durch Verändern der Kapazität durch Zu- oder Abschalten von weiteren Kondensatoren läßt sich die Frequenz variieren. Je höher die Frequenz ist, desto höher ist der Ton im Lautsprecher.

Aus den Experimenten ergibt sich: Die Schwingungsdauer ist um so größer, je größer L und C sind. Die **Frequenz** einer elektromagnetischen Schwingung in einem elektrischen Schwingkreis ist um so kleiner, je größer L und C sind.

Die Frequenz der elektromagnetischen Schwingung wird berechnet nach der

Thomsonschen Schwingungsgleichung	$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$	(36)

Erläutern Sie die in der Gleichung (36) enthaltene Abhängigkeit der Frequenz von der Induktivität und der Kapazität! Wenden Sie hierzu Ihre Kenntnisse über Selbstinduktion und den Kondensator an!

Die erzwungene elektromagnetische Schwingung

In den bisherigen Versuchen wurde der aufgeladene Kondensator an die Spule angeschlossen und dadurch eine elektromagnetische Schwingung erzeugt. Der Schwingkreis führte Schwingungen mit seiner *Eigenfrequenz* aus. Diese war durch Induktivität und Kapazität von Spule und Kondensator bestimmt.
Der Vorgang ist zu vergleichen mit der einmaligen Energiezufuhr beim Anstoßen des Pendelkörpers bei mechanischen Schwingungen. Der Pendelkörper führte auch Schwingungen mit seiner *Eigenfrequenz* aus. Man kann einen Pendelschwinger auch durch periodische Anstöße anregen. Er führt dann *erzwungene* Schwingungen mit der *Erregerfrequenz* aus (↗ S. 58).
Im Falle einer elektromagnetischen Schwingung kann man die regelmäßigen Anstöße beispielsweise durch einen Wechselstrom herbeiführen.

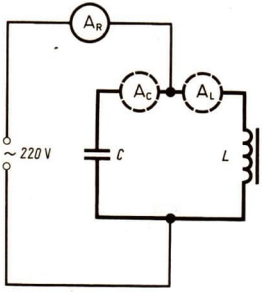


Bild 90/1 In einem Schwingkreis werden erzwungene Schwingungen erzeugt

21
▼ **Ein elektrischer Schwingkreis (Bild 90/1) wird durch Wechselstrom zu erzwungenen Schwingungen mit der Frequenz $f = 50$ Hz angeregt.**
Die Eigenfrequenz des Schwingkreises kann durch Verschieben des Eisenjoches verändert werden.

● ***Welche Größe der Spule wird durch Verschieben des Joches verändert?***
Wie bezeichnet man den Sonderfall, daß die Eigenfrequenz eines Schwingers und die Frequenz beim Zuführen der Anstoßenergie gleich sind?

Von den mechanischen Schwingungen ist bekannt, daß im Resonanzfall die Amplitude des Schwingers ein Maximum hat.
Für einen Schwingkreis ist die Stromstärke I_R ein Maß für die zugeführte elektrische Energie. Mißt man die Stromstärke in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz f_0 des Schwingkreises, so erhält man die in Bild 90/2 dargestellte Kurve für I_R. Die Stromstärke I_R weist ein Minimum auf, d. h., daß die dem Schwingkreis zugeführte Anstoßenergie im Resonanzfall am geringsten ist. Gleichzeitig erreicht die Schwingungsenergie des Schwingkreises ein Maximum, was an den gleichgroßen Zeigerausschlägen der in den Schwingkreis eingeschalteten Stromstärkemeßgeräte A_C und A_L zu erkennen ist (Bild 90/1).
Dieses Verhalten kennzeichnet den Resonanzfall: Die Frequenz f_0 des Schwingkreises stimmt mit der Erregerfrequenz f_E des Wechselstromes (50 Hz) überein.

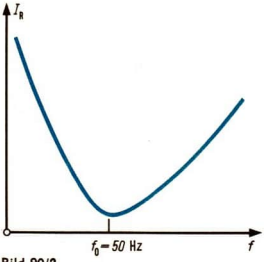


Bild 90/2

Die ungedämpfte elektromagnetische Schwingung

Wenn man einer gedämpften mechanischen Schwingung im Rhythmus der Eigenfrequenz soviel Energie zuführt, wie durch die Dämpfung an die Umgebung abgegeben wird, so erhält man eine ungedämpfte Schwingung.

Zeichnen Sie das y-t-Diagramm einer gedämpften und einer ungedämpften Schwingung! Erläutern Sie die Unterschiede!

Die Energiezufuhr kann bei einem elektrischen Schwingkreis z. B. durch Wechselstrom erfolgen. Dazu muß der Schwingkreis mit einer Wechselspannungsquelle *gekoppelt* werden. Der Schwingkreis im Bild 90/1 war durch Leitungsdrähte mit der Wechselspannungsquelle verbunden. Über diese wurde dem Schwingkreis Energie zugeführt.
Es gibt noch andere Möglichkeiten, Energie auf einen Schwingkreis zu übertragen. Beim Transformator erfolgte die Energieübertragung zwischen den beiden Spulen durch das magnetische Wechselfeld. Koppelt man zwei Spulen so, daß durch das magnetische Wechselfeld der einen Spule in der anderen eine Spannung induziert wird, so bezeichnet man diese Kopplung als *induktive Kopplung* (Bild 91/1).

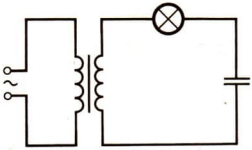


Bild 91/1

Erklären Sie die Energieumwandlungen bei der induktiven Kopplung von Schwingkreisen!

Durch die Kopplung entsteht im zweiten Schwingkreis eine ungedämpfte elektromagnetische Schwingung.

Der Rückkopplungs-Röhrengenerator

Technische Bedeutung erhalten die elektromagnetischen Schwingungen erst, wenn sie ungedämpft und mit beliebiger Frequenz erzeugt werden können.
Im Prinzip muß aus einer Energiequelle bei jeder Periode im geeigneten Augenblick soviel Energie zugeführt werden, daß die Dämpfungsverluste ersetzt werden. Das könnte über ein Relais erfolgen, das vom Schwingkreisstrom gesteuert wird und das dem Schwingkreis zur jeweils richtigen Zeit periodisch elektrische Energie liefert. Das mechanische Relais arbeitet jedoch zu träge.
Zur Steuerung der Energiezufuhr wird eine Triode verwendet (Bild 92/1).

Wiederholen Sie Ihre Kenntnisse von der Triode! Erläutern Sie an Hand einer I_A-U_G-Kennlinie, daß durch Verändern der Gitterspannung der Anodenstrom gesteuert werden kann!

Beim Einschalten des Anodenstroms wird der Kondensator aufgeladen. Er entlädt sich in Form einer gedämpften Schwingung über die Schwingkreisspule L_S. Dabei wird die Spule L_S nacheinander von Strömen wechselnder Richtung durchflossen.
Die Spulen L_S und L_R bilden einen Transformator. Die wechselnden Ströme in der Spule L_S induzieren in der induktiv gekoppelten Spule L_R eine wechselnde Spannung. Diese Wechselspannung liegt am Gitter der Röhre.
Die Gitterspannung stärkt und schwächt folglich den Anodenstrom in der Frequenz des Schwingkreises, von dem diese Wirkungen ausgingen.
Die zur Deckung der Dämpfungsverluste erforderliche Energie wird den zum Betrieb der Röhre erforderlichen Spannungsquellen entnommen. Dieser Fall, daß ein Schwingkreis in seiner Eigenfrequenz zu erzwungenen Schwingungen angeregt wird, lag schon in der in Bild 89/2 gezeigten Versuchsanordnung vor. Dort kamen die Energie und die Anstöße von einer fremden Spannungsquelle her. Bei der vorliegenden Schaltung (Bild 92/1) löst der Schwingkreis mit Hilfe der Triode selbst die Anstöße aus, die zwangsläufig immer in seiner Eigenfrequenz erfolgen.

Da bei dieser von MEISSNER entwickelten Schaltung der Schwingkreis über Gitter und Anodenstromkreis auf seine eigenen Schwingungen zurückwirkt, gleichsam mit sich selbst gekoppelt ist, nennt man sie eine *Rückkopplungsschaltung* und die Spule L_R *Rückkopplungsspule*.
✳ In der Starkstromtechnik bezeichnet man eine Maschine, die eine Gleich- oder Wechselspannung erzeugt, als Generator.
Entsprechend nennt man eine Röhrenschaltung, in der ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen entstehen, einen *Röhrengenerator*.

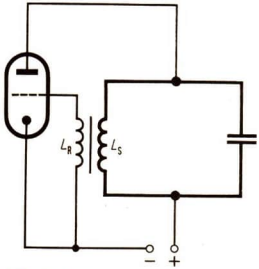


Bild 92/1 Rückkopplungsschaltung eines Schwingkreises mit einer Triode

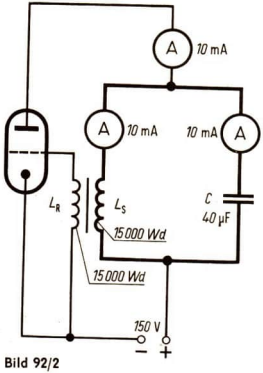


Bild 92/2

22 ▼ Ein Kondensator mit einer Kapazität von 40 µF und eine Induktionsspule mit großer Induktivität werden in einen Schwingkreis geschaltet (Bild 92/2).
Die Frequenz beträgt dabei etwa 1 Hz. Solche geringe Frequenz kann mit einfachen Stromstärkemeßgeräten nachgewiesen werden.

23 ▼ Um eine höhere Frequenz zu erzielen (Hörbarkeitsbereich), sind Induktivität und Kapazität gegenüber dem Versuch 22 kleiner gewählt. Die Anzeige der Schwingung erfolgt akustisch mit Hilfe eines Lautsprechers. Durch Verändern der Induktivität, zum Beispiel durch Verschieben des Eisenkerns der Spulen oder durch Verändern der Kapazität durch Zu- oder Abschalten von weiteren Kondensatoren läßt sich die Frequenz variieren. ✳

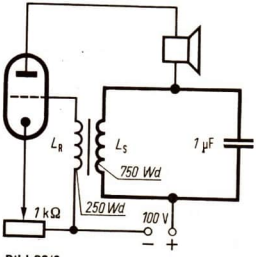
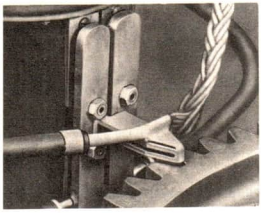


Bild 92/3



Anwendung elektromagnetischer Schwingungen in Technik und Medizin

Durch das niederfrequente magnetische Wechselfeld werden im Kern eines Transformators Wirbelströme induziert, die zu dessen Erwärmung führen. Elektrische Energie wird dabei in Wärme umgewandelt.
In stärkerem Maße werden Leiter erwärmt, wenn sie in das hochfrequente Wechselfeld der Spule eines Röhrengenerators gebracht werden. Diese Erwärmung bezeichnet man als *induktive Hochfrequenzerwärmung*. Sie wird angewendet z. B. beim Oberflächenhärten und Zonenschmelzen.
Nichtleiter können nicht induktiv, sondern nur in einem elektrischen Wechselfeld eines Kondensators erwärmt werden. Die Wirkung beruht auf der Ausrichtung und Umpolung der Moleküle des Nichtleiters im elektrischen Feld.
Durch das hochfrequente elektrische Wechselfeld wird die Molekularbewegung der Nichtleitermoleküle stärker, wobei die Temperatur steigt. Diese Erwärmung bezeichnet man als *kapazitive Hochfrequenzerwärmung*. Sie wird angewendet z. B. beim Plastschweißen und bei der medizinischen Diathermie.

Zur Wiederholung

Im vorstehenden Abschnitt wurde an einigen Beispielen die Schwingung untersucht. Dabei wurde von der Bewegung eines Federschwingers ausgegangen und schwingende Größen aus der Mechanik und danach aus der Elektrizitätslehre behandelt. Die Übersicht faßt wesentliche Aussagen des Kapitels Schwingungen zusammen.

Schwinger			
zeitlich periodisch sich verändernde Größe	mechanische Größen: Auslenkung, Geschwindigkeit	elektrische Größen: Spannung, Stromstärke	Feldgröße: elektrische und magnetische Feldstärke
Energieumwandlung	kinetische Energie potentielle Energie	mechanische Energie elektrische Energie	elektrische Energie magnetische Energie
Schwingungsart	mechanische Schwingung	elektromagnetische Schwingung	

Eine Schwingung wird beschrieben durch die zeitlich periodische Änderung einer physikalischen Größe.
Es gilt für die Elongation $y = y_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$.

● *Stellen Sie in einer Tabelle schwingende Größen zusammen!*

Es ist deutlich geworden, daß das Schwingen bestimmter Systeme (z. B. der Pendelkörper) durch die Schwingung physikalischer Größen beschrieben wird (z. B. zeitlich periodische Änderung des Auslenkwinkels und der Geschwindigkeit).
Das Bild 94/1 zeigt grafische Darstellungen einiger schwingender physikalischer Größen.
Bei der Schwingung von mechanischen Größen und elektrischen Größen treten Erscheinungen auf, die in der nachstehenden Übersicht genannt werden:

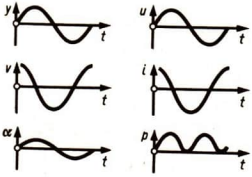


Bild 94/1 *y-t*-Diagramm schwingender mechanischer Größen und *y-t*-Diagramm schwingender elektrischer Größen

Beispiel: *Pendelschwinger*	Beispiel: *Elektrischer Schwingkreis*
Der gehobene Pendelschwinger enthält potentielle Energie. Der sich bewegende Pendelschwinger enthält kinetische Energie. Durch den Reibungswiderstand wird die Schwingung gedämpft. Schwingungsdauer eines Pendelschwingers $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ Frequenz $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$	Der Kondensator enthält beim Anlegen einer Spannung elektrische Feldenergie. Die stromdurchflossene Spule enthält magnetische Feldenergie. Durch den Ohmschen Widerstand des Schwingkreises wird die Schwingung gedämpft. Schwingungsdauer der elektromagnetischen Schwingung $T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$ Frequenz $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$

● *Beschreiben Sie für den Pendelschwinger und für den elektrischen Schwingkreis die Energieumwandlungen!*
Durch welche Maßnahmen wird erreicht, daß die Schwingungen beim Pendelschwinger und beim elektrischen Schwingkreis ungedämpft sind?

Beim Pendelschwinger treten freie Schwingungen auf, wenn er mit einmaligem Anstoß zum Schwingen angeregt wird. Die entsprechende Frequenz heißt Eigenfrequenz. Beim Pendelschwinger treten erzwungene Schwingungen auf, wenn durch periodisches äußeres Einwirken (Erregerfrequenz) Energie zugeführt wird. Wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz übereinstimmt, dann tritt Resonanz ein. Der Pendelschwinger kann bei geringer Dämpfung Schwingungen mit sehr großer Amplitude ausführen. Die zur Aufrechterhaltung dieses Zustandes zuzuführende Energie erreicht ein Minimum.	Beim elektrischen Schwingkreis treten freie Schwingungen auf, wenn dem Kondensator oder der Spule einmalig Energie zugeführt wird. Beim elektrischen Schwingkreis treten erzwungene Schwingungen auf, wenn durch eine Wechselspannungsquelle periodisch Energie zugeführt wird. Wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz im elektrischen Schwingkreis übereinstimmt, dann tritt Resonanz ein. Die Schwingungsamplitude nimmt große Werte an, die um so größer sind, je kleiner die Dämpfung ist.

Wellen

Mechanische Wellen

Das Motorboot hinterläßt bei seiner Fahrt weithin sichtbare Wasserwellen.
Diese Wellen entstehen dadurch, daß vom Boot Wasserteilchen verdrängt und dabei in Schwingungen versetzt werden. Die Schwingungen werden als Welle fortgeleitet, weil eine Verbindung, eine Kopplung, zwischen den vielen Wasserteilchen besteht.

Die mechanische Kopplung

● *Wiederholen Sie die Kenngrößen von Schwingungen! Lesen Sie gegebenenfalls auf Seite 48 nach!*

Es wird nun die folgende Aufgabe gestellt: Unter welchen Umständen kann ein Schwinger auf einen anderen einwirken? Wie lassen sich die Erscheinungen bei Wellen erklären?

24 ▼ Hängt man zwei Pendelschwinger nebeneinander auf und stößt den einen an, so bleibt, wie zu erwarten, der andere Pendelschwinger in Ruhe (Bild 96/2).

Damit der angestoßene Pendelschwinger auf den anderen einwirken kann, muß zwischen beiden eine Kopplung bestehen.

25 ▼ Die zwei Pendelschwinger werden miteinander gekoppelt (Bild 96/3). Stößt man den einen Pendelschwinger an, so beginnt auch der zweite zu schwingen.

Im Versuch 25 ist die Energie des ersten Schwingers auf den zweiten Schwinger übertragen worden; die Energieübertragung wird durch die *Kopplung* ermöglicht.

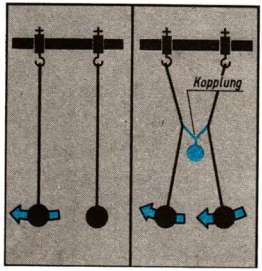


Bild 96/2 Bild 96/3

▶ Durch Kopplung kann Energie von einem Schwinger auf einen anderen Schwinger übertragen werden.

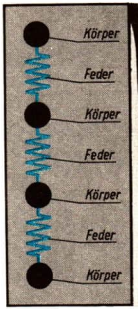


Bild 97/1

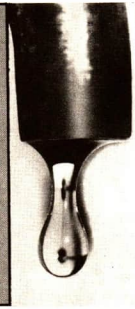


Bild 97/2

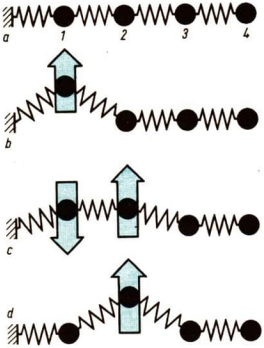


Bild 97/3 Ausbreiten einer Schwingung in einer Schwingerkette

Erklären Sie, wie Schwingungen übertragen werden, wenn mehrere Pendelschwinger bzw. mehrere Federschwinger miteinander gekoppelt sind (Bild 97/1)!

Die Wasserteilchen des Gewässers im Bild 96/1 bilden eine Kette miteinander gekoppelter schwingungsfähiger Teilchen.

Ein an einem Wasserhahn hängender Wassertropfen läßt die Kopplung deutlich erkennen (Bild 97/2).

Wodurch sind die Wasserteilchen gekoppelt?

Energieübertragung zwischen gekoppelten schwingungsfähigen Teilchen. Die Energieübertragung wird an einer Federschwingerkette (Bild 97/3) erläutert, bei der mehrere schwingungsfähige Körper durch Federn miteinander gekoppelt sind.

Wird der Körper 1 (Bild 97/3a) zum Beispiel aus der Ruhelage (Gleichgewichtslage) nach oben ausgelenkt (Bild 97/3b), dann wird die hierzu aufgewendete Arbeit als Energie in der Feder am Körper 1 gespeichert. 26
Diese Energie bewirkt infolge der Wechselwirkung zwischen den Körpern eine Rückführung des Körpers 1 und eine Auslenkung des Körpers 2 (Bild 97/3c). Die Auslenkung der Körper wird durch die Schwingerkette fortgeleitet, die einzelnen Körper werden *zeitlich nacheinander* ausgelenkt. Dabei wird Energie übertragen.

Die mechanische Welle

Besonders wichtig für das Verständnis des in Versuch 26 beschriebenen Vorgangs ist erstens die Tatsache, daß die einzelnen Körper nur Schwingungen um ihre Ruhelagen ausführen. Das ist ein zeitlich periodischer Vorgang an einem bestimmten Ort. Die Ruhelage eines Körpers ändert sich im Zeitablauf nicht. Alle Körper vollführen Schwingungen um ihre Ruhelagen, und nur der Schwingungszustand breitet sich im Raume aus; er hängt periodisch vom Ort ab.

> Dieser zeitlich und örtlich periodische Vorgang wird Welle genannt.

Man kann die Schwingerkette als Modell ansehen. Ähnliche Vorgänge wie in Schwingerketten treten in festen,

flüssigen oder gasförmigen Körpern auf. Die Teilchen der Körper sind die Schwinger.
Die zwischen den Teilchen bestehende Kopplung überträgt die Schwingungen. Dabei treten Wellen auf, die sichtbar sind oder mit einfachen Mitteln sichtbar gemacht werden können.

■ An einem schwimmenden Kork, Ball oder ähnlichem kann man beobachten, wie sich durch die Wasserwellen der Schwingungszustand ausbreitet. Der schwimmende Gegenstand schwingt auf und ab, ohne sich von der Stelle zu bewegen, während die wellenförmige Veränderung der Wasseroberfläche fortwandert.

27 ▼ Ein Seil (oder Gummischlauch) wird an einer Seite fest eingespannt. Das lose Ende wird periodisch hin- und herbewegt. Es entsteht eine Seilwelle.

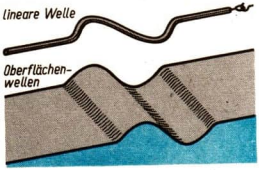
Durch die Kopplung wird bei der Wasserwelle und bei der Seilwelle die Energie übertragen. Wie im Versuch 24 breitet sich der Schwingungszustand örtlich periodisch aus und die einzelnen Teilchen (des Wassers, des Seiles oder des Schlauches) schwingen zeitlich periodisch.
Die Lage eines Teilchens während einer Schwingung wurde mit der Elongation y beschrieben (↗ S. 48). Es läßt sich mit diesem Begriff sagen:

Bei Wasserwellen und bei Seilwellen ändert sich die Elongation y der Teilchen zeitlich und örtlich periodisch.

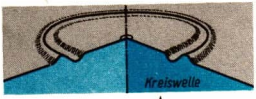
Eine andere Art mechanischer Wellen sind die Schallwellen.
Bei ihnen ist der Druck die sich verändernde physikalische Größe.

Bei Schallwellen ändert sich der Druck zeitlich und örtlich periodisch.

Um eine Welle zu erzeugen, muß man einem Schwingerkörper, der sich in einem gekoppelten System vieler solcher Schwingerkörper befindet, Energie zuführen. Am Auftreff- oder Empfangsort der Welle wird von dieser Arbeit verrichtet (Brandungswellen an der Küste, Schallwellen an der Mikrofonmembran).
Aus allen Versuchen und Beispielen dieses Abschnittes kann man entnehmen, daß bei einer Welle Energie übertragen wird und sich ein Schwingungszustand ausbreitet, daß aber kein Stoff transportiert wird.
Alle einzelnen Aussagen lassen sich zur allgemeinen Definition einer Welle zusammenfassen:



Eine Welle ist ein physikalischer Vorgang, bei dem Energie übertragen, jedoch kein Stoff transportiert wird und der durch zeitlich und örtlich periodische Änderungen einer physikalischen Größe beschrieben werden kann.



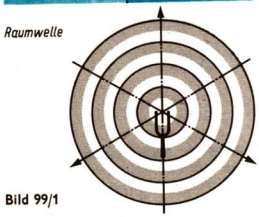


Bild 99/1

Wellenformen. Wellen, die sich zum Beispiel längs eines Seiles ausbreiten, heißen **lineare Wellen.**
Auf einer Flüssigkeitsoberfläche, zum Beispiel bei den Wasserwellen im Bild 96/1, oder einer Festkörperoberfläche (Erde) breiten sich die Wellen in einer Fläche, z. B. in einer Ebene, aus. Man spricht von **Oberflächenwellen.**
Ist die Geschwindigkeit der Wellen in allen Punkten einer Ebene und nach allen Richtungen gleich groß, so entstehen bei punktförmigem Erregerzentrum **Kreiswellen.**
Ist das Erregerzentrum allseitig von einem Körper umgeben, der die Wellen fortleitet, zum Beispiel beim Schwingen einer Schallquelle (Stimmgabel, Motor usw.) im lufterfüllten Raum, so bilden sich **Raumwellen.**
Bei punktförmiger Erregung und gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit an allen Stellen des Körpers und nach allen Richtungen entstehen **Kugelwellen.**

Die grafische Darstellung von Wellen.

Das Bild 99/2 zeigt eine Pendelschwingerkette.

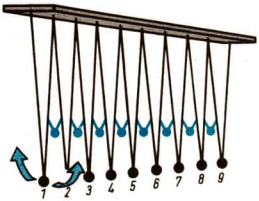


Bild 99/2 Pendelschwingerkette

Der erste Schwinger (1) der Kette (Bild 99/2) wird quer zur Kette in Schwingung versetzt. In der Kette entsteht dadurch eine Welle. Alle Schwinger erreichen den Umkehrpunkt zu verschiedenen Zeiten. Mehrere Momentbilder der Elongationen y_1 bis y_9 der Schwinger 1 bis 9 sind auf der Seite 100 in der Draufsicht (Bild 100/1) gezeigt.

Vergleicht man die Elongation aller Schwinger eines Momentbildes miteinander, so sieht man, daß sich ein bestimmter Schwingungszustand in gleichen Abständen wiederholt.

Vergleichen Sie den Schwingungszustand der Schwinger 1, 5 und 9 zur Zeit $t = 0$!

Den verschiedenen Momentbildern ist zu entnehmen, daß sich die Schwinger auf einer sinusförmigen Linie anordnen, die sich mit der Zeit verschiebt (im Bild 100/1 z. B. nach rechts). Daran ist noch einmal das Ausbreiten eines Schwingungszustandes zu erkennen.

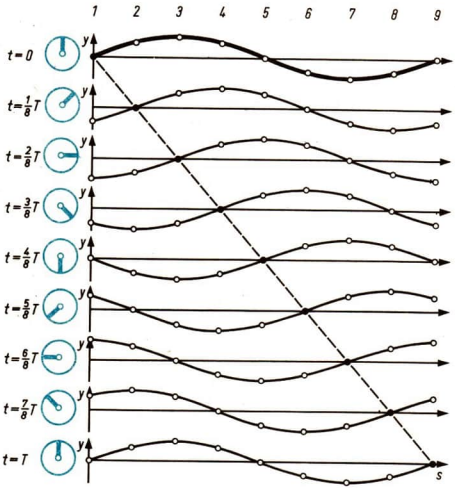


Bild 100/1 Neun Momentbilder einer nach rechts fortschreitenden Welle. Die gestrichelte Gerade zeigt das Vorrücken eines bestimmten Schwingungszustandes

Aus den Versuchen 26 und 28 und den Momentbildern (Bild 100/1) erkennt man:

> Die Elongation y (zur gleichen Zeit t) ist abhängig von der Entfernung s vom Erregungszentrum.
> $y = f(s)$, t = konstant

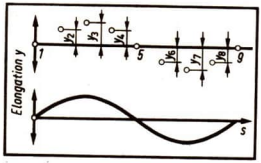


Bild 100/2 y-s-Diagramm einer Welle, für t = konstant. Die Entfernung s ist der jeweilige Abstand des Ruhepunktes eines Schwingers vom Erregerzentrum

Zur grafischen Darstellung (Bild 100/2) benutzt man die *Elongation* y der einzelnen Schwinger.

In diesem Beispiel wurde auf der Ordinatenachse die Elongation (Auslenkung aus der Ruhelage) der Schwinger aufgetragen. Bei anderen Wellen werden andere sich verändernde physikalische Größen, z. B. der Druck (bei Schallwellen), auf der Ordinatenachse aufgetragen.

Aus dem y-t-Diagramm eines einzelnen Schwingers, das im Bild 100/3 dargestellt ist, erkennt man weiter:

> Die Elongation y jedes einzelnen Schwingers (bei jeweils gleicher Entfernung s) ändert sich mit der Zeit.
> $y = f(t)$, s = konstant

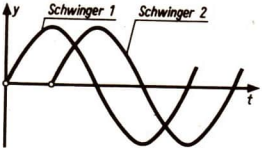


Bild 100/3 y-t-Diagramm einer Welle für s = konstant

Aus den Darstellungen (Bilder 100/2 und 100/3) geht hervor, daß Wellen nur mit zwei Diagrammen vollständig dargestellt werden können:

1. Das y-s-Diagramm für t = konstant (Bild 100/2);
2. Das y-t-Diagramm für s = konstant (Bild 100/3).

Die Kenngrößen einer mechanischen Welle

Die Wellen werden ebenso wie die Schwingungen (↗ S. 48) durch bestimmte Größen charakterisiert. Es sind dies die Elongation, die Amplitude, die Frequenz, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

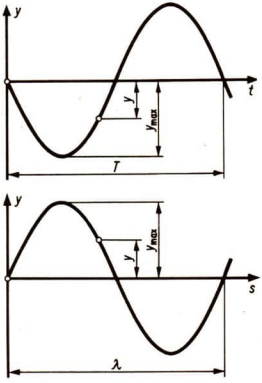


Bild 101/1 Die Kenngrößen einer Welle

Kenngröße	Formelzeichen	Erläuterung
Elongation	y	Die sich verändernde physikalische Größe
Amplitude	y_{max}	Maximalwert der sich verändernden physikalischen Größe
Frequenz	$f = \frac{1}{T}$	gleich der Frequenz der Schwingung (↗ S. 48)
Wellenlänge	λ	Abstand zweier in Ausbreitungsrichtung aufeinanderfolgender gleicher Schwingungszustände
Ausbreitungsgeschwindigkeit	v	Geschwindigkeit, mit der sich der Schwingungszustand (aber nicht der einzelne Schwinger!) fortbewegt

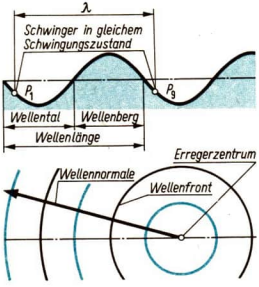


Bild 101/2 Schnitt einer Oberflächenwelle
Die Wellenfronten breiten sich kreisförmig vom Erregerzentrum aus

Man benutzt oft Wasserwellen, um bestimmte Gesetzmäßigkeiten aus der Wellenlehre darzustellen. Die Linien (Bild 101/2), die einander benachbarte, im gleichen Schwingungszustand befindliche Schwinger verbinden, heißen **Wellenfronten.**

Warum sind die Schwinger P_1 und P_9 (Bild 101/2) im gleichen Schwingungszustand?

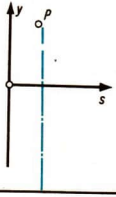
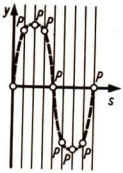
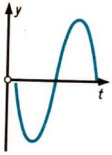
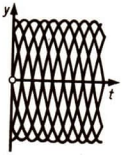
Die auf einer Wellenfront errichtete Senkrechte gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Diese Senkrechte heißt **Wellennormale.**

Je größer die Amplitude y_{max} ist (↗ S. 58), desto mehr Energie wird durch die Welle übertragen.

Die Lautstärke des Tones einer Instrumentensaite ist um so größer, je stärker sie gezupft wird, je größer die Amplitude der Saite ist.

Gegenüberstellung von Schwingung und Welle

Es sollen nun Schwingungen und Wellen einander gegenübergestellt werden, damit das Unterschiedliche und das Gemeinsame beider Erscheinungen deutlich wird.

	Schwingung	Welle
Eine Schwingung beschreibt die *zeitlich* periodische Änderung einer physikalischen Größe. Eine Welle ist ein Vorgang, bei dem sich *örtlich* und *zeitlich* periodisch eine physikalische Größe ändert. Die Welle beschreibt die Ausbreitung von Schwingungen.	$y = f(t)$	$y = f(s, t)$
Bei einer Schwingung verbleibt die Schwingungsenergie im Schwinger. Bei einer Welle wird Energie von dem Wellenerreger fort übertragen.	 *Vakuum*	 *Luft*
Bei einer mechanischen Schwingung wird die Elongation y eines Schwingers zu einer bestimmten Zeit durch die Ordinate des Punktes P dargestellt. Bei einer mechanischen Welle werden die Elongationen y mehrerer Schwinger zu einer bestimmten Zeit als Funktion der Entfernung s [$y = f(s)$] der Schwinger vom Erregerzentrum dargestellt. Die Verbindungslinie der Punkte P kann eine sinusförmige Kurve sein.		
Bei einer mechanischen harmonischen Schwingung wird die Elongation y eines Schwingers als Funktion der Zeit t in einem Diagramm als eine Sinuskurve dargestellt. $y = f(t)$ Bei der hier behandelten mechanischen Welle läßt sich die Elongation y als Funktion der Zeit t in einem Diagramm als eine Schar von Sinuskurven darstellen.		
Beachten Sie: Es ist zu unterscheiden die Sinuskurve einer Schwingung mit $y = f(t)$ von der Sinuskurve einer Welle mit $y = f(s)$. Die Welle $y = f(s, t)$ ist durch die zwei Funktionen $y = f(t)$ mit $s =$ konstant und $y = f(s)$ mit $t =$ konstant zu beschreiben.		

Die Grundgleichung der Wellenausbreitung

Schallwellen in Luft haben eine viel größere Ausbreitungsgeschwindigkeit als Oberflächenwellen im Wasser.

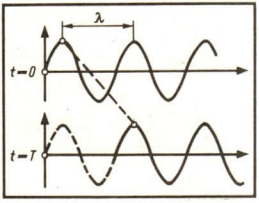


Bild 103/1 Fortschreiten einer Welle

Durch welche Beobachtungen läßt sich diese Aussage bestätigen?

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle hängt in erster Linie von der Art und vom Zustand des Stoffes ab, in dem die Ausbreitung stattfindet. In allen Fällen besteht zwischen der Frequenz, der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ein gesetzmäßiger Zusammenhang.
Im Bild 103/1 verschiebt sich ein Wellenberg um eine Wellenlänge nach rechts (vergleiche mit Bild 101/1). Die dabei verstrichene Zeit ist gleich der Schwingungsdauer T jedes Teilchens des Stoffes.
Die Geschwindigkeit ist der Quotient aus Weg und Zeit: $v = s/t$. Ersetzt man die beliebige Länge s durch die Wellenlänge λ, so ist für die Zeit t die Schwingungsdauer T zu setzen. Hieraus ergibt sich:

$v = \frac{\lambda}{T}$. Mit $T = \frac{1}{f}$ erhält man die

Grundgleichung der Wellenausbreitung	$v = \lambda \cdot f$ (37)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v einer Welle ist das Produkt aus der Wellenlänge λ und der Frequenz f dieser Welle.

Warum ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle die Geschwindigkeit der Ausbreitung eines Zustandes und nicht die eines Körpers?

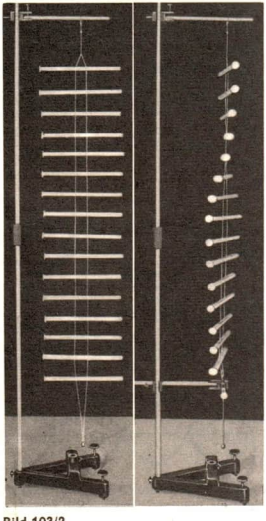


Bild 103/2

Bei einem Wellengerät nach JULIUS (Bild 103/2) beträgt die Wellenlänge 25 cm. Ein angestoßener Querstab führt 8 Schwingungen in 5 Sekunden aus. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit?

Gegeben:
$\lambda = 25$ cm
$t = 5$ s
$n = 8$

Gesucht:
v

Lösung:
$v = \lambda \cdot f$
$v = \lambda \cdot \frac{n}{t}$
$v = 25\ \text{cm} \cdot \frac{8}{5}\ \text{s}^{-1}$
$v = 40\ \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt 40 cm · s^{-1}.

Die Überlagerung zweier Wellen

Bei einer mechanischen Welle wird die zu übertragende Energie von einem Schwinger aufgenommen und an den benachbarten Schwinger durch Kopplung weitergegeben.

Welche Funktion hat die Kopplung in einem Stoff?

Wenn man in demselben Stoff mehrere Wellen erzeugt, so wird ein Schwinger von mehreren Bewegungen gleichzeitig erfaßt. Es erhebt sich die Frage, welche resultierende Bewegung der Schwinger ausführt, der unter der gemeinsamen Wirkung der einzelnen Wellen steht.

29 In einer Wellenwanne werden von zwei Erregerzentren zwei voneinander unabhängige Wellen erzeugt. Es entsteht das im Bild 104/1 gezeigte Wellenbild.

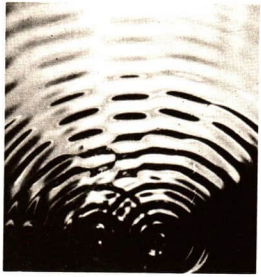


Bild 104/1 Überlagerung von Wellen (2 Erregerzentren)

Wenn sich zwei oder mehrere Wasserwellen ausbreiten, so überlagern sie sich. Aus Beobachtungen wurde folgender Erfahrungssatz gefunden:

> Laufen in einem Stoff mehrere gleichartige Wellen, so überlagern sie sich. Die Überlagerung von Wellen wird Interferenz genannt.

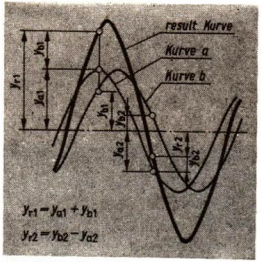


Bild 104/2 Darstellung einer aus zwei Wellen entstandenen Überlagerungswelle

Bei einer Überlagerung von Wellen werden die Amplituden an bestimmten Stellen verstärkt, an anderen geschwächt oder sogar ausgelöscht.
Aus dem vorstehenden Erfahrungssatz wird abgeleitet: Die grafische Darstellung (für t = konstant) von zwei einander sich überlagernden Wellen erhält man, wenn man die Elongationen der Schwinger (allgemein der schwingenden Größen) geometrisch addiert. In Bild 104/2 ist gezeigt, wie die geometrische Addition durchgeführt wird. Auch hieraus geht hervor, daß sich zwei oder mehrere Wellen durchaus nicht immer verstärken, sondern sich unter bestimmten Umständen völlig auslöschen können (Bild 104/3).

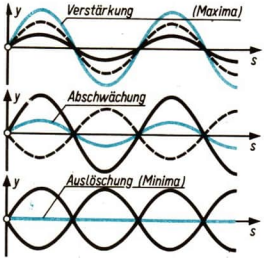


Bild 104/3 Entstehung von Maxima und Minima bei der Überlagerung von Wellen

Erklären Sie den Vorgang der Wellenabschwächung und -verstärkung bei der Überlagerung zweier Wellen! In welchem Falle tritt eine Wellenauslöschung ein?

Verstärkung und Abschwächung durch Interferenz ist ein für Wellen kennzeichnendes Merkmal.

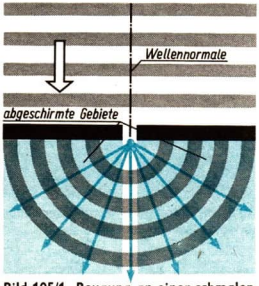


Bild 105/1 Beugung an einer schmalen Öffnung (Spalt)

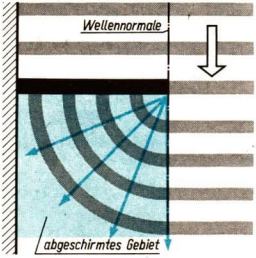


Bild 105/2 Beugung an einer Kante

Beugung von mechanischen Wellen

30 In einer Wellenwanne liegt ein geradliniges Hindernis mit einer schmalen Öffnung (einem Spalt). Es werden Wellen mit geradlinigen Wellenfronten erzeugt.

Man könnte vermuten, daß die ankommende Welle zum Teil durch die Öffnung läuft, die ursprüngliche Richtung beibehält und durch die Breite der Öffnung begrenzt wird.
Das Ergebnis ist jedoch ein anderes: Die Welle greift hinter dem Hindernis in das abgeschirmte Gebiet (Bild 105/1) hinüber. Sie wird gewissermaßen um die Kanten des Spaltes „herumgebogen". Diese Abweichung der Wellenausbreitung von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung nennt man *Beugung*. Je enger der Spalt im Vergleich zur Wellenlänge ist, desto stärker wird die Erscheinung der Beugung sichtbar.

31 Mit einem geradlinigen Hindernis wird ein Teil der Parallelwellen abgeblendet.

Es ist die gleiche Erscheinung wie beim Versuch 30 zu beobachten (Bild 105/2). Es hat den Anschein, als ob der Spalt (Versuch 30) oder die Kante (Versuch 31) ein punktförmiges Erregerzentrum für Kreiswellen wären.

Die Änderung der Ausbreitungsrichtung einer Welle an einem Spalt oder an einer Kante wird Beugung genannt.

Auf Grund der Beugung lassen sich auch Schallwellen wahrnehmen, wenn zwischen der Schallquelle und dem Hörer ein Hindernis vorhanden ist.

So ist es z. B. möglich, auch außerhalb eines Raumes durch ein geöffnetes Fenster zu hören, ob in diesem Raum gesprochen wird.
Physikalisch heißt das: Schallwellen werden gebeugt.

Nennen Sie weitere Beispiele für die Beugung!

Die Interferenz und die Beugung sind wesentliche Merkmale von Wellen. Sie werden zum Nachweis der Welleneigenschaften des Lichts (↗ S. 110), der Hertzschen Wellen (↗ S. 132) und der Röntgenstrahlen (↗ S. 120) herangezogen.

Reflexion von mechanischen Wellen

● *Erklären Sie die Reflexion von Lichtstrahlen (↗ Physik in Übersichten).*

32 ▼ In einer Wellenwanne liegt ein geradliniges Hindernis in einem bestimmten Winkel (z. B. 45°) zu den Wellenfronten und ragt etwas aus dem Wasser heraus. Es werden Wellen mit geradlinigen Wellenfronten hervorgerufen.

Man kann bei diesem Versuch erkennen, daß an dem Hindernis die Welle *reflektiert* wird (Bild 106/1).
Versuche auch bei anderen Winkeln zeigen immer wieder, daß zwischen der Richtung der Wellennormalen der einfallenden Welle und der reflektierten Welle gesetzmäßige Zusammenhänge bestehen (Bild 106/2).
Es ist aus den Versuchen zu erkennen:

> Der Einfallswinkel α und der Reflexionswinkel α' sind gleich groß.

■ Beim Bau von Konzerträumen, Studioräumen usw. muß nicht nur die Wirkung der auf direktem Wege ankommenden Schallwellen, sondern auch die Wirkung der von den Wänden, Säulen usw. reflektierten Schallwellen beachtet werden.

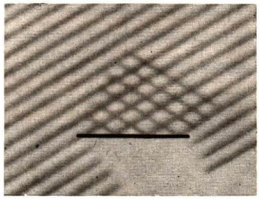


Bild 106/1 Reflexion von Wasserwellen in einer Wellenwanne

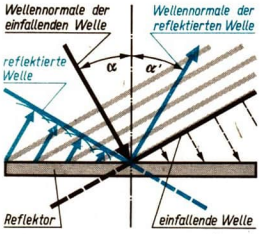


Bild 106/2 Schematische Darstellung der Reflexion einer Welle

Brechung von mechanischen Wellen

33 ▼ In einer Wellenwanne liegt eine Glasplatte, die etwa einen Millimeter von Wasser bedeckt ist. Es werden Wellen mit geradlinigen Wellenfronten erzeugt.

Man kann beobachten: Der Rand der Glasplatte stellt eine Grenzlinie dar, an der sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit ändert. Die Wellen laufen im flachen Wasser langsamer als im tiefen Wasser.
Wenn die Wellenfronten schräg auf die Grenzlinie zwischen tiefem und flachem Wasser treffen, werden sie aus ihrer ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt, man sagt auch *gebrochen* (Bild 106/3).

▶ > Die Änderung der Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit einer Wasserwelle beim Übergang vom tiefen Wasser in das flache Wasser (allgemein: von einem Körper in einen mit anderen Eigenschaften) wird Brechung genannt.

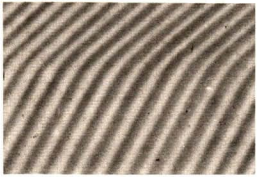


Bild 106/3 Brechung von Wasserwellen in der Wellenwanne

Wie die Reflexion von mechanischen Wellen läßt sich auch die Brechung schematisch darstellen (Bild 107/1).

Überlegen Sie, was geschieht, wenn Wasserwellen vom flachen Wasser in tiefes Wasser übergehen!

Unter Verwendung der Begriffe Einfallswinkel und Brechungswinkel können die Vorgänge bei der Brechung qualitativ (dem Wesen nach) erfaßt werden.
Der Versuch 33 zeigt, daß der Brechungswinkel beim Übergang vom tiefen Wasser in flaches Wasser kleiner als der Einfallswinkel ist.

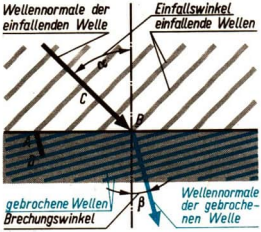


Bild 107/1 Schematische Darstellung der Brechung einer Welle

Beim Übergang einer Welle aus einem Stoff mit hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit in einen Stoff mit geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit ist der Einfallswinkel α größer als der Brechungswinkel β. Tritt umgekehrt die Welle in einen Stoff mit höherer Ausbreitungsgeschwindigkeit, so gilt $\alpha < \beta$.

Schallwellen werden beim Übergang von Luft von 10 °C in Luft von 20 °C so gebrochen, daß der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel ist. Beim Übergang von Luft in Kohlendioxid ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel.

Bei der Brechung einer Welle bleibt die Frequenz erhalten, die Wellenlänge ändert sich. Im Stoff mit größerer Ausbreitungsgeschwindigkeit hat die Welle nach der Gleichung $\lambda = \frac{v}{f}$ die größere Wellenlänge.

Lichtwellen

Das Licht als physikalische Erscheinung ist den Menschen schon sehr lange bekannt. Die heutige präzise Experimentiertechnik, der hohe Stand der wissenschaftlichen Theorien und die konsequenten materialistischen Methoden wissenschaftlichen Arbeitens haben zur Erkenntnis immer weiterer Eigenschaften des Lichts und zu ihrer technischen Anwendung in vielen Bereichen geführt, wie zum Beispiel das Ultrarot-Nachtsichtgerät, das mit für das Auge unsichtbarem Licht arbeitet.

Ausbreitung des Lichts

Zur Wiederholung werden aus dem Physikunterricht in der Klasse 6 einige grundlegende Sachverhalte und Gesetzmäßigkeiten genannt:

1. In einem optisch einheitlichen Stoff breitet sich das Licht allseitig und geradlinig aus.
2. Hinter einem lichtundurchlässigen Hindernis ist bei einer punktförmigen Lichtquelle Schatten und damit keine Wirkung des Lichtes wahrnehmbar.
3. Lichtstrahlen können sich ungestört kreuzen.
4. Der Lichtweg ist umkehrbar.
5. Trifft Licht auf die Oberfläche eines Körpers, erfolgt Reflexion nach dem Reflexionsgesetz.
6. Geht ein Lichtstrahl mit $\alpha \neq 0^0$ in einen anderen lichtdurchlässigen Stoff über, so wird er an der Grenzfläche gebrochen.

Bei der Beschreibung der Ausbreitung des Lichtes bedient man sich der Modellvorstellung des eindimensionalen Lichtstrahls.
Es gibt eine Vielzahl technischer Anwendungen von Reflexion und Brechung des Lichts, die auf der genauen Kenntnis ihrer gesetzmäßigen Zusammenhänge beruhen.

Die Reflexion des Lichts ist bei allen Spiegelungen und sehr intensiv am Meer oder auf schneebedeckten Bergen wahrnehmbar.
Die Brechung des Lichts ist oft Ursache für optische Täuschungen, was sich zum Beispiel im Verschätzen der Tiefe eines klaren Gewässers äußert.

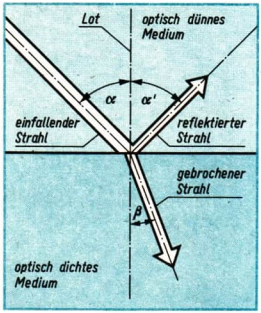


Bild 109/1 Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls

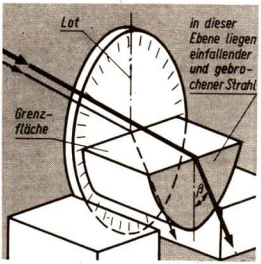


Bild 109/2 Optische Scheibe

Geben Sie eine einfache Versuchsanordnung zum Nachweis der Reflexion und der Brechung an, und erläutern Sie diese!

Am Beispiel des Bildes 109/2 soll diskutiert werden, was bei einem physikalischen Experiment zu beachten ist.

– Das Wesen eines Vorgangs läßt sich am besten erkennen, wenn vereinfachende Beobachtungsbedingungen geschaffen werden (scharfes Lichtbündel, das einen Schirm streift, Körper aus stark lichtbrechendem Stoff u. a.).

– Um Messungen durchführen zu können, wird der Schirm mit einer Skale versehen (Winkeleinstellung wegen der zu beobachtenden Richtungsabhängigkeit).

– Weil sich eine Gesetzmäßigkeit, unter *gleichen Bedingungen* wiederholt, in *gleicher Weise* zeigen muß, ist der Versuchsaufbau in notwendigem Maße zu justieren und auf Veränderungen der Bedingungen einzurichten (lotrechter Aufbau, Möglichkeit zur Veränderung der Einfallswinkel und zum Auswechseln der Körper aus verschiedenen lichtdurchlässigen Stoffen).

Zur eindeutigen Beschreibung der Gesetzmäßigkeit werden Hilfsbegriffe und physikalische Größen definiert (Einfallslot, einfallender Strahl, reflektierter Strahl, gebrochener Strahl, Einfallswinkel, Reflexionswinkel, Brechungswinkel).

Wiederholen Sie die Definitionen der genannten Größen!

Das **Reflexionsgesetz** lautet:

> Licht wird an der Grenzfläche zweier Stoffe so reflektiert, daß der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist. Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene.

Wieso ist die mathematische Formulierung des Reflexionsgesetzes $\alpha = \alpha$ nicht hinreichend?

Das **Brechungsgesetz** lautet:

> Licht wird beim Übergang in einen anderen Stoff so gebrochen, daß in Abhängigkeit von den Stoffen der Brechungswinkel kleiner oder größer als der Einfallswinkel ist. Die Winkel α und β verändern sich gleichsinnig. Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.

Reflexion und Brechung treten meistens gleichzeitig auf. Bei optischen Geräten sorgt der Mensch dafür, daß jeweils der gewünschte Effekt erreicht wird. Zum Beispiel werden optische Linsen mit einem reflexmindernden Belag versehen.
Metalle, vor allem Silber, Aluminium und Rhenium, haben ein hervorragendes Reflexionsvermögen. Zur Herstellung von Spiegeln bringt man dünne Metallschichten auf Glasträgern an. An Spiegeln in optischen Geräten ist im Gegensatz zu den Haushaltspiegeln die Vorderfläche des Glases verspiegelt, um störende Doppelreflexionen zu verhindern.

● *Stellen Sie anhand des Wissensspeichers „Physik in Übersichten" eine Übersicht von Anwendungsbeispielen zu den Gesetzmäßigkeiten der Reflexion und Brechung des Lichts zusammen!*

Eine Zwischenbilanz soll erfassen, was bisher über das Licht behandelt worden ist:
- die Ausbreitung des Lichts,
- einige Vorgänge beim Auftreffen von Licht auf ein Hindernis, wie Reflexion und Brechung,
- die Gesetzmäßigkeiten dieser Vorgänge.

Es ist noch nichts gesagt über
- das physikalische Wesen des Lichts,
- die Entstehung des Lichts.

Als erstes soll das *Wesen des Lichts* untersucht werden.

Als Mittel zur Lösung dieser Aufgabe bietet sich ein Vergleich an.
Bei der periodischen Ausbreitung von Schwingungszuständen mechanisch gekoppelter Körper, wobei Energie übertragen wird, ist der Begriff Welle geprägt worden. Seilwellen und Wasserwellen z. B. sind sichtbar. Aus ihrer Erscheinung sind die Merkmale und Kenngrößen dessen abgeleitet, was unter Welle zu verstehen ist. Treffen mechanische Wellen auf ein Hindernis, erfolgt Reflexion oder Reflexion und Brechung gemeinsam.
Bei der Ausbreitung des Lichts ist nun auch von Reflexion und Brechung die Rede. Das deutet darauf hin, daß die Wissenschaftler, die diese Bereiche der Physik begründeten, Gemeinsamkeiten oder zumindest Analogien zwischen der Ausbreitung mechanischer Wellen und der Ausbreitung des Lichts entdeckt haben.
Aus der äußeren, beobachtbaren Erscheinung (Bilder 111/1 und 111/2) ist aber das Gemeinsame oder Analoge **nicht** erkennbar.

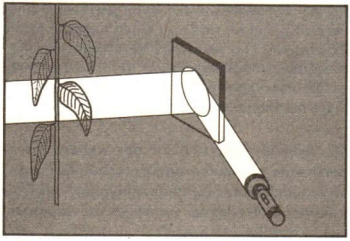
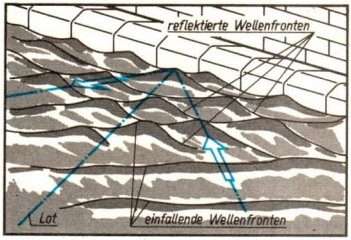


Bild 111/1 Reflexion von Wasserwellen an einer Wand
Bild 111/2 Reflexion eines Lichtbündels an einem Spiegel

Wie sieht es aber aus, wenn beide verschiedenen Vorgänge nach wissenschaftlichen Methoden beschrieben werden (Bilder 111/3 und 111/4)?



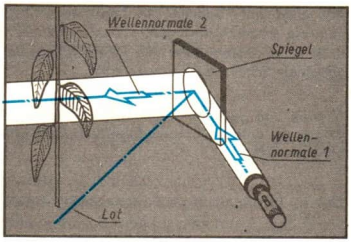


Bild 111/3 Reflexion von Wasserwellen, beschrieben mit Wellenfront, Wellennormale und Einfallslot
Bild 111/4 Reflexion eines Lichtbündels, beschrieben mit Einfalls- und Ausfallsstrahl (Normale) und Einfallslot

Feststellung; Der idealisierte Lichtstrahl, der die Ausbreitungsrichtung des Lichts kennzeichnet, erweist sich als analog zur Wellennormale, die die Ausbreitungsrichtung der Wasserwelle kennzeichnet.
Aus dieser Möglichkeit der Beschreibung mit gleichen Mitteln läßt sich vermuten, es handle sich um wesensgleiche Sachverhalte.
Die **Hypothese** lautet also, daß das Licht Eigenschaften besitze, die denen der mechanischen Welle entsprechen.

Welche Unterschiede bestehen zwischen den in den Bildern 111/3 und 111/4 dargestellten Sachverhalten?

Auf diesen Beobachtungen und Gedankengängen baute 1678 CHRISTIAN HUYGENS seine Wellentheorie des Lichtes auf, die im Widerspruch zur Korpuskulartheorie stand, die von den griechischen Atomisten und später besonders von DESCARTES und NEWTON (1669 veröffentlicht) vertreten wurde.

In einer *Hypothese* werden Aussagen, die für einen Erfahrungsbereich gesichert sind, auf einen anderen Erfahrungsbereich übertragen. Die vermutete Verallgemeinerung, die Erweiterung des Gültigkeitsbereichs der Theorie darf aber erst als richtig anerkannt werden, wenn alle Erfahrungen die Hypothese bestätigen und keine einzige ihr widerspricht.

Die **Schlußfolgerung** für das weitere Vorgehen ist, Experimente zu planen und durchzuführen, die die Welleneigenschaften des Lichtes nachweisen. Als typische Erscheinung eines Wellenvorganges ist die Beugung bekannt, die sich durch Interferenzbilder nachweisen läßt.

Die Beugung des Lichts

34 ▼ Von einer stark beleuchteten Lochblende ($d \approx 0{,}3$ mm) läßt man ein schwach divergentes Lichtbündel auf einen mindestens einen Meter entfernten Draht fallen, dessen Schatten auf einem Schirm aufgefangen wird.

35 ▼ Anstelle des Drahtes stellt man eine lichtundurchlässige Blende mit einem schmalen Spalt auf. Der Schirm bleibt am gleichen Ort.

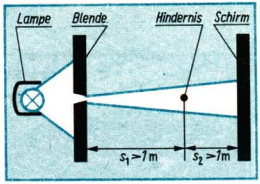


Bild 112/1

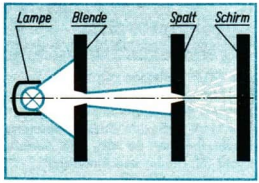
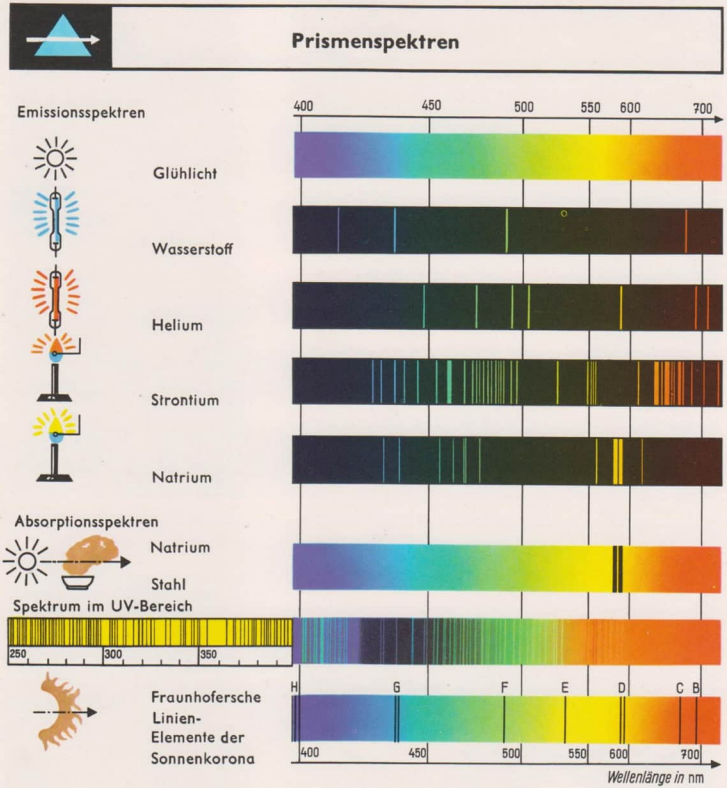


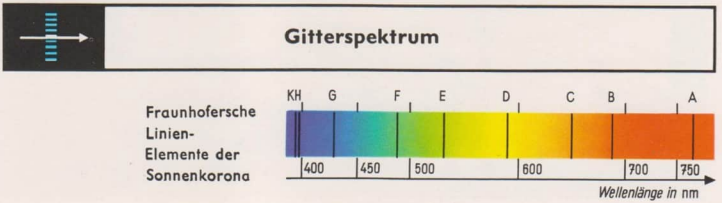
Bild 112/2

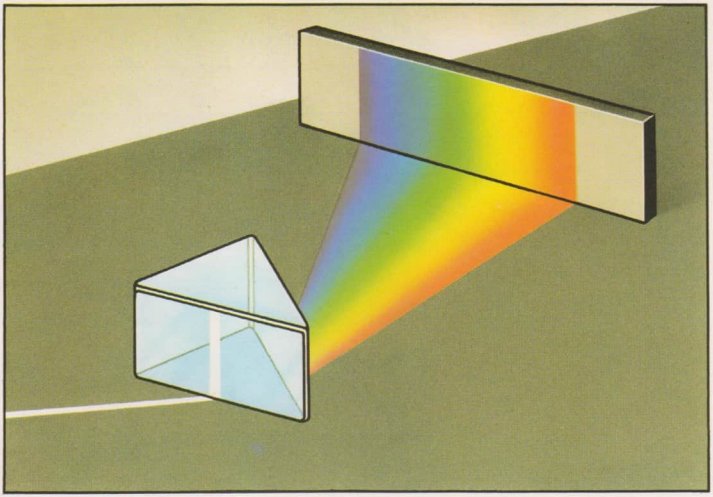
Der zu beobachtende Sachverhalt: Auf dem Schirm ist hinter dem Draht kein scharfer Schatten, hinter dem Spalt kein scharfes helles Spaltbild zu sehen. Es zeigt sich keine scharfe Begrenzung von Licht und Schatten, wie es nach der These der strahlenförmigen geradlinigen Ausbreitung des Lichts zu erwarten wäre. Es treten Helligkeitsmaxima und Helligkeitsminima in bestimmter Anordnung auf. Verwendet man nacheinander verschiedenes einfarbiges Licht, liegen die Maxima verschieden weit auseinander, bei Verwendung von weißem Glühlicht entstehen aufeinanderfolgende kontinuierliche Spektren.

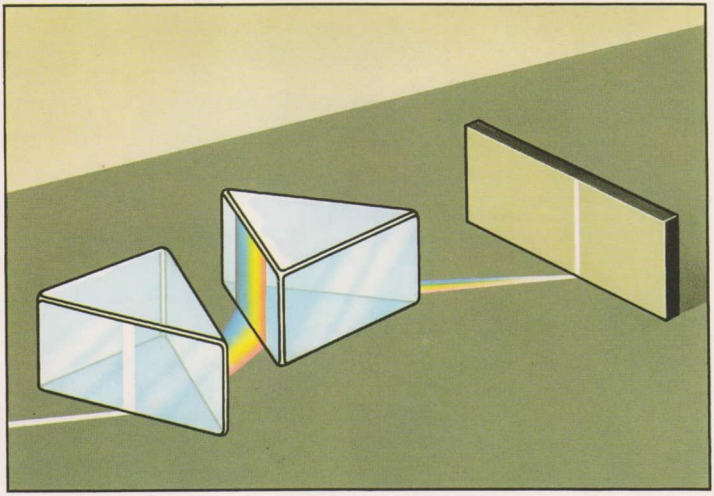
> Das Abweichen des Lichts von der geradlinigen Ausbreitung im selben Stoff, hervorgerufen durch ein Hindernis, wird Beugung genannt.

Die Ränder des Hindernisses (Spalt oder Draht) wirken wie neue Lichtquellen, von denen sich das Licht nach allen Seiten ausbreitet. Wollte man die Beugung mit dem Modell Lichtstrahl erklären (Bild 113/3), dann bliebe ungelöst,


Prismenspektren
Emissionsspektren
400
450
500
550
600
700
Glühlicht
Wasserstoff
Helium
Strontium
Natrium
Absorptionsspektren
Natrium
Stahl
Spektrum im UV-Bereich
250
300
350
H
G
F
E
D
C
B
Fraunhofersche Linien-Elemente der Sonnenkorona
400
450
500
550
600
700
Wellenlänge in nm


Gitterspektrum
KH
G
F
E
D
C
B
A
Fraunhofersche Linien-Elemente der Sonnenkorona
400
450
500
600
700
750
Wellenlänge in nm





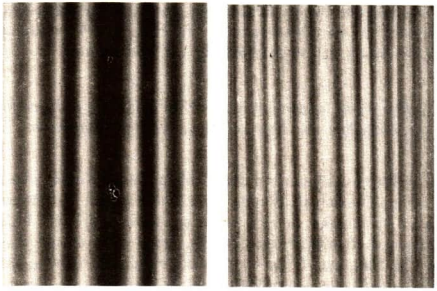


Bild 113/1 Beugung an einem Haar
Bild 113/2 Beugung an einem Spalt

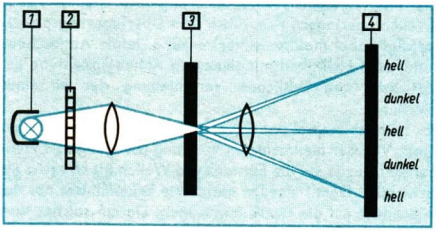


Bild 113/3 Versuch einer schematischen Darstellung des Strahlenverlaufs beim Beugen des Lichts am Spalt
1 – Lichtquelle
2 – Filter
3 – beugender Spalt
4 – Schirm

warum die Strahlen nur an bestimmten Stellen auf den Schirm treffen (Helligkeit) und warum sie an anderen Stellen nicht auftreffen (Dunkelheit). Tatsache ist aber, daß hinter einem Spalt ein Beugungsbild entsteht.
Die Beugungsbilder werden um so deutlicher, je mehr Spalte nebeneinander liegen. Ein System von Spalten heißt *Gitter*.

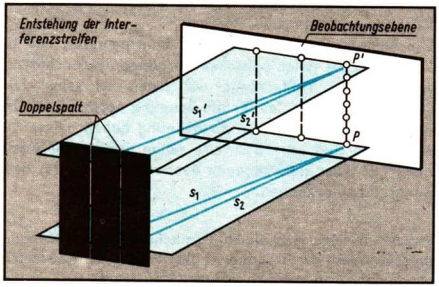


Bild 113/4 Entstehung der Interferenzstreifen durch Beugung am Doppelspalt

Die physikalische Erklärung des Sachverhalts: Das Verfahren der Beschreibung mit Hilfe der Vorstellung, Licht breite sich strahlenförmig aus, versagt hier.

● *Stellen Sie die Widersprüche zwischen Erfahrung und einseitiger Vorstellung von der Ausbreitung des Lichts zusammen!*

Die Richtungsänderung des Lichts an einer Kante, wobei keine Reflexion stattfinden kann, und das Sich-Verstärken und Auslöschen sind zu erklären, wenn man dem Licht Eigenschaften zuschreibt, die denen der Welle entsprechen (↗ S. 104). Das Gitter ist demnach Hindernis für eine einfallende Welle. Jeder Spalt ist ein Wellenzentrum. Die (in der Fläche gesehen) sich kreisförmig ausbreitenden neuen Wellen überlagern sich. Nach dem Überlagerungsprinzip erfolgt dabei maximale Verstärkung, totale Auslöschung oder eine Helligkeitsminderung in Abhängigkeit von der örtlichen und zeitlichen Verschiebung der einzelnen Wellen.

Es sei noch einmal der *Gang der Erkenntnisfindung* wiederholt: Von der beobachteten Wirkung (Beugung und Interferenz) wurde auf die Existenz von Wellen als Ursache geschlossen. Damit wurden gesicherte Erkenntnisse aus der Mechanik auf die Optik übertragen. Da ein solches Vorgehen schon bei der Reflexion und Brechung des Lichts zu guten Ergebnissen führte, ist die Beugung eine weitere Bestätigung für die Hypothese von den Welleneigenschaften des Lichts. Die Beugung ist sogar ein sehr wesentliches Argument dafür, weil sie mit der einfacheren Vorstellung von der strahlenförmigen Ausbreitung nicht erklärt werden kann (vgl. mit Reflexion und Brechung).

Wenn die Lichtausbreitung wellenförmig geschieht, muß natürlich eine Wellenlänge bestimmbar sein. Sie läßt sich sehr günstig aus Messungen am Interferenzbild nach der Beugung ermitteln (Bild 115/1).

Die Beugung des Lichts wird oft nicht bemerkt, und sie kann auch bei vielen optischen Vorgängen vernachlässigt werden. Die Wellenlänge des Lichts ist sehr klein ($\lambda \approx 500 \cdot 10^{-9}$ m), das für die Beugung notwendige Hindernis muß eine ähnliche Ausdehnung haben. Diese Bedingungen sind normalerweise selten erfüllt. Außerdem bedarf es einer sehr genauen Beobachtung, um das Beugungsbild zu erkennen.

Der Schall, eine mechanisch-akustische Wellenerscheinung, unterliegt auch der Beugung, ist aber leichter zu beobachten. Wenn der Lärm von der Hauptverkehrsstraße auch in den

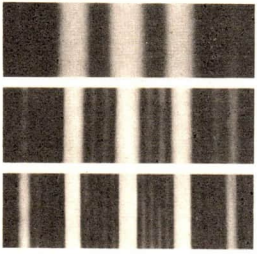


Bild 114/1 Beugungserscheinung hinter einem Gitter mit 2, 4 und mehr Spalten

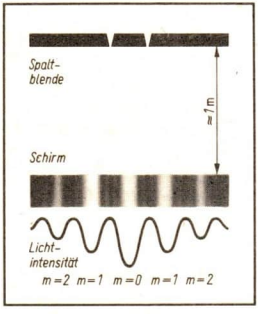


Bild 114/2 Beugung am Doppelspalt
Bedingungen für ein gutes Beugungsbild: Spaltbreite ≦ Wellenlänge
Schirmabstand > 1 m

Bild 114/3 Überlagerung zweier kreisförmiger Oberflächenwellen

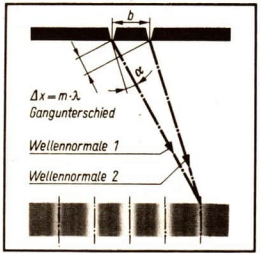


Bild 115/1 Zeichnerische Erläuterung der Interferenz durch Beugung am Doppelspalt
(Spaltabstand b und Winkel α sind nicht maßstabgerecht, Schirm um 90° herumgeklappt)

Seitenstraßen zu hören ist, dann ist das neben der Reflexion auch eine Folge der Beugung; denn die Wellenlänge des Schalls liegt für nicht allzu hohe Frequenzen in der Nähe der „Spaltbreite" der Seitenstraße.

Das Licht als elektromagnetischer Sachverhalt

Mit der Aufdeckung der Welleneigenschaften ist die Frage nach dem Wesen des Lichts noch nicht erschöpfend beantwortet.
Eine völlige Gleichstellung der mechanischen Welle mit dem Licht ist auf jeden Fall falsch. Die Analyse und Synthese der Gemeinsamkeiten und Unterschiede wird näher an die volle Erkenntnis heranführen.

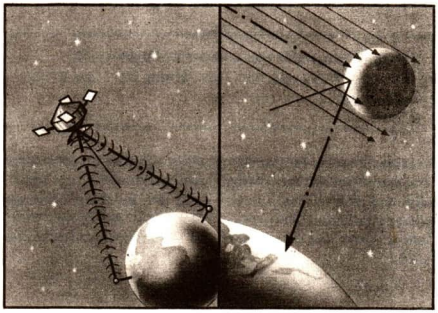


Bild 115/2 Ein Funksignal wird von einem Sender ausgestrahlt. Es breitet sich aus und kann an anderer Stelle wieder empfangen werden. An einem Reflektor wird es reflektiert.
Ein Lichtsignal wird von einer Lichtquelle ausgestrahlt. Es breitet sich aus und kann an anderer Stelle wieder empfangen werden. Am Reflektor (Spiegel) wird es reflektiert

Lange ist nach dem physikalischen Träger der „Lichtwellen" gesucht worden. In Analogie zur Mechanik glaubte man bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts an einen „Weltäther", da ja mechanische Wellen eines Trägers aus Stoff bedürfen. Daß Licht elektromagnetischer Natur ist, wurde erst so spät erkannt, weil viele Jahrzehnte lang die Untersuchungen an Licht und elektromagnetischen Feldern getrennt durchgeführt worden waren.
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts c ist die gleiche wie die eines elektromagnetischen Feldes, das durch elektromagnetische Vorgänge entstanden ist und von einer Antenne in den Raum austrahlt. Für das Vakuum ist

$c = 300\,000\ \mathrm{km\,s^{-1}}$.

Gemeinsam ist für den mechanischen und den elektromagnetischen Sachverhalt

die räumliche Ausdehnung vom Erregerzentrum mit einer Geschwindigkeit, die abhängig von dem Stoff ist, durch den die Ausbreitung erfolgt.
Unterschiedlich sind für den mechanischen und den elektromagnetischen Sachverhalt
die zu übertragende Energie, einmal mechanische, das andere Mal elektromagnetische,
die sich zeitlich und örtlich periodisch verändernden Größen, einmal ist es die Elongation y (eine Länge), das andere Mal sind es elektrische Größen, wie die elektrische Feldstärke E, die Spannung U oder die Stromstärke I und auch magnetische Größen,
die Ausbreitung der mechanischen Welle ist an einen Stoff gebunden, das elektromagnetische Feld breitet sich auch im Vakuum aus.

Zum *Wesen des Lichts* kann ausgesagt werden

> Licht ist ein elektromagnetischer Sachverhalt.
> Es zeigt Eigenschaften, die denen der Welle entsprechen.

In diesen Abschnitten wurden wichtige optische Erscheinungen und Vorgänge mit den Welleneigenschaften des Lichts erklärt. Um das Wesen des Lichts wurde ein jahrhundertelanger wissenschaftlicher Streit geführt, der erst in den letzten fünfzig Jahren durch die Entwicklung der Quantentheorie sein Ende fand.

Die Entstehung des Lichts

Die elektromagnetische Natur des Lichts ist hauptsächlich aus seiner Entstehung zu erkennen. Damit wird durch die Antwort auf die Frage nach der Entstehung auch die Frage nach dem Wesen des Lichtes beantwortet.
Von folgenden aus dem Abschnitt Kernphysik und dem Unterrichtsfach Chemie bekannten Tatsachen kann hier ausgegangen werden:
– Die Räume des wahrscheinlichen Aufenthalts der Elektronen mit annähernd gleicher Energie und die ihnen entsprechenden Energieniveaus werden als Elektronenschalen oder Schalen der Atomhülle bezeichnet (Chemie Klasse 8).
– Atome werden durch eine mit Energieumwandlung verbundene Elektronenzufuhr oder -abgabe in einen angeregten Zustand gebracht (Physik und Chemie Klasse 8).

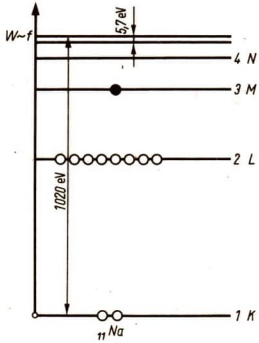


Bild 117/1 Energieniveaus des Natriumatoms
Die grafische Darstellung der Energiewerte in einem eindimensionalen Koordinatensystem heißt in der Fachsprache Energie-„TERMSCHEMA". Terme sind bestimmte Größen, mit denen gerechnet wird. Der Begriff Term ist auch in der Mathematik üblich. Ein Termschema liegt auch vor, wenn z. B. die Durchschnittsgeschwindigkeiten verschiedener Verkehrsmittel längs einer Achse dargestellt oder die Längen ausgewählter Flüsse der Sowjetunion übereinander aufgetragen werden (vgl. Lehrbuch Physik Kl. 6, Seite 26, und Lehrbuch Geographie Kl. 7, Seite 18)

– Bei der Fotosynthese wird der Katalysator Chlorophyll durch Lichtenergie aktiviert, angeregt (Biologie Klasse 9).
– Wellen sind eine besondere Form der Energieübertragung (Physik Klasse 10).

Licht wird stets durch atomare Prozesse erzeugt. Bedingung für die Entstehung von Licht ist die Zufuhr von Energie z. B. an den Glühdraht in der Glühlampe oder an das Gas in der Gasentladungslampe.

Der Prozeß der Lichtemission ist gebunden an den Übergang eines angeregten Atoms in einen energieärmeren Zustand. Dabei springt ein Elektron der Atomhülle von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau. Die Energiedifferenz zwischen Anfangs- und Endzustand des Atoms wird als Licht einer bestimmten Frequenz emittiert. Licht ist eine elektromagnetische Strahlung; sie wird im Atom beim Übergang in einen energieärmeren Zustand erzeugt.

Die Darstellung der Energieniveaus (Bild 117/1) ist die Widerspiegelung experimenteller Befunde. Daraus ist folgendes zu erkennen:

– Jede Veränderung des Atomzustandes entspricht einer Veränderung seines Energiebetrages.
– Die Frequenzen des von einem Atom emittierten Lichts sind den Energiedifferenzen proportional, die beim Übergang eines Atoms von einem höheren in einen niedrigeren Energiezustand auftreten.

*Der Proportionalitätsfaktor zwischen Energie und Frequenz ist das Plancksche Wirkungsquantum h ($W = h \cdot f$).
Die Lichtenergie wird also in Beträgen emittiert und auch absorbiert, die von der Frequenz abhängig sind. Ein Energiebetrag der Größe $h \cdot f$ wird als Lichtquant oder als Photon bezeichnet.
Licht ist zusammengesetzt zu denken aus einzelnen Lichtquanten oder Energiequanten oder Photonen vom Betrage $h \cdot f$.*

Praktisch sind solche energetischen Prozesse in der Atomhülle, die mit der Ausstrahlung von Licht verbunden sind, in vielfältiger Form möglich.

1. Durch Strahlung derselben Frequenz: Wird z. B. Natriumdampf vom Licht einer Bogenlampe bestrahlt, emittiert der Natriumdampf Licht der charakteristischen Natriumfrequenz, nachdem er vorher die notwendige Energie aus der Strahlung der Lampe aufgenommen hat.
2. Durch Strahlung höherer Frequenzen: Wird z. B. Fluoreszeinlösung von weißem Licht beleuchtet, strahlt sie nur grünes Licht nach allen Seiten aus. Das restliche, durchfallende Licht ist rot.

Die Energiedifferenz zwischen der einfallenden und ausgesandten Strahlung tritt als Wärme in der Lösung auf. Erfolgt die Lichtemission während der Lichteinstrahlung und noch kurz danach, spricht man von Fluoreszenz, erfolgt sie nachhaltig (wie bei der Leuchtfarbe), spricht man von Phosphoreszenz.
3. Durch Elektronenstoß: Das Leuchten eines Stoffes, z. B. auf dem Schirm der Fernsehröhre oder in den Leuchtröhren, kann auch durch das Zusammenstoßen der von der Katode austretenden Elektronen mit den Atomen des Gases und des Leuchtstoffs in der Röhre zustande kommen.

Verknüpfung der Erkenntnisse über Lichtemission und Elektronenbewegung. Licht entsteht, wenn angeregte Atome in einen niedrigeren Energiezustand übergehen. Bildlich gesprochen springen dabei Elektronen von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau. Der Elektronenübergang ist selbstverständlich verbunden mit einer Veränderung des elektrischen Feldes im Atom. Jedes veränderliche elektrische Feld ist – wie aus Klasse 9 bekannt – mit einem veränderlichen magnetischen Feld verbunden. Das entstehende veränderliche elektro-magnetische Feld wird abgestrahlt. Der Vorgang zeigt den untrennbaren Zusammenhang der Vorgänge im Atom mit der Lichtemission, er zeigt die Wechselbeziehungen zwischen der Bewegung der Teilchen und der Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Felder.

> Licht ist eine elektromagnetische Strahlung. Es hat seinen Ursprung in Vorgängen innerhalb der Atomhülle.

● *Vergleichen Sie die Emission von Licht mit der Emission radioaktiver Strahlung!*
(Bedingungen ihrer Entstehung, Ort ihrer Entstehung, ihr physikalisches Wesen)

Die Zerlegung des Lichts

Vorbemerkung: Hiermit wird eine neue physikalische Erscheinung untersucht, aber zugleich ein weiterer Schritt zur Bestätigung der Hypothese über die Welleneigenschaften des Lichts getan.

Die Zerlegung des Lichts regte die Menschen schon immer zur Verwunderung und Freude an. J. W. VON GOETHE

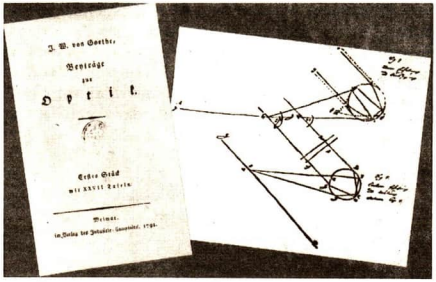

J. W. von Goethe,
Beyträge
zur
Optik.
Erstes Stück
mit XXVII Tafeln.
Weimar.
im Verlag bey Industrie-Comptoirs, 1791.

Bild 119/1 Ausschnitt aus einer wissenschaftlichen Arbeit J. W. von Goethes über das Licht

beschäftigte sich längere Zeit mit diesem Sachverhalt. Auch heute noch empfinden wir z. B. immer wieder Freude an der Schönheit des Regenbogens. Wir sind aber durch Einsicht in die physikalischen Ursachen außerdem in der Lage, die Lichtzerlegung technisch sehr vielseitig zu nutzen.

Das Spektrum. Brechung des Lichts beim Übergang von einem Stoff in einen anderen heißt Änderung der Ausbreitungsrichtung. Die Richtung wird auch durch die Form des durchstrahlten Körpers beeinflußt. Planparallele Platten liefern zum Beispiel nur eine Parallelverschiebung. Körper mit zwei nichtparallelen Seitenflächen leiten ein Lichtbündel stets in eine von der einfallenden abweichende Richtung. Körper mit einer speziellen Form, die Linsen, erzeugen durch Brechung Abbildungen. Eine Erscheinung, die dabei immer mehr oder minder auffällig zu bemerken ist, soll nun besonders untersucht werden. Es ist das **Auftreten von Farben.** Dazu ist eine Versuchsanordnung nötig, die diese Erscheinung begünstigt (Bild 119/2).

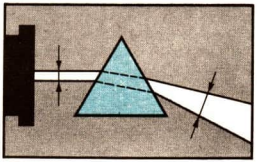


Bild 119/2 Schematische Darstellung der Ablenkung und Verbreiterung eines Lichtbündels durch ein optisches Prisma

Ein durch das Prisma geschicktes Lichtbündel ist hinter dem Prisma nicht nur abgelenkt, sondern auch weiter geöffnet als vorher. Es taucht die Frage auf, ob diese Beobachtung dem Brechungsgesetz widerspricht. 36 ▼

Ein schmales, nahezu paralleles Lichtbündel (Sonnenlicht), durch einen Spalt ausgeblendet, durchquert ein Prisma und wird in großer Entfernung auf einem Schirm aufgefangen. Eine Abbildungslinse zwischen Spalt und Prisma verbessert den Effekt. 37 ▼

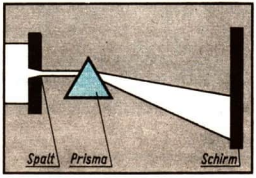


Bild 119/3

Beobachtungsergebnis: Das auf dem Schirm entstandene Spaltbild ist nicht nur abgelenkt, es ist auch nicht mehr weiß, sondern es leuchtet in prächtigen Farben, wie sie

vom Regenbogen bekannt sind. NEWTON nannte die erhaltene farbige Erscheinung **Spektrum.** Da die farbigen Spaltbilder nebeneinander erscheinen, ist das Gesamtbild bei Ablenkung durch ein Prisma auch breiter als vorher. Die im Spektrum sichtbaren Farben gehen allmählich ineinander über, so daß man die Zahl der Farbtöne nicht genau angeben kann.

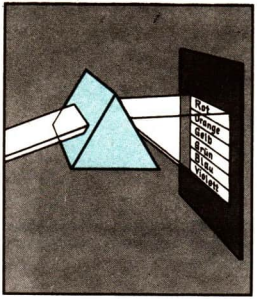


Bild 120/1 Schematische Darstellung der Entstehung eines Spektrums

> Deutlich erkennbare Spektralfarben sind Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett.

Die vom Prisma hervorgerufene Ablenkung ist abhängig
von der Form des Prismas (brechender Winkel),
von der Größe des Einfallwinkels,
von der Art der durchstrahlten, aneinandergrenzenden Stoffe (z. B. Luft und Kronglas, Wasser und Flintglas o. ä.),
von der Farbe des benutzten Lichts.
Das läßt zunächst den Schluß zu, den schon NEWTON zog (wörtliche Übersetzung):

> Das weiße Licht entsteht durch die Überlagerung einer unendlichen Anzahl farbigen Lichts.

Die Umkehrung der Zerlegung, das Zusammenlegen durch Überlagerung, kann experimentell nachgewiesen werden.

● *Überlegen Sie, wohin die zur Wiedervereinigung der Spektralfarben notwendige Sammellinse im Versuchsaufbau (Bild 120/1) zu stellen ist, und überprüfen Sie die Richtigkeit Ihrer Überlegung!*

Es soll nun noch gesagt werden, durch welche physikalische Größe des Lichts der Betrag der Ablenkung bestimmt ist. Es wird also der Zusammenhang zwischen der qualitativen Eigenschaft und der entsprechenden quantitativ erfaßbaren, für die Farbe charakteristischen Größe gesucht.
Wie der Betrag der Brechung mechanischer Wellen von der Frequenz dieser Wellen abhängt, sind die unterschiedlichen Beträge der Ablenkung farbigen Lichts ebenfalls mit Hilfe der Frequenz zu erklären. Damit ist eine weitere Eigenschaft des Lichts aufgedeckt, die denen der mechanischen Welle entspricht.

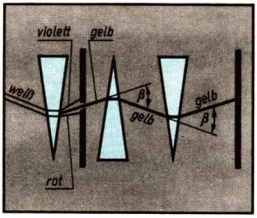


Bild 120/2
Spektralfarben sind solche, die sich nicht weiter zerlegen lassen. Dieser Sachverhalt kann mit der gezeigten Versuchsanordnung bewiesen werden

Farbe	Frequenz f in Hz	Wellenlänge λ in nm
Rot	$3{,}7 \cdot 10^{14}$	800
Orange	$5 \cdot 10^{14}$	600
Gelb	$5{,}2 \cdot 10^{14}$	580
Grün	$5{,}6 \cdot 10^{14}$	530
Blau	$6{,}5 \cdot 10^{14}$	460
Violett	$7{,}5 \cdot 10^{14}$	400

Tabelle 121/1 Mittlere Frequenzen und Wellenlängen der Spektralfarben

Es sei noch einmal zusammengefaßt, welche dieser Eigenschaften hier dargelegt worden sind:
1. Licht wird an Hindernissen gebeugt.
2. Licht besteht aus verschiedenen, durch die Frequenz bestimmten Anteilen, die sich überlagern (interferieren).
3. Die Brechung des Lichts ist frequenzabhängig.

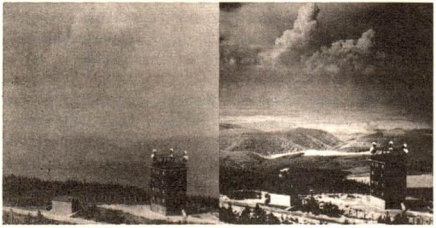
Weiter oben war festgestellt worden, daß die Farbe des Lichts von der Frequenz der mit dem Auge wahrnehmbaren Wellenerscheinung abhängt. Wenn man diesen Gedankengang umkehrt, kann man weiterführend die Frage stellen: Welche Wellenerscheinungen gibt es bei Frequenzen, die dem Frequenzbereich des Lichts benachbart und dem menschlichen Auge nicht sichtbar sind? Wie kann man diese Wellenerscheinungen nachweisen, und wie können sie technisch genutzt werden?

In das von einer Bogenlampe ausgehende und durch ein Prisma zerlegte Lichtbündel bringt man einmal ein Ultraviolettfilter, zum anderen ein Ultrarotfilter. Zum Nachweis am Schirm dienen Fluoreszenzpapier und ein berußtes Thermometer oder besser eine Thermosäule. 38 ▼

In beiden Fällen (Versuch 38) ist keine Spektralfarbe mehr zu sehen. Im ersten Fall ist aber jenseits der Stelle, wo sonst der Rand des violetten Spektrums war, ein Aufleuchten des Fluoreszenzpapiers, im zweiten Fall jenseits des roten Randes ein Ansteigen der Temperatur zu vermerken. Beides sind Beweise dafür, daß auch außerhalb des sichtbaren Bereichs Strahlung vorhanden ist, die mit geeigneten Objekten in Wechselwirkung tritt.
Aus der Lage des Spektrums des sichtbaren Lichts erklärt sich die Bezeichnung dieser Strahlung. Man kann sie jedoch exakter mit dem Betrage der Frequenz oder der Wellenlänge erklären.
Zwischen den Bereichen des roten Lichts ($\lambda \approx 800 \cdot 10^{-9}$ m) und der kürzesten Hertzschen Welle ($\lambda \approx 10^{-4}$ m) liegt die **ultrarote** Strahlung (oft auch infrarot genannt). Jenseits des violetten Lichts ($\lambda < 400 \cdot 10^{-9}$ m) bis in den Bereich der Röntgenstrahlung hinein ($\lambda \approx 10^{-9}$ m) liegt die **ultraviolette** Strahlung.

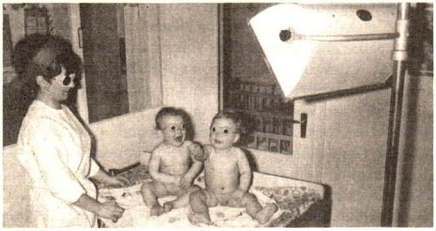
Beachten Sie, daß der Begriff „Licht" oft für einen viel größeren Wellenlängenbereich verwendet wird, als er durch das menschliche Auge wahrnehmbar ist. Ist das physikalisch gerechtfertigt? Tragen Sie Beispiele über das Auftreten der ultraroten und der ultravioletten Strahlung zusammen und berichten Sie, wie sie genutzt wird bzw. wie man sich vor ihr schützt!

Anwendungsbeispiele
UR-Strahlung und UV-Strahlung

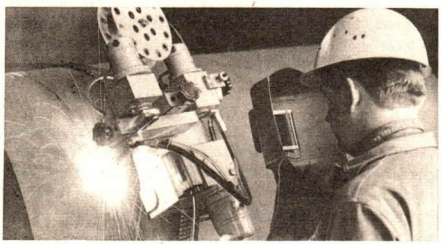


Ultrarotlicht-Fotografie. Fotografische Schichten können für ultrarotes Licht empfindlich gemacht werden.
Ultrarotes Licht wird von den Trübungen der Atmosphäre wie Staub, Dunst, Nebel usw. weniger gestreut als das sichtbare Licht. Fernaufnahmen werden deshalb bei Ultrarotlicht-Fotografien deutlicher als bei Tageslicht-Fotografien.

Ultrarot-Sichtanlage. Für militärische Zwecke wird Ultrarotlicht eingesetzt, um unbemerkt Ziele zu „beleuchten". Von einem Ultrarot-Scheinwerfer wird mit dem Auge nicht wahrnehmbares Licht ausgesandt und auf Beobachtungs- oder Zielobjekte gerichtet. Das von dort reflektierte Licht wird im Empfänger der Sichtanlage aufgefangen und durch einen Bildwandler als sichtbares Bild aufgezeichnet.



Ultraviolett-Bestrahlung. Ultraviolettes Licht ist sehr energiereich. Es vermag Krankheitskeime zu vernichten und Pflanzenschädlinge zu töten und wird deshalb auch bei der Entkeimung angewendet. Der medizinische Einsatz mit Hilfe der Höhensonne bedient sich vor allem der Durchdringungsfähigkeit (Tiefenwirkung) des ultravioletten Lichtes.



Ultraviolett-Lichtschutz. Eine besonders intensive ultraviolette Lichtstrahlung tritt beim Lichtbogenschweißen auf. Entsprechend den Arbeitsschutz-Bestimmungen muß deshalb der Elektroschweißer eine Schutzbrille tragen oder eine Schutzmaske benutzen; die Lichtquelle muß möglichst vollständig abgeschirmt werden, und alle gefährdeten Personen sind durch Hinweisschilder zu warnen.

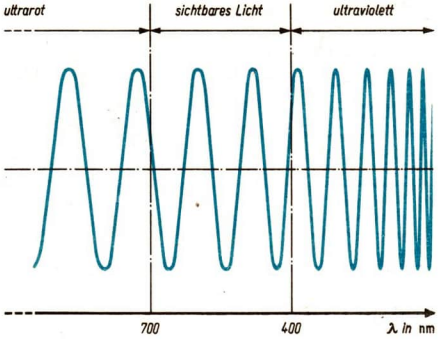


Bild 123/1 Die Übergänge von sichtbarem Licht zu Ultrarot und Ultraviolett (nicht maßstabgerecht)

Nach der Darstellung in Bild 123/1 ist es ganz logisch zu fragen, was denn vor und hinter, also links und rechts von den aufgezeichneten Wellenbereichen ist. Gibt es auch elektromagnetische Wellen mit kleineren und größeren Frequenzen? Hat die Skale der Frequenz irgendwo ein Ende? Auf diese Fragen werden die folgenden Kapitel Antwort geben. Zuvor wird das Spektrum des Lichts noch etwas näher betrachtet.

Kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum

Nicht alle Lichtquellen senden rein weißes Licht aus, das sich aus allen Spektralfarben zusammensetzt.

Eine Natriumdampflampe – oder einfach eine durch Kochsalz gefärbte Gasflamme – liefert zum Beispiel in der Versuchsanordnung nach Bild 123/2 nur einen schmalen gelben Streifen auf dem Schirm. 39 ▼

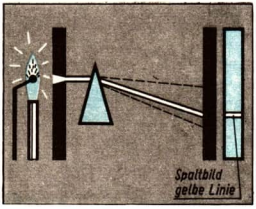


Bild 123/2 Nachweis einer Spektralfarbe

Andere Stoffe lassen hinter dem Prisma andersfarbige Linien auf dem Schirm erscheinen. Die Gesamtheit der von einem Stoff ausgesendeten Spektrallinien wird **Linienspektrum** genannt.

> Ein lückenlos zusammenhängendes Band der Spektralfarben nennt man kontinuierliches Spektrum. Diskontinuierliche Spektren heißen Linienspektren.

Ein kontinuierliches Spektrum kann auch unvollständig sein, z. B. fehlt in dem Spektrum der Kerzenflamme der blaue Anteil.

Nach der Art des untersuchten Stoffes unterscheidet man

emittierende Stoffe	Bezeichnung des Spektrums		Beispiel
1. atomare Gase	Linienspektrum	diskontinuierliche Spektren	
2. molekulare Gase	Bandenspektrum		
3. Festkörper, Flüssigkeiten, Gase	Kontinuierliches Spektrum		

Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum. Untersucht man Spektren nach der Art ihrer Entstehung, so findet man zwei Arten.

40 Wird bei einer Geräteanordnung von Spalt, Prisma und Schirm der Spalt mit einer Natriumflamme beleuchtet, sieht man auf dem Schirm die gelbe Natriumlinie. Wird jedoch der Spalt mit einer Glühlampe angestrahlt – sie erzeugt ein kontinuierliches Spektrum – und hält man eine Natriumflamme zwischen Lampe und Spalt, dann fehlt im kontinuierlichen Spektralbild an bestimmter Stelle die gelbe Linie (↗ Farbbeilage).

Zur Übersicht: Je nach den Bedingungen, unter denen sich ein Gas befindet, ergeben sich diskontinuierliche oder kontinuierliche Spektren: Diskontinuierliche Spektren ergeben sich bei Gasen unter niedrigem Druck (Zeilen 1 und 2), kontinuierliche Spektren ergeben sich bei Gasen unter hohem Druck (Zeile 3). ↗ Lehrbuch Astronomie, Kl. 10, S. 69

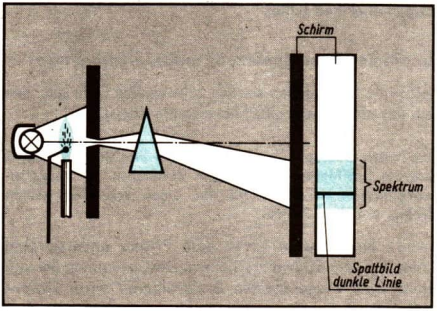


Bild 124/1 Schematische Darstellung der spektralen Untersuchung von Stoffen

Im ersten Fall (Versuch 40) hat der Stoff der Lichtquelle das Spektrum durch „Aussenden" von Licht erzeugt, deshalb die Bezeichnung Emissionsspektrum[1]. Im zweiten Fall hat ein leuchtender Stoff (Natriumdampf) zwischen Lichtquelle und Spalt aus dem Licht der Lichtquelle (Glühlampe) einen Teil „verschluckt", nicht hindurchgelassen, man spricht vom Absorptionsspektrum[2].

[1] emittere (lat.) ... aussenden
[2] absorbere (lat.) ... verschlucken

Die gelbe Natrium-Linie ist das Bild der im Versuchsaufbau vor dem Prisma verwendeten Spaltblende. Ihr geometrischer Ort entspricht der zugehörigen Spektralfarbe. Das gesamte Spektrum muß als Summe der Spaltbilder aller Spektralfarben angesehen werden. Auch die schwarze Linie im kontinuierlichen Spektrum ist ein – diesmal fehlendes – Spaltbild.

Beispiele für Emissionsspektren sind die Spektren leuchtender Gase, die mit Spektralröhren erzeugt werden können. Das bekannteste Absorptionsspektrum ist das der Fraunhoferschen Absorptionslinien im Sonnenspektrum (↗ Farbbeilage).

Die von der Sonnenoberfläche, der Photosphäre, kommende Strahlung durchdringt die äußere Gashülle der Sonne und wird dort von den in der Gashülle vorhandenen Stoffen zum Teil absorbiert. Dadurch entstehen die dunklen Linien.

JOSEPH VON FRAUNHOFER veröffentlichte 1814 einen Katalog mit über 500 dunklen Linien im Sonnenspektrum. Die kräftigsten Linien bezeichnete er mit Buchstaben. Diese Art der Bezeichnung wird noch heute verwendet.

Mit Hilfe verbesserter Beobachtungsgeräte wurden ständig neue Linien gefunden, so daß heute über 27000 Linien bekannt sind.

Nach dem Ort des untersuchten Stoffes beim Erzeugen des Spektrums unterscheidet man:

Ort des Stoffes	Bezeichnung des Spektrums	Merkmal
Stoff in Lichtquelle	Emissionsspektrum	helle farbige Linien auf dunklem Grund
Stoff zwischen Lichtquelle und Prisma	Absorptionsspektrum	dunkle Linien im kontinuierlichen Spektrum (vgl. Farbbeilage)

Emission und Absorption sind zwei zusammengehörige physikalische Vorgänge bzw. Wechselwirkungen zwischen Lichtstrahlung und Stoffen. Sie gehorchen in jedem Fall dem Energieerhaltungssatz. Das bekannteste Beispiel der Umkehrbarkeit von Emissions- und Absorptionsspektren für Natrium (↗ Farbbeilage) spiegelt eine Gesetzmäßigkeit wider, die für Licht jeder Frequenz und den entsprechenden Stoff (leuchtender Dampf) gilt.

Suchen Sie und beschreiben Sie Analogien zwischen der Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung und der Resonanz bei mechanischen Schwingungen und Wellen!

Die Spektralanalyse

Ein Licht aussendender Körper gibt durch sein Spektrum Informationen über seine stoffliche Beschaffenheit. Dazu wird der zu untersuchende Stoff zum Leuchten angeregt, er wird zum Beispiel im Lichtbogen verdampft. Das ausgesendete Licht wird zu einem Spektrum zerlegt und auf das Vorhandensein der für die verschiedenen Elemente typischen Linien untersucht. Das Verfahren heißt Spektralanalyse und das dazu verwendete Gerät Spektralapparat.

● *Skizzieren Sie aus Ihrem Wissen über die Brechung des Lichts eine Versuchsanordnung zur Spektralanalyse!*

Obwohl man nur von Spektralanalyse spricht, sind in diesem Verfahren **analysierende** und **synthetisierende** Schritte vereint.
Für diese Methode der Materialprüfung ist nur eine sehr geringe Masse des Stoffes notwendig (Größenordnung 10^{-10} g). Die Spektralanalyse kann qualitativ ausgewertet werden (die Anordnung der Linien sagt, welcher Stoff) und auch quantitativ (die relative Intensität der Linien sagt ungefähr, wieviel von dem Stoff).
Mit der Spektralanalyse können nicht nur die auf der Erde vorkommenden Körper untersucht werden, sondern auch kosmische Objekte sind durch das von ihnen ausgesandte Licht erfaßbar. Die Versuche mit Weltraumflugkörpern, an denen beim „Interkosmos"-Projekt auch Wissenschaftler und Techniker der DDR in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit mit Fachkollegen aus der Sowjetunion und anderen sozialistischen Ländern beteiligt sind, erweitern die Möglichkeiten astrophysikalischer Forschungen beträchtlich. Die Ergebnisse zeigen, daß in allen Bereichen des Kosmos die gleichen chemischen Elemente zu finden sind. Das verweist auf die materielle Einheit der Welt.
Der Spektralapparat ist ein optisches Gerät wie das Fernrohr oder das Mikroskop. Die Funktion der Geräte beruht auf verschiedenen optischen Vorgängen. Verschieden sind auch die mit den einzelnen Geräten bestimmbaren Eigenschaften von Körpern, z. B. mit dem *Fernrohr:*
Aussehen und Entfernung eines makroskopischen Körpers
Mikroskop: Mikroskopische Strukturen eines Körperausschnitts
Spektralapparat: Stoffliche Zusammensetzung von Makro- und Mikrokörpern

● *Welches sind die den genannten Geräten zugrunde liegenden verschiedenen physikalischen Vorgänge?*

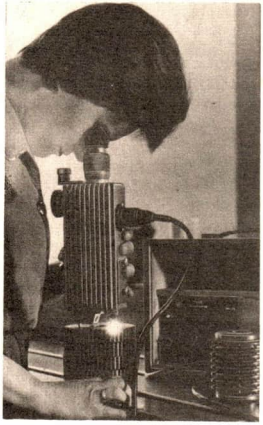


Bild 126/1 Spektralanalyse mit einem Handapparat

Bild 127/1 Einsteinturm des astrophysikalischen Instituts in Potsdam

Arten von Spektralapparaten. Das *Spektroskop* dient der visuellen Betrachtung. Das *Spektrometer* dient der Messung entsprechender Parameter des Spektrums (Wellenlänge oder Frequenz).
Der *Spektrograf* zeichnet (schreibt) das Spektrum zur späteren und wiederholten Betrachtung auf.

Suchen Sie ähnliche Gruppen von Apparaten zur Betrachtung, Messung und bildlichen Registrierung physikalischer Erscheinungen!

Die Spektralanalyse kann als charakteristisch für die enge Verflechtung von Wissenschaft, Technik und Alltagsleben in unserer Zeit betrachtet werden.

Das Verfahren selbst wird mittlerweile in vielen Bereichen der Grundlagenforschung bei allen Arten elektromagnetischer Strahlung mit großem Erfolg angewendet und ständig weiterentwickelt.
Die Techniker bauen Spektralapparate für jeden Verwendungszweck, vom riesengroßen Forschungsgerät, für das extra Häuser gebaut werden müssen wie z. B. der Einsteinturm im astrophysikalischen Institut Potsdam, bis zum tragbaren und leicht zu bedienenden Handspektralapparat (Bilder 126/1 und 127/1).
Es gibt auch einfache Formen dieses physikalischen Meßverfahrens, und zwar als Freihandspektralanalyse, z. B. das Beobachten der Farbe des Lichts von Lampen (gelbes oder weißes Licht u. a.), das subjektive Fühlen der Temperatur in der nahen Umgebung einer Lichtquelle oder das ungewollte Erleiden eines Sonnenbrandes.

Zur Entwicklung der Spektroskopie. Tausende von Jahren betrachteten und bewunderten die Menschen den Regenbogen als gigantische Naturerscheinung. Erst 1666 entdeckte NEWTON die Tatsache, daß ein Prisma aus einem Sonnenlichtbündel die gleiche Anordnung von Farben erzeugt: rot, orange, gelb, grün, blau, violett. Er bezeichnete diese Erscheinung als Spektrum.
1666 NEWTON entdeckt Lichtzerlegung durch Prisma
1751 MELVILL beschreibt Emissionsspektrum
1802 YOUNG berechnet Lichtwellenlängen
1814 FRAUNHOFER entwickelt Beugungsgitter und entdeckt Linienspektrum im Sonnenlicht
1859 KIRCHHOFF entdeckt Linienspektren der Elemente
1860 KIRCHHOFF und BUNSEN schaffen Grundlage der modernen Spektroskopie
1967 Wellenlänge der roten Kryptonlinie wird (in der DDR) Bezugsmaßstab der internationalen Längeneinheit Meter

Hertzsche Wellen

Die Funkmeßgeräte und drahtlosen Nachrichtenmittel unserer NVA sind leicht transportabel, betriebssicher und leistungsfähig. Aufgabe dieser Geräte ist die Erzeugung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen, die sich ohne besonderen Leiter im Raum ausbreiten. Diese Form der Energiefortleitung wird zur Nachrichtenübermittlung über große Entfernungen genutzt.

Der offene Schwingkreis

Bei der Untersuchung des *geschlossenen* elektrischen Schwingkreises wurde festgestellt, daß in einem aus Kondensator und Spule bestehenden Stromkreis elektromagnetische Schwingungen entstehen, die auf einer periodischen Energieumwandlung beruhen.

- *Beschreiben Sie zur Wiederholung die Energieumwandlungen im Schwingkreis!*

Durch induktive Kopplung von zwei Schwingkreisen (↗ S. 91) kann die elektromagnetische Energie auf einen zweiten Schwingkreis übertragen werden. Diese Energieübertragung ist jedoch nur möglich, wenn die Spulen der zu koppelnden Schwingkreise nicht zu weit voneinander entfernt sind. Das die Energieübertragung vermittelnde magnetische Wechselfeld beschränkt sich auf die unmittelbare Umgebung der Spulen. Das elektrische Wechselfeld konzentriert sich im wesentlichen auf den Raum zwischen den Kondensatorplatten.

Übergang zum offenen Schwingkreis. Will man elektromagnetische Energie auf eine größere Entfernung übertragen, so müssen das elektrische und das magnetische Wechselfeld weiter in den Raum hinauswirken können. Das erreicht man, wenn man von dem bisher betrachteten geschlossenen Schwingkreis zum *offenen Schwingkreis* übergeht.

Ein offener Schwingkreis entsteht, wenn die Platten des Kondensators immer weiter voneinander entfernt werden,

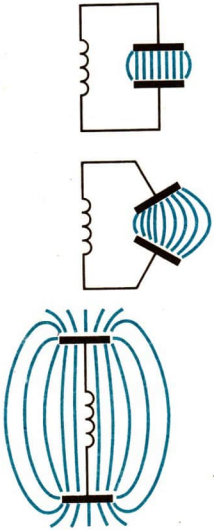


Bild 129/1 Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis

bis der Schwingkreis ein gerader Leiter geworden ist (Bild 129/1).
Das elektrische Wechselfeld kann jetzt wie das magnetische Wechselfeld den umgebenden Raum erfüllen.

Wie verändert sich beim Übergang zum offenen Schwingkreis die Kapazität und damit die Eigenfrequenz eines Schwingkreises?

Wenn die Platten des Kondensators durch Leiterstücke ersetzt werden und die Spule immer weniger Windungen erhält, dann gelangt man schließlich zu einem offenen Schwingkreis, der nur aus einem Leiterstück besteht und eine sehr hohe Eigenfrequenz aufweist. Ein solcher offener Schwingkreis heißt **Dipol.** Die Eigenfrequenz eines Dipols ist durch seine Länge bestimmt. Der offene Schwingkreis kann durch einen induktiv angekoppelten geschlossenen Schwingkreis zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.

Zur Erregung elektromagnetischer Schwingungen im Dipol wird ein Röhrengenerator für ultrahochfrequente Schwingungen benötigt. Für Unterrichtszwecke ist entsprechend einer Verordnung des Ministeriums für Post- und Fernmeldewesen der Deutschen Demokratischen Republik eine Frequenz von 434 MHz zugelassen.

Wie groß ist die Schwingungsdauer bei $f = 434$ MHz?

Elektromagnetische Schwingungen im offenen Schwingkreis. Bei den erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen im offenen Schwingkreis (Dipol) lassen sich ganz ähnliche Vorgänge wie im geschlossenen Schwingkreis unterscheiden (Bild 130/1).
Zu Beginn der Schwingung sind die Ladungsträger an den Enden des Dipols zusammengedrängt. Zwischen den Dipolenden besteht ein elektrisches Feld (Bild 130/1 a). Der beim Ausgleich der Ladungen fließende Strom baut ein magnetisches Feld auf, dessen Feldlinien den Dipol in konzentrischen Kreisen umschließen. Zur Zeit des Ladungsausgleichs hat die Stärke des magnetischen Feldes ihren Maximalwert erreicht (Bild 130/1 b). Der Richtungssinn des Magnetfeldes hängt von der Stromrichtung ab. Da der Strom infolge der Selbstinduktion zunächst weiterfließt (Bild 130/1 c), baut sich zwischen den Dipolenden wieder ein elektrisches Feld, diesmal mit entgegengesetztem Richtungssinn, auf. Durch erneuten Ladungsausgleich zwischen den Dipolenden entsteht wiederum ein magnetisches Feld (Bild 130/1 d).

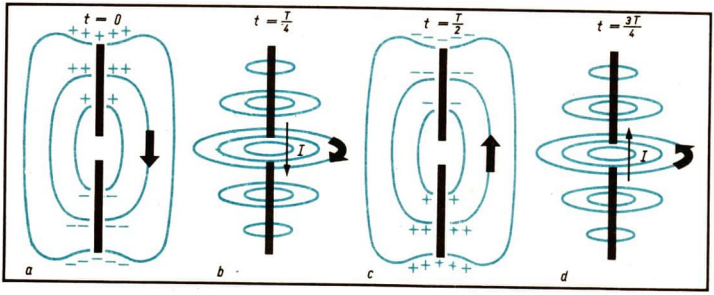


Bild 130/1 Modellbild des elektrischen und des magnetischen Feldes um den Dipol. Die Maxima der Felder sind jeweils um eine Viertelperiode gegeneinander verschoben

In der Umgebung eines offenen Schwingkreises bilden sich elektrische und magnetische Felder in zeitlichem Wechsel aus.

- *Vergleichen Sie die Vorgänge im geschlossenen Schwingkreis mit den Vorgängen im Dipol!*

Im Versuch kann gezeigt werden, daß das magnetische und das elektrische Feld in der Mittelebene des Dipols ihre Maximalwerte haben. Nach den Enden des Dipols hin nehmen die Feldstärken ab.

Die veränderlichen elektrischen und magnetischen Felder sind unlösbar miteinander verknüpft. Dabei vollzieht sich ein fortgesetzter Austausch zwischen elektrischer und magnetischer Energie.

Abstrahlung elektromagnetischer Energie vom Sendedipol

Der offene Schwingkreis (Dipol) nimmt vom Erregerschwingkreis (z. B. Röhrengenerator) ständig elektrische Energie auf. Die sich in der Umgebung des Dipols ausbildenden elektrischen und magnetischen Felder breiten sich im Raum aus und sind selbst in großer Entfernung vom Sendedipol noch nachzuweisen.
Entscheidend für das Ausbreiten des elektromagnetischen Wechselfeldes ist die Tatsache, daß das magnetische und das elektrische Feld sich gegenseitig durchdringen und beide Felder miteinander verknüpft sind. Elektrische und magnetische Wechselfelder existieren nicht für sich allein.

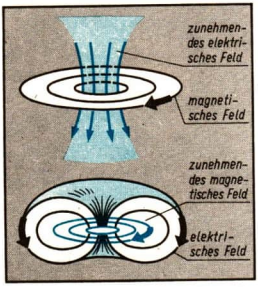


Bild 131/1

Jedes zeitlich veränderliche elektrische Feld ist von einem geschlossenen Magnetfeld umgeben. Das zeitlich veränderliche Magnetfeld bewirkt durch elektromagnetische Induktion wiederum ein elektrisches Feld, das das Magnetfeld umschließt (↗ Physik in Übersichten). Die Feldlinien beider sich gegenseitig durchdringender Felder stehen senkrecht aufeinander, und die Felder breiten sich mit endlicher, aber sehr hoher Geschwindigkeit im Raum aus. Bild 131/1 stellt diesen Vorgang schematisch dar.
Ein sich veränderndes elektrisches Feld ist von einem geschlossenen Magnetfeld umgeben (Bild 131/1 a). Durch dessen Änderung wird in der Umgebung ein neues elektrisches Feld mit in sich geschlossenen Feldlinien induziert (Bild 131/1 b), das wiederum ein geschlossenes Magnetfeld hervorruft usw.
Beachtet man, daß sich dieser Vorgang rings um den felderzeugenden Dipol vollzieht, so ergibt sich das in Bild 131/2 für t = konstant dargestellte Feldlinienbild des elektromagnetischen Feldes eines Sendedipols.
Die vom Erregerschwingkreis auf den Sendedipol übertragene elektromagnetische Energie wird mit dem sich um den Dipol ausbreitenden elektromagnetischen Feld in den Raum transportiert.

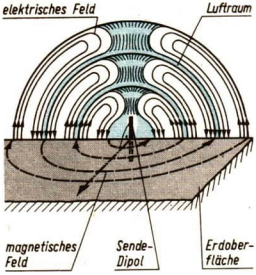


Bild 131/2 Modell des elektromagnetischen Feldes eines Sendedipols (Schnitt durch die obere Halbebene)

Der Sendedipol strahlt elektromagnetische Energie ab.

41

Parallel zu einem Sender (1) wird in einigen Metern Abstand ein Dipol (2) als Empfänger aufgestellt (Bild 131/3). Die vom Sendedipol abgestrahlte Energie bewirkt einen Ausschlag des Meßgeräts am Empfänger.

Erklären Sie die Funktion des Gleichrichters im Empfangsdipol!
Überlegen Sie, welche Möglichkeiten es noch gibt, um die vom Sender abgestrahlte Energie nachzuweisen!

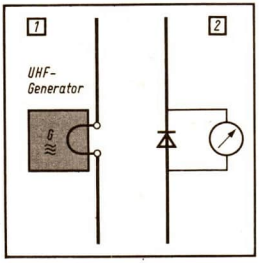


Bild 131/3

Hertzsche Wellen als elektromagnetischer Sachverhalt mit Welleneigenschaften

Die Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes besteht in einer zeitlich und örtlich periodischen Änderung zweier miteinander verknüpfter Felder. Da hierbei auch wie bei mechanischen Wellen Energie übertragen wird und Beugung und Interferenzerscheinungen auftreten, bezeichnet man das sich ausbreitende elektromagnetische Wechselfeld als **elektromagnetische Welle.**

Der offene Schwingkreis strahlt elektromagnetische Wellen ab, die sich im Raum ausbreiten.

Welcher Unterschied besteht zwischen einer mechanischen und einer elektromagnetischen Welle?

Als *Wellenlänge* wird ähnlich wie bei den mechanischen Wellen der Abstand zweier in Ausbreitungsrichtung aufeinanderfolgender gleicher Schwingungszustände bezeichnet.

Die Geschichte der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen ist ein hervorragendes Beispiel für das ständige Zusammenwirken von Theorie und experimenteller Praxis in den Naturwissenschaften. Der englische Physiker JAMES CLERK MAXWELL sagte bereits 1868 auf Grund theoretischer Überlegungen und Berechnungen das Vorhandensein elektromagnetischer Wellen voraus, mit denen eine Übertragung elektromagnetischer Energie in den Raum verbunden sein müsse. Darüber hinaus kam er zu dem Schluß, daß auch das Licht eine solche elektromagnetische Wellenerscheinung sei. Dem deutschen Physiker HEINRICH HERTZ gelang es 1888 erstmals, die Ausbreitung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen im Raum nachzuweisen. Später konnte er noch weitere von MAXWELL vorausgesagte Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen experimentell bestätigen.

Zu Ehren ihres Entdeckers bezeichnet man die hochfrequenten elektromagnetischen Wellen im Wellenlängenbereich von etwa 10 km bis 1 mm (Funkwellen) als **Hertzsche Wellen.**
Die wirksame Ausbildung elektromagnetischer Wellen im Raum beginnt praktisch erst bei Frequenzen oberhalb etwa 15 kHz. Da magnetische und elektrische Felder keines stofflichen Trägers bedürfen, breiten sich elektromagnetische Wellen im Gegensatz zu mechanischen Wellen auch im Vakuum aus. Sie übertragen demzufolge auch durch den Weltraum Energie. Diese Tatsache ist z. B. für die Erforschung des interplanetaren Raumes von besonderer Bedeutung.
Als **Ausbreitungsgeschwindigkeit** der Hertzschen Wellen ermittelte man aus Messungen und aus theoretischen Überlegungen die Lichtgeschwindigkeit $c = 300\,000\ \mathrm{km\ s^{-1}}$. Der genaue Wert für die Ausbreitung im Vakuum beträgt $c_0 = 299\,793\ \mathrm{km\ s^{-1}}$.

Hertzsche Wellen breiten sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Bild 132/1 JAMES CLERK MAXWELL (1831 bis 1879)

Bild 132/2 HEINRICH HERTZ (1857 bis 1894)

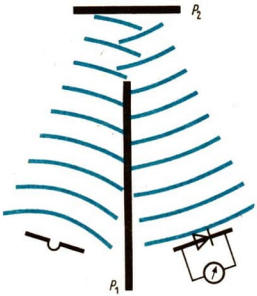


Bild 133/1 Reflexion Hertzscher Wellen

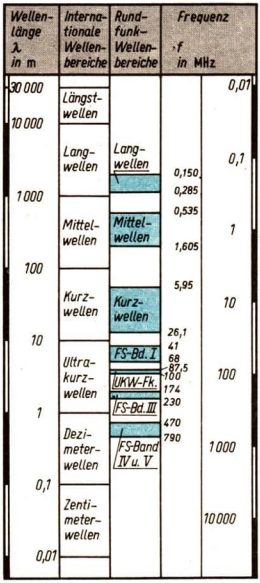


Bild 133/2

Eigenschaften Hertzscher Wellen

Zum Nachweis einiger Eigenschaften der Hertzschen Wellen können Sender und Empfänger nach Bild 131/3 verwendet werden.

Reflexion. Hält man hinter den Sende- oder den Empfangsdipol eine Metallplatte, dann treten große Änderungen in der Empfangsstärke auf. Die Hertzschen Wellen werden von elektrischen Leitern reflektiert. Die Reflexion erfolgt entsprechend dem Reflexionsgesetz.

Bringt man eine Metallplatte P_1 zwischen Sender und Empfänger, die die direkte Verbindung unterbricht, und ordnet seitlich eine Metallplatte P_2 an (Bild 133/1), so ergibt sich bei einer bestimmten Stellung der Platte P_2 maximaler Empfang. In dieser Stellung ist der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel. 42

> Hertzsche Wellen werden an elektrisch leitenden Flächen entsprechend dem Reflexionsgesetz reflektiert.

Durchdringungsfähigkeit. Bringt man zwischen Sender und Empfänger eine Platte aus einem elektrisch nichtleitenden Material wie Glas, Holz oder Pappe oder Mauerwerk, so wird die Stärke der elektromagnetischen Welle kaum vermindert. Diese Wellen treten also auch innerhalb von Gebäuden auf, das heißt, die ausgestrahlte Energie kann mit einer Zimmerantenne aufgenommen werden.
Elektrisch gut leitende Platten zwischen Sender und Empfänger unterbrechen den Empfang.

> Hertzsche Wellen durchdringen Isolatoren und werden von Leitern abgeschirmt.

Durch eine Abschirmung wird der Einfluß unerwünschter Hertzscher Wellen auf eine Empfangseinrichtung vermieden.

✳ **Frequenzbereiche Hertzscher Wellen.** Je nach der Frequenz des Senders entstehen Hertzsche Wellen verschiedener Wellenlänge. Man faßt sie nach internationaler Vereinbarung zu Bereichen zusammen, über die Bild 133/2 einen Überblick gibt.
Die Hertzschen Wellen der einzelnen Bereiche unterscheiden sich im wesentlichen durch die Art ihrer Ausbreitung und durch ihre Reichweite. ✳

Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge. Aus dem Vergleich der Frequenz- und der Wellenlängenskale in Bild 133/2 erkennt man, daß zwischen diesen beiden Größen ein Zusammenhang besteht.

● *Wiederholen Sie die Herleitung der Beziehung zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge der mechanischen Wellen!*

Auch bei Hertzschen Wellen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich dem Produkt aus der Wellenlänge λ und der Frequenz f. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit c ist, gilt für Hertzsche Wellen als

Ausbreitungsgeschwindigkeit	$c = \lambda \cdot f$ (38)

● *Überprüfen Sie anhand von Bild 133/2 diese Gleichung! Achten Sie darauf, daß die Skalen für Wellenlänge und Frequenz logarithmisch geteilt sind!*

■ Wie groß ist die Wellenlänge λ bei einer Frequenz von 434 MHz?

Gegeben:
$f = 434$ MHz

Gesucht: λ

Lösung:

$$\lambda = \frac{c}{f}; \quad \lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4{,}34 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}} \quad \underline{\underline{\lambda = 0{,}69 \text{ m}}}$$

Die Frequenz f der elektromagnetischen Wellen läßt sich aus den Werten von L und C des Senderschwingkreises berechnen.

■ Wie groß ist die Wellenlänge λ der von einem Sender ausgestrahlten Hertzschen Wellen, wenn der Senderschwingkreis aus einer Induktivität $L = 200\,\mu$H und einer Kapazität $C = 127$ pF besteht?

Gegeben:

$L = 200\,\mu$H
$C = 127$ pF

Gesucht:

f
λ

Lösung:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{200\,\mu\text{H} \cdot 127 \text{ pF}}}$$

$$f = \frac{1}{6{,}28 \sqrt{2 \cdot 1{,}27 \quad 10^{-7}}} \text{ Hz}$$

$$\underline{\underline{f = 10^6 \text{ Hz}}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{10^6 \quad \text{s}^{-1}}$$

$$\underline{\underline{\lambda = 300 \text{ m}}}$$

Der offene Schwingkreis im Empfänger

Sollen die von einem Sender ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen in einem Empfangsgerät aufgenommen werden, so muß eine Einrichtung benutzt werden, die die Feldenergie in elektrische Energie umwandelt. Hierzu eignet sich der offene Schwingkreis.
Trifft die von einem Sender abgestrahlte Hertzsche Welle auf einen Leiter, so wird durch das elektromagnetische Wechselfeld in dem Leiter eine Wechselspannung induziert.

Wiederholen Sie die in Kl. 9 behandelten physikalischen Bedingungen für die elektromagnetische Induktion! Erklären Sie damit den vorliegenden Sachverhalt!

Infolge der Einwirkung des elektromagnetischen Feldes werden die Ladungen nach den Enden des Leiters verschoben. Die zwischen den Leiterenden entstehende Wechselspannung hat zur Folge, daß im Leiter ein hochfrequenter Wechselstrom fließt (Bild 135/1).

Dieser Leiter stellt einen offenen Schwingkreis dar. Man bezeichnet ihn entsprechend seiner physikalischen Funktion als *Empfangsdipol*.

Der Empfangsdipol wird durch die vom Sender ausgestrahlten Hertzschen Wellen zu erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen angeregt.

Die Frequenz der im Empfangsdipol erregten elektromagnetischen Schwingungen ist gleich der Frequenz der vom Sender ausgestrahlten Hertzschen Wellen.

Begründen Sie die Frequenzgleichheit!

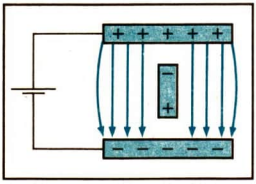
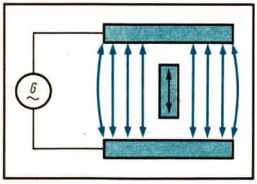
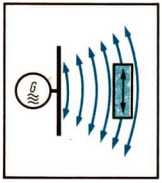


Bild 135/1
Leiterstab im Feld eines Plattenkondensators bei Gleichspannung



Leiterstab im Feld eines Plattenkondensators bei Wechselspannung



Leiterstab im Feld eines schwingenden Dipols

Um den Empfangsdipol zum Schwingen zu bringen, wird elektromagnetische Energie benötigt. Diese Energie wird vom Sender ausgestrahlt (↗ S. 130) und von der elektromagnetischen Welle transportiert. Die auf den Empfangsdipol auftreffenden Wellen geben einen Teil ihrer Energie an ihn ab.
Der Empfangsdipol erhält nur einen sehr kleinen Teil der in den Raum um den Sender ausgestrahlten Energie. Damit möglichst viel Energie aus dem Feld aufgenommen wird, muß die Eigenfrequenz der elektromagnetischen Schwingungen im Empfangsdipol gleich der Frequenz der auftreffenden elektromagnetischen Wellen sein.

● *Erläutern Sie zur Wiederholung die in der Thomsonschen Schwingungsgleichung enthaltene Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Induktivität und der Kapazität!*

Der Dipol muß deshalb auf die Wellenlänge der zu empfangenden elektromagnetischen Wellen abgestimmt werden. Es besteht Resonanz, wenn die Gesamtlänge l des Dipols gleich der halben Wellenlänge der empfangenen Welle ist:

$$l = \frac{\lambda}{2} \qquad (39)$$

Man kann demzufolge die Wellenlänge hochfrequenter elektromagnetischer Wellen mit Hilfe dieser Gleichung bestimmen, indem man die Dipolstäbe des Empfangsdipols so weit verlängert oder verkürzt, bis ein mit dem Dipol verbundenes Meßgerät maximalen Zeigerausschlag zeigt.

■ Berechnen Sie die Länge l eines Dipols für die Frequenz $f = 434$ MHz!

Gegeben:

$f = 434$ MHz

Gesucht:

l

Lösung:

$$l = \frac{\lambda}{2}$$

$$l = \frac{c}{2 \cdot f}$$

$$l = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2 \cdot 4{,}34 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}}$$

$$\underline{\underline{l = 0{,}345 \text{ m}}}$$

Grundsätzlich ist jeder offene Schwingkreis zum Senden und zum Empfangen Hertzscher Wellen geeignet. Man bezeichnet eine derartige Leiteranordnung allgemein als **Antenne.**

Der Erfinder der Antenne ist der russische Physiker ALEXANDER POPOW (1859 bis 1905). Ihm gelang erstmals 1895 unter Benutzung eines „Luftdrahtes", eine Nachricht über eine Entfernung von 250 m und bald darauf über 4 km drahtlos zu senden. Die Worte dieser Nachricht waren „Heinrich Hertz". Bald darauf schuf der Italiener GUGLIELMO MARCONI auf der Grundlage der Arbeiten POPOWs und anderer Forscher die erste technisch befriedigende Funkanlage. Damit setzte jene stürmische Entwicklung der Nachrichtentechnik ein, die bis in unsere Tage andauert.

Abstimmkreis des Empfänger. Empfangsantennen dienen vielfach zum Empfang Hertzscher Wellen eines größeren Wellenlängenbereiches. Diese Antennen werden mit einem **Abstimmkreis** gekoppelt, der die Aufgabe hat, aus der großen Anzahl Hertzscher Wellen mit verschiedenen Wellenlängen die Welle mit der gewünschten Wellenlänge „auszusieben". Der Abstimmkreis ist ein geschlossener Schwingkreis, dessen Eigenfrequenz auf die zu empfangende Hertzsche Welle eingestellt und damit in Resonanz gebracht werden kann.

Durch welche Erscheinungen ist die Resonanz gekennzeichnet?

43

An eine vorhandene Rundfunkantenne wird eine HF-Spule angeschlossen und geerdet. Der aus Spule und Drehkondensator bestehende Abstimmkreis wird mit der Antennenspule gekoppelt. Zum Nachweis der Schwingungen wird an den Abstimmkreis ein Meßgerät angeschlossen (Bild 137/1). Der Zeigerausschlag des Meßgerätes ist ein Maß für die auf den Abstimmkreis übertragene Energie.
Wird der Abstimmkreis durch Verändern von Induktivität oder Kapazität auf die Frequenz des nächstgelegenen Senders abgestimmt, ist der Zeigerausschlag am größten.
Die Versuchsanordnung in Bild 137/1 zeigt zugleich das Prinzip eines einfachen Empfängers für Hertzsche Wellen.

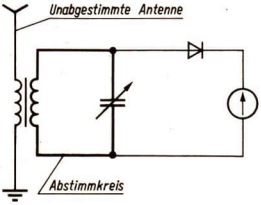


Bild 137/1

Zum Abstimmen eines Empfängers auf eine vorgegebene Wellenlänge verwendet man einen mit der Antenne gekoppelten Abstimmkreis.

Übermitteln von Informationen durch Hertzsche Wellen

✳ Will man mit Hilfe Hertzscher Wellen eine Information bzw. ein Signal übertragen, so ist das einfachste Verfahren, den Sender im Rhythmus vereinbarter Zeichen, z. B. des Morsealphabets, ein- und auszuschalten. Das Signal be-

steht dann aus einer Reihe einzelner Wellenzüge, die einander in bestimmten Zeitabständen folgen. Ihre Aufeinanderfolge enthält eine bestimmte Information (Bild 138/1). Diese Art der Informationsübermittlung bezeichnet man als **Telegrafie.** Im Empfänger müssen entsprechende Einrichtungen vorhanden sein, die die übertragenen Zeichen wahrnehmbar machen.

Die drahtlose Übertragung von Sprache und Musik ist dagegen nicht ohne weiteres möglich. Die dabei auftretenden Schwingungen liegen im Tonfrequenzbereich, der die Frequenzen zwischen 16 Hz und 15 kHz umfaßt, also den für unser Ohr hörbaren Schall.

Der Frequenzbereich der elektromagnetischen Schwingungen, die Hertzsche Wellen erzeugen, beginnt dagegen erst bei etwa 15 kHz (↗ Bild 133/2). Die Signalschwingungen (Sprache, Musik) können also nicht unmittelbar als Hertzsche Wellen von einem Sender ausgestrahlt werden. Ihre Übertragung erfolgt mit Hilfe einer ständig ausgestrahlten hochfrequenten Hertzschen Welle. Man bezeichnet diese Art der Informationsübermittlung als **Telefonie.** Dabei wird die vom Sender ausgestrahlte hochfrequente Hertzsche Welle im Rhythmus des niederfrequenten Signals verändert. Diesen Vorgang nennt man **Modulation.**

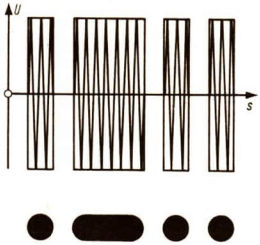


Bild 138/1
Unterbrochener Wellenzug und zugehöriges Signalzeichen F des Morsealphabets (· · — ·)
(Der rechte Punkt kommt zuerst beim Empfänger an)

▶ Modulation ist die Beeinflussung einer Kenngröße einer hochfrequenten Schwingung durch eine niederfrequente Schwingung.

Die im Sender erzeugte hochfrequente Schwingung wird als *Trägerschwingung*, ihre Frequenz als *Trägerfrequenz* bezeichnet.

Durch die Modulation wird die niederfrequente Signalschwingung in einen höheren Frequenzbereich umgesetzt.

Das Prinzip der **Modulation** zeigt der folgende Versuch (Bild 139/1).

▼ An das Steuergitter einer Triode werden zwei Wechselspannungen verschiedener Frequenz, die Trägerspannung (f_h = 1 500 Hz) und die Signalspannung (f_n = 50 Hz) gelegt. Bei abgeschalteter Signalspannung ist auf dem Bildschirm die Trägerschwingung sichtbar.
Durch die zugeschaltete Signalspannung ändert sich die Git-

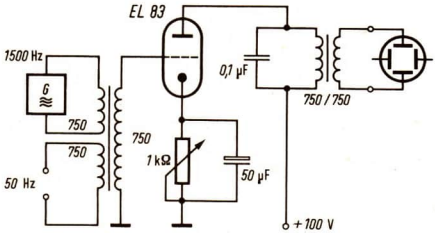


Bild 139/1

tervorspannung und damit der hochfrequente Anodenwechselstrom im Rhythmus der Signalspannung. An dem auf die Trägerfrequenz abgestimmten Anodenschwingkreis wird die modulierte Trägerschwingung abgenommen, die auf dem Bildschirm sichtbar ist (Bild 139/2).

Aussenden Hertzscher Wellen. Das Prinzip eines Telefoniesenders, der modulierte Hertzsche Wellen ausstrahlt, zeigt Bild 139/3. Die Trägerschwingung wird hier mit den von einem Mikrofon erzeugten tonfrequenten Schwingungen moduliert.

Stellen Sie anhand von Bild 133/2 fest, in welchem Bereich bei Rundfunkübertragungen die Trägerfrequenzen der Rundfunksender liegen! Vergleichen Sie diese mit dem Frequenzbereich der Signalschwingungen!

Empfang modulierter Hertzscher Wellen. Die tonfrequenten Signalschwingungen, die im Sender der Trägerschwingung aufmoduliert wurden, müssen im Empfänger wieder von der Trägerschwingung getrennt werden.

Die Rückgewinnung der Signalschwingung aus der modulierten Trägerschwingung nennt man Demodulation.

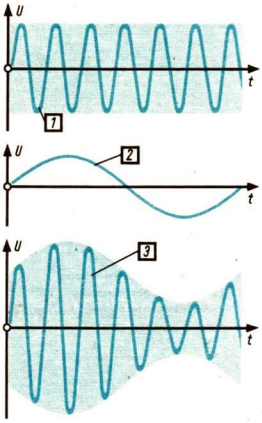


Bild 139/2 Modulierte Schwingung
1 – Trägerschwingung
2 – niederfrequente Signalschwingung
3 – modulierte Schwingung

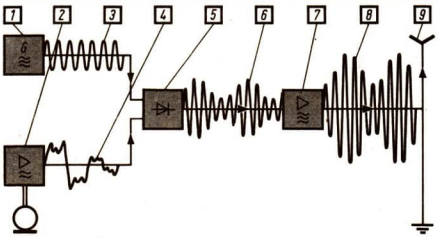


Bild 139/3 Blockschema eines Telefoniesenders
1 – Steuerstufe
2 – NF-Stufe
3 – Trägerschwingung
4 – Signalschwingung
5 – Modulationsstufe
6 – modulierte HF-Schwingung
7 – HF-Verstärkerstufe
8 – verstärkte modulierte HF
9 – Sendeantenne

Das Prinzip der Demodulation besteht darin, daß man den in der Antenne fließenden hochfrequenten Wechselstrom durch einen Einweg-Gleichrichter in einen pulsierenden Gleichstrom verwandelt, auf den die Membran eines Lautsprechers anspricht.

● *Erklären Sie zur Wiederholung die Wirkungsweise eines Einweg-Gleichrichters!*

45 ▼ An den Ausgang der Modulationseinrichtung (Bild 139/1) wird die in Bild 140/1 dargestellte Schaltung angeschlossen. Am Widerstand entsteht durch den pulsierenden Gleichstrom der Diode eine niederfrequente Wechselspannung, die der aufmodulierten Signalspannung entspricht. Durch Anschließen des Oszillografen an die gekennzeichneten Punkte werden nacheinander die modulierte Trägerschwingung, die gleichgerichtete Trägerschwingung und die niederfrequente Signalschwingung auf dem Bildschirm sichtbar.

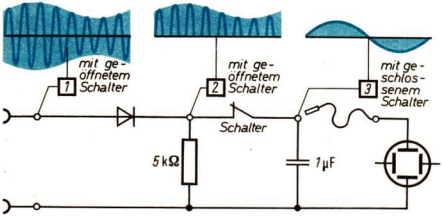


Bild 140/1 Demodulation amplitudenmodulierter Schwingungen
1 – modulierte HF-Schwingung
2 – gleichgerichtete modulierte HF
3 – niederfrequente Signalschwingung

Zum Empfang von Telefoniesendungen wird die Signalspannung einem Lautsprecher oder einem Kopfhörer zugeführt.
Das Prinzip eines einfachen **Empfängers** für Tonrundfunk ist in Bild 140/2 dargestellt.

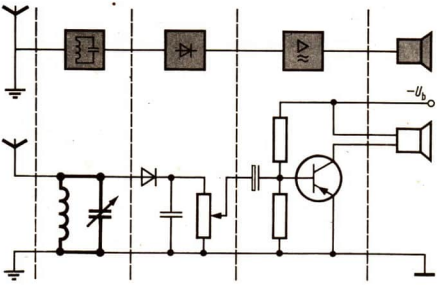


Bild 140/2 Blockschema und Schaltbild eines einfachen Rundfunkempfängers

Ein solches Gerät muß folgende Funktionen erfüllen:
1. Aufnehmen der elektromagnetischen Energie.
2. „Heraussieben" der Welle mit der gewünschten Frequenz.
3. Trennen der tonfrequenten Schwingungen von der Trägerschwingung.
4. Verstärken der tonfrequenten Schwingungen.
5. Umwandeln der tonfrequenten Schwingungen in Schallwellen.

Welche Stufen des Empfängers in Bild 140/2 erfüllen die genannten Funktionen? ✳

Anwendung Hertzscher Wellen

In den Jahren, die seit den grundlegenden Entdeckungen auf dem Gebiet der elektromagnetischen Schwingungen und Wellen vergangen sind, ist das Gebiet der Hertzschen Wellen für die technische Nutzung erschlossen worden.
Tonrundfunk und **Fernsehrundfunk** sind Hauptanwendungsgebiete der Hertzschen Wellen. In der Deutschen Demokratischen Republik hat der Rundfunk umfassende Aufgaben beim Aufbau des Sozialismus zu erfüllen. Er ist unentbehrlich bei der Erhöhung des politischen Bewußtseins und des kulturellen Niveaus unserer Staatsbürger. Er fördert die Anstrengungen der Werktätigen bei der Gestaltung unserer sozialistischen Gesellschaft und im Kampf um Frieden und Völkerverständigung. Im Gegensatz zu den kapitalistischen Staaten, in denen der Rundfunk als Propaganda- und Hetzinstrument der herrschenden Klasse zur ideologischen Diversion und Manipulierung der Volksmassen und zur Verleumdung der Arbeiterklasse durch die imperialistischen Kreise mißbraucht wird, steht der Rundfunk in den sozialistischen Staaten im Dienste des Fortschritts und dient den Interessen der Arbeiterklasse.
Außer beim Rundfunk wird heute überall dort, wo es auf eine schnelle, sichere und ortsunabhängige Nachrichtenübermittlung ankommt, der Funkverkehr insbesondere im Meter-, Dezimeter- und Zentimeterwellenbereich erfolgreich angewendet. Einige Beispiele sollen die **technische, ökonomische** und **militärische Anwendung** Hertzscher Wellen verdeutlichen.
Diese Beispiele zeigen, wie es der Mensch verstanden hat, die Naturgesetze für vielfältige Zwecke auszunutzen. Durch die ständige Entwicklung von Wissenschaft und Technik werden auch in der Anwendung Hertzscher Wellen Fortschritte erzielt. Besonders die sowjetische Wissenschaft hat auf diesen Gebieten große Erfolge errungen.

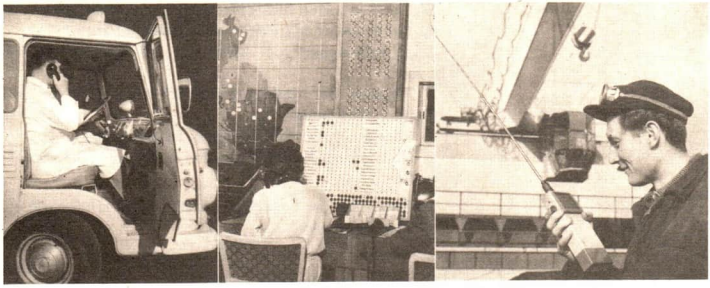


Bild 142/1

Sprechfunk. Für Funkverbindungen im Umkreis von 10 km bis 15 km um die Sendestation werden UKW-Sprechfunkanlagen verwendet. Die Fahrzeuge der Deutschen Volkspolizei, des Deutschen Roten Kreuzes und der Feuerwehr sind durch Sprechfunk ständig von ihren Leitstellen aus zu erreichen. In der Industrie werden Kranführer und andere Arbeitskräfte über Sprechfunk eingewiesen (Bild 142/1).

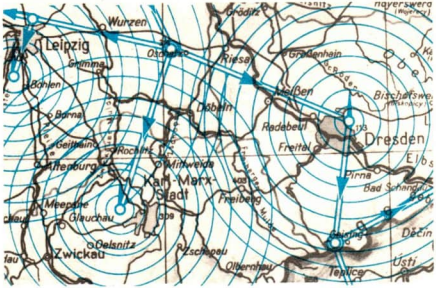


Bild 142/2 Relaisstation einer Richtfunkstrecke

Richtfunk. Zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung zwischen zwei festen Punkten werden Richtfunkstrecken benutzt. Diese arbeiten mit scharf gebündelten Dezimeter- und Zentimeterwellen, demzufolge werden nur sehr geringe Leistungen benötigt. Richtfunkstrecken überbrücken Entfernungen von etwa 50 km. Sind die Entfernungen größer, dann müssen zwischen Sender und Empfänger Relaisstationen eingeschaltet werden (Bild 142/2), die die Nachricht aufnehmen und verstärkt weitergeben. Über Relaissatelliten, die sich auf einer stationären Umlaufbahn befinden, werden Nachrichten um den Erdball gesendet. Mit Hilfe des Richtfunks können gleichzeitig etwa 1000 Telefongespräche oder mehrere Rundfunksendungen übertragen werden.

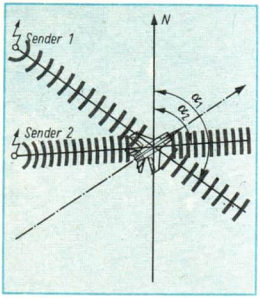


Bild 143/1

Funkortung. Von Sendern ausgestrahlte Hertzsche Wellen ermöglichen die Standort- und Kursbestimmung von Schiffen und Flugzeugen. Das Verfahren der Standortbestimmung besteht darin, daß entweder die Richtungen bestimmt werden, aus der die Signale bekannter Sender unterschiedlicher Frequenz im Empfänger eintreffen (Eigenpeilung) oder daß das Fahrzeug selbst Funksignale aussendet, die von zwei festen Stationen aufgenommen werden. Das Prinzip der Eigenpeilung ist in Bild 143/1 dargestellt.

Funkmeßtechnik. Hertzsche Wellen werden beim Auftreffen auf Hindernisse mehr oder weniger gut reflektiert. Besonders ausgeprägt ist diese Erscheinung im Dezimeter- und im Zentimeterwellenbereich. Diese Eigenschaft der Hertzschen Wellen nutzt man zum *Bestimmen von Richtung und Entfernung* weit entfernter Gegenstände mit Hilfe von Funkmeßgeräten, die auch als *Radar*geräte bezeichnet werden.

Die Entfernung eines Gegenstandes wird bestimmt, indem man die Zeit mißt, in der ein vom Sender abgestrahlter kurzer Wellenzug einmal bis zum Gegenstand hin- und zurückläuft. Wegen der großen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hertzschen Wellen kehrt der reflektierte Wellenzug bereits nach sehr kurzer Zeit an den Sendeort zurück. Die Messung dieser kurzen Zeit erfolgt mit Hilfe einer Elektronenstrahlröhre. Das Schema einer Radaranlage zeigt Bild 143/2.

Auf dem aus einer Elektronenstrahlröhre bestehenden Sichtgerät werden das abgestrahlte und das reflektierte Signal jeweils durch eine vertikale Auslenkung des Elektronenstrahls sichtbar gemacht. Bei bekannter Ablenkzeit des Elektronenstrahls kann aus dem Abstand dieser „Zacken" auf die Entfernung des Radarzieles geschlossen werden.

Um die gesamte Umgebung eines Ortes ständig unter Kontrolle zu halten, verwendet man Rundsichtgeräte (Bild 143/3). Bei diesen Geräten wird die Antenne ständig gedreht.

In ähnlicher Weise wie die Entfernung kann mit Radargeräten auch die *Geschwindigkeit* bewegter Ziele gemessen werden.

Die Funkmeßtechnik ist für die *Landesverteidigung* von wesentlicher Bedeutung. Der Luftraum über unseren Staatsgrenzen wird ständig durch Radargeräte überwacht, damit der Einflug fremder Flugzeuge jederzeit kontrolliert werden kann. In Verbindung mit der elektronischen Datenverarbeitung wurden Waffenleitsysteme geschaffen, die ihren festen Platz in unserer Nationalen Volksarmee haben. Die rechtzeitige Aufklärung und Abwehr eines Gegners ist die Hauptaufgabe der Funkmeßtechnik im militärischen Bereich.

Das *Verkehrswesen*, die *Weltraumforschung* und die *Wetteraufklärung* sind heute ohne den Einsatz der Funkmeßtechnik nicht mehr vorstellbar. So trägt der Einsatz von Radargeräten erheblich zur Sicherheit vor allem in der Luftfahrt und in der Schiffahrt bei. Mit Hilfe des Wetterradars können Niederschläge aller Art festgestellt werden. Es dient speziell zur Ortung von Schlechtwettergebieten in einem Umkreis von etwa 300 km.

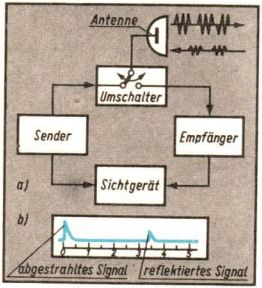


Bild 143/2 Prinzip einer Radaranlage
a) Blockschema
b) Entfernungsanzeige

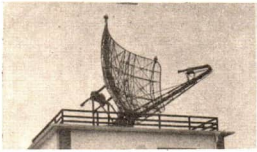


Bild 143/3 Antenne eines Rundsicht-Radargerätes

Außer den genannten Anwendungsgebieten nimmt der **Amateurfunk** einen breiten Raum im Funkwesen ein. Die Funkamateure der Deutschen Demokratischen Republik sind in der *Gesellschaft für Sport und Technik* zusammengeschlossen. Jeder junge Mensch, der Interesse am Funkwesen hat, kann in einer Kollektivstation die ersten Kenntnisse erwerben, um dann als Mitbenutzer einer Klubstation oder als Sendeamateur mit eigener Station (Bild 144/1) die Verbindung zu Amateuren in aller Welt aufzunehmen. Mit geringer Sendeleistung überbrücken die Amateurfunker auf den dafür freigegebenen Wellenlängen des KW- und UKW-Bereiches große Entfernungen, die zehntausend Kilometer und mehr betragen können.

Sie treten mit Amateuren in anderen Ländern in Verbindung und fördern so den Gedanken der Völkerfreundschaft. Die Tätigkeit als Amateurfunker in der GST dient gleichzeitig der vormilitärischen Ausbildung und damit der Stärkung der Verteidigungsbereitschaft unserer Staatsbürger. Viele GST-Nachrichtensportler können später ihren Ehrendienst in der Nationalen Volksarmee als Funker ableisten.

Bild 144/1

Besondere Bedeutung haben die Hertzschen Wellen bei der **Erforschung des Weltraumes** erhalten. Mit ihrer Hilfe ist eine ständige Verbindung mit Satelliten und bemannten Raumschiffen möglich. Sie übermitteln Meßergebnisse und ermöglichen die Steuerung unbemannter Raumflugkörper zu weit entfernten Planeten.

So waren der erfolgreiche Flug und die Landung der sowjetischen automatischen Raumstationen „Venus 5" und „Venus 6" sowie die Übermittlung von Meßergebnissen von der Venusoberfläche und von „Lunochod 1" weitgehend von einer stabilen Funkverbindung zwischen Bodenstation und Raumstation abhängig. Es ist bereits gelungen, Funkverbindungen auf Entfernungen bis zu 150 Millionen Kilometer aufrechtzuerhalten.

Mit leistungsstarken Radargeräten ist es möglich, weit entfernte Ziele im Weltraum zu orten und ihre Entfernung zu bestimmen. Auf diese Weise hat man bereits die Mondentfernung ermitteln können. Auch Versuche zur Bestimmung der Entfernung der Planeten Venus, Merkur, Mars und Jupiter sind erfolgreich durchgeführt worden.

Im Rahmen des Programms der Zusammenarbeit der sozialistischen Länder auf dem Gebiet der Erforschung und friedlichen Nutzung des Weltraumes werden mit Erdsatelliten der „Interkosmos"-Serie Untersuchungen und Experimente im erdnahen Raum durchgeführt, an deren Vorbereitung und Durchführung auch Wissenschaftler der Deutschen Demokratischen Republik beteiligt sind.

Röntgenstrahlung

WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845 bis 1923) entdeckte 1895 eine Strahlungsart, die er selbst X-Strahlung nannte. Im Ausland ist diese Bezeichnung heute noch üblich. In deutschsprachigen Ländern sagt man Röntgenstrahlung. RÖNTGEN erhielt für diese Entdeckung und die Entwicklung nützlicher Anwendungsverfahren 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Die Entdeckung erfolgte bei der Untersuchung der damals noch nicht lange bekannten Katodenstrahlen.

Erzeugung der Röntgenstrahlung

Wenn man eine Elektronenröhre, die der Erzeugung elektromagnetischer Schwingungen (↗ S. 91) für drahtlose Nachrichtenübermittlung dient, so baut, daß
– Spannungen von einigen tausend Volt zwischen Katode und Anode gelegt werden können,
– vom Auftreffpunkt der Elektronen, der Anode, eine Abstrahlung durch die Röhrenwandung nach außen erfolgen kann,
dann ist an dieser Röhre eine besondere Art elektromagnetischer Strahlung nachweisbar.

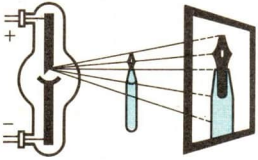


Bild 145/1 Prinzip-Darstellung einer Röntgendurchleuchtung

Einführungsversuch: Eine Röntgenröhre wird an einem Stativ befestigt. Als Spannungsquelle dient ein Funkeninduktor. Vor der Röhre in etwa 20 cm Abstand steht der Leuchtschirm. Die von der Anode ausgehende Strahlung läßt den Schirm, ähnlich wie beim Auftreffen von Licht, aufleuchten. In den Strahlengang gehaltene Körper heben sich als Schatten ab. 46 ▼

Eigenschaften der Röntgenstrahlung

1. Die Röntgenstrahlung ist nicht sichtbar.
2. Die Röntgenstrahlung durchdringt Körper in Abhängigkeit von ihrer stofflichen Beschaffenheit. Von makroskopischen Körpern (z. B. Knochen des Brustkorbs) zeichnet sie deutliche Schattenbilder.
3. Bei Wechselwirkungen der Röntgenstrahlung mit Mikroobjekten (z. B. dem Kristallgitter eines Metalls) tre-

ten Beugungseffekte auf, die zu Interferenzen führen. Daraus ist zu vermuten, daß es sich um eine elektromagnetische Strahlung ähnlich dem Licht handelt, die jedoch offensichtlich energiereicher ist.

4. Die Röntgenstrahlung vermag Stoffe zu ionisieren. Deshalb führt sie zur Belichtung fotografischer Schichten, zu Fluoreszenz in geeigneten Kristallen, zur Auslösung bestimmter chemischer Reaktionen, zur Beeinflussung und Schädigung lebender Organismen, besonders schnellwachsender Zellen.

5. Die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung hängt nicht nur ab vom Stoff des bestrahlten Körpers, sondern auch von den Kenndaten der Erzeugerröhre (z. B. Spannung, Stoff der Anode, Beschleunigungsstrecke für Elektronen). Daraus ist zu schließen, daß die Röntgenstrahlung ähnlich wie das Licht ein Spektrum mit einem bestimmten Frequenzintervall aufweist.

Wenn die Eigenschaften der Strahlung aber bei ihrer Erzeugung gesteuert werden können, muß aus der Art der Erzeugung auch eine Einsicht in das Wesen der Strahlung möglich sein.

Eine Röntgenröhre hat einen prinzipiellen Aufbau wie Bild 146/3.

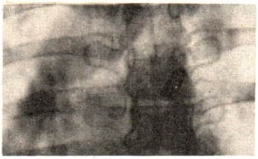


Bild 146/1 Röntgenschirmbild: Weichteile hell, Knochen dunkel, Metall schwarz

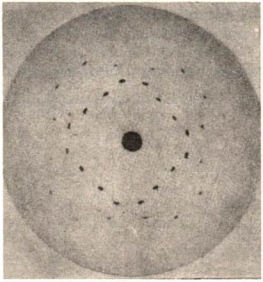


Bild 146/2 Laue-Diagramm

● *Beschreiben Sie die wesentlichen Teile einer Röntgenröhre!*

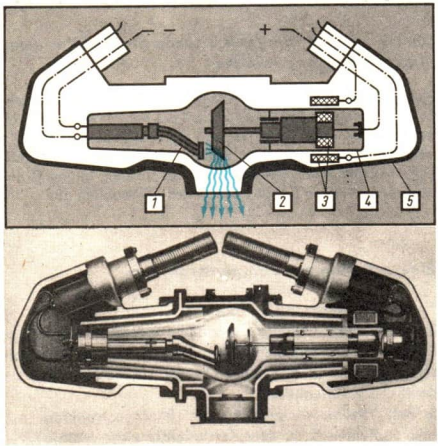


Bild 146/3 Prinzipieller Aufbau einer Drehanoden-Röntgenröhre
Von einer Hohlspiegelkatode (1) werden die austretenden Elektronen so gebündelt, daß sie in einem kleinen Brennfleck auf der Anode (2) auftreffen. Im Auftreffpunkt entstehen die Röntgenstrahlen. Die scheibenförmige Drehanode wird von einem Kurzschlußläufermotor (3) angetrieben, damit im Brennfleck nicht das Anodenmaterial verdampft. Die Glasröhre (4) ist in einem spannungs- und strahlensicheren Gehäuse (5) untergebracht. Die Röntgenröhre wird mit Öl gekühlt

Die Entstehung der Röntgenbremsstrahlung

Im elektrischen Feld zwischen Katode und Anode werden die aus der Glühkatode (oft aus Wolfram) ausgetretenen Elektronen stark beschleunigt. Sie erhalten kinetische Energie. Die Form der Katode begünstigt die Konzentration der Strahlungsenergie auf kleinem Raum an der Anodenoberfläche. Beim Auftreffen auf die Anode werden die Elektronen stark *gebremst*; sie erfahren eine sehr große negative Beschleunigung. Bei jeder Beschleunigung von Elektronen wird ein veränderliches elektromagnetisches Feld abgestrahlt (↗ Entstehung des Lichts). Die kinetische Energie der Elektronen wird dabei umgewandelt in Energie des elektromagnetischen Feldes. Wegen der Ursache wird diese Röntgenstrahlung **Brems-Strahlung** genannt. Durch Erhöhen der Heizspannung an der Katode ist die Hell-Dunkel-Zeichnung des Röntgenbildes zu verbessern, das Durchdringungsvermögen der Strahlen verändert sich dadurch nicht.

Vergleichen Sie die Entstehung der Ihnen bekannten radioaktiven Strahlung mit der des Lichts und der Röntgenbremsstrahlung! Wo und wodurch entstehen die verschiedenen Strahlungsarten?

Alle Versuche mit Röntgenstrahlung bestätigen, daß ihre Erzeugung mit einer Energieumwandlung verbunden ist, die den Energieerhaltungssatz bestätigt. Aus den verschiedenen Wirkungen der Röntgenstrahlung ist die Art der Energieumwandlung zu erkennen:
Bei der Erzeugung von Röntgenbremsstrahlung wird die kinetische Energie der Elektronen in Energie des elektromagnetischen Feldes der Röntgenstrahlung verwandelt.
Bei der Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Körpern kann eine Umwandlung in Lichtenergie (am Leuchtschirm), in Wärmeenergie (im absorbierenden Körper), in Bewegungsenergie freier Teilchen (bei Stoßionisation), in chemische Energie (Schwärzen von Fotopapier oder Beeinflussen des Wachstums von Zellen) u. a. erfolgen.
Die Schädigung von Zellen tritt dadurch ein, daß die Röntgenstrahlen die Moleküle ionisieren und dadurch ihre chemischen Eigenschaften ändern.
Die zuletzt genannte Art der Wechselwirkung macht die Verantwortung deutlich, die die Menschen beim Umgang mit Röntgenstrahlung haben. Die Erfahrungen dazu haben sie jedoch erst sammeln müssen. Mehrere hundert Röntgenforscher und Röntgentechniker starben in den ersten Jahrzehnten nach der Entdeckung und Nutzung der Röntgenstrahlung an Strahlungsschäden.

Heute gibt es Arbeitsschutzvorschriften, deren Einhaltung jedermann umso bewußter beachten wird, je mehr er die Gefahren überschaut. In den Vorschriften stehen allgemeine Regeln, z. B. über das Abschirmen der Strahlung, und es wird die zulässige Dosis, d. h. der zulässige Energiebetrag, der beim Umgang mit Röntgenstrahlung vom menschlichen Körper höchstens aufgenommen werden darf, für spezielle Verwendungszwecke angegeben.

- *Analysieren Sie aus dem, was Sie bei einer Röntgendurchleuchtung in der Poliklinik beobachten, die Eigenschaften der Röntgenstrahlen und die Maßnahmen zu ihrer Anwendung!*
  Entwerfen Sie in einer Skizze die Röntgenbilder der röntgenologischen Prüfung einer Schweißnaht, die a) homogen und b) mit Hohlräumen durchsetzt ist!

Bild 148/1 Damenbildnis von Botticelli um 1475 im Lindenau-Museum Altenburg

Bild 148/2 Röntgenaufnahme von Bild 148/1. Das Originalgemälde wurde später übermalt (ein Mantel verdeckt seitdem das durch einen Gürtel zusammengehaltene schmuckvolle Kleid)

Anwendungsbeispiele für Röntgenstrahlen

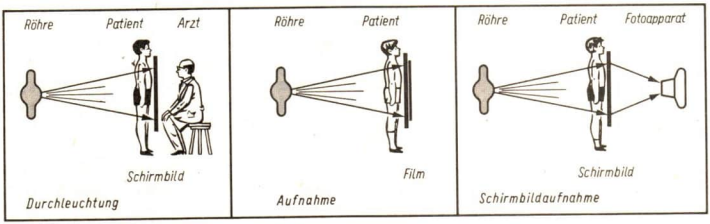
Zum Betrieb der Röntgenröhren sind Hochspannungsanlagen nötig. Die Röhren werden meist gekühlt.

Röntgendiagnostik. Mit Hilfe der Röntgendiagnostik können krankhafte Veränderungen im Körper oder die Lage eingedrungener Fremdkörper festgestellt werden. Man unterscheidet im wesentlichen drei Verfahren: die *Durchleuchtung*, die *Röntgenaufnahme* und die *Schirmbildaufnahme*.

Röntgentherapie. Röntgenstrahlen schädigen krankhaftes, besonders krebsartiges Gewebe stärker als gesundes Gewebe.
Erkrankungen der oberen Hautschichten können bereits durch weiche Röntgenstrahlen geheilt werden. Bei Bestrahlung innerer Organe verwendet man sehr harte Röntgenstrahlen.
Zur Schonung der umgebenden gesunden Körperzellen wird der Krankheitsherd von verschiedenen Seiten bestrahlt.

Röntgengrobstrukturuntersuchung. Bei diesem Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden sehr harte Röntgenstrahlen angewendet. Es lassen sich damit Lunker,

Bild 148/3 Schematische Darstellung der möglichen Verfahren der Röntgendiagnostik



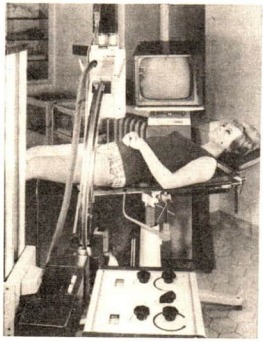


Bild 149/1 Fahrbare Bildverstärker-Röntgeneinrichtung

Schlackeneinschlüsse, Risse usw. feststellen. Die Röntgengrobstrukturuntersuchung ist ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Prüfung metallischer Schweißnähte. Grobstrukturuntersuchungen können auch mit radioaktiver Strahlung vorgenommen werden. Dabei ist der apparative Aufwand geringer, aber die Gesundheitsgefährdung für den messenden Menschen ist größer.

Röntgenologische Untersuchungen an stationären Geräten mit den üblichen Röntgenbildschirmen sind an eine Reihe einschränkender Bedingungen und Voraussetzungen gebunden, wie z. B. die Raumverdunkelung und die Abschirmung des Bedienungspersonals u. ä. Durch die Verwendung von Röntgenbildverstärkern anstelle der bisher üblichen Leuchtschirme lassen sich Röntgendurchleuchtungen unter wesentlich günstigeren Bedingungen durchführen.

Hierbei wird das Röntgenbild mit einer Fernsehkamera aufgenommen. Die Wiedergabe kann wie jedes Fernsehbild stufenlos gesteuert werden und an jedem beliebigen Ort erfolgen.

Der VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden fertigt eine solche fahrbare Röntgenbildverstärker-Einrichtung, die neben der bevorzugten Verwendung in der Chirurgie sich z. B. auch in röntgenologischen, orthopädischen oder internistischen Abteilungen bewährt hat.

Ein Zahlenbeispiel aus dem Gesundheitswesen der DDR aus dem Jahre 1968 soll zeigen, welche Bedeutung der Röntgenstrahlung zukommt und welche Mittel unser Staat dabei im Interesse der Bevölkerung aufwendet.

Im Jahre 1968 wurde bei der Volksröntgen-Reihenuntersuchung bei etwa je 2000 untersuchten Bürgern ein Tbk-Fall neu erkannt, und damit wurden 50% aller Tbk-Neuerkrankungen mit Hilfe des Röntgenverfahrens gefunden.

Im Jahre 1956 wurden dagegen erst etwa 30% der Neuerkrankungen nach diesem Verfahren erkannt. Die DDR liegt international an der Spitze beim effektiven Einsatz des Röntgenverfahrens im Dienste der Volksgesundheit.

Bild 149/2 Röntgenzug beim Einsatz in der DDR

Wiederholen, Systematisieren und Anwenden

Alle bisher betrachteten elektromagnetischen Sachverhalte – *Lichtwellen, Hertzsche Wellen* und *Röntgenstrahlen* – sind physikalisch im Wesen gleich. Sie haben Welleneigenschaften.

● *Welche gemeinsamen Merkmale ergeben sich beim Vergleich von Lichtwellen, Hertzschen Wellen und Röntgenstrahlen?*

Je nach der Art der Erzeugung teilt man die elektromagnetischen Wellen in verschiedene Bereiche ein, die im Unterricht behandelt worden sind:

1. Der Wellenlängenbereich von 10^4 m bis 10^{-4} m hat große Bedeutung für die Nachrichtentechnik. Er umfaßt den Bereich der *Hertzschen Wellen* mit den Langwellen, Mittelwellen, Kurzwellen und Ultrakurzwellen des Rundfunks sowie den Mikrowellenbereich, der hauptsächlich für die Richtfunktechnik und die Funkmeßtechnik Bedeutung hat.
Wellen dieses Bereiches werden durch elektronische Generatoren (Röhren- oder Transistorgeneratoren, spezielle Höchstfrequenzgeneratoren) erzeugt. Die bisher kleinste elektrisch erzeugte Welle hat eine Länge von $\lambda = 8 \cdot 10^{-5}$ m.
2. Elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von $\lambda = 3 \cdot 10^{-4}$ m bis nahezu 10^{-9} m nennt man *Lichtwellen*. Davon ist jedoch nur ein kleiner Teil sichtbar ($\lambda = 7{,}7 \cdot 10^{-7}$ m bis $3{,}9 \cdot 10^{-7}$ m). Davor liegt die Ultrarot- oder Wärmestrahlung ($\lambda > 7{,}7 \cdot 10^{-7}$ m), dahinter die ultraviolette Strahlung ($\lambda < 3{,}9 \cdot 10^{-7}$ m).
Diese Wellen werden auf thermischem Wege erzeugt. Die Schwingungen im ultraroten Bereich sind darauf zurückzuführen, daß die Moleküle sehr heißer Gase oder Festkörper durch Stöße zu Schwingungen angeregt werden. Im Ultrarotgebiet beginnt auch schon die Emission von elektromagnetischer Strahlung aus angeregten Atomen.
3. Im Bereich von $\lambda = 10^{-8}$ m bis 10^{-12} m liegt die *Röntgenstrahlung*. Sie entsteht beim Aufprall beschleunigter Elektronen auf Metalloberflächen. Der durch das Abbremsen der Elektronen auftretende Verlust an kinetischer Energie wird als elektromagnetische Strahlung emittiert. Außerdem besteht die Möglichkeit, daß die aufprallenden Elektronen in Wechselwirkung mit den Elektronen der Metallatome treten und so zur Emission von Röntgenstrahlung Anlaß geben.
4. Es schließen sich die Gammastrahlen an, die Wellenlängen zwischen $\lambda = 10^{-10}$ m und 10^{-15} m haben. Sie treten häufig bei Kernumwandlungen auf.

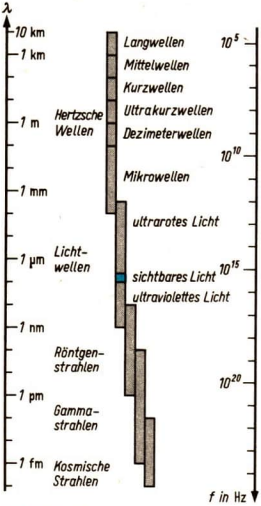


Bild 151/1 Elektromagnetisches Spektrum

5. Die bisher kleinsten bekannten Wellenlängen weist die kosmische Strahlung (Höhenstrahlung) auf ($\lambda \approx 10^{-13}$ m bis 10^{-16} m). Sie stammt von im Weltall ablaufenden Kernprozessen und ist sehr energiereich, gelangt aber selten durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche.
Der Vergleich zeigt:

> Lichtwellen, Hertzsche Wellen und Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Sachverhalte mit Wellen-eigenschaften, die sich durch die Wellenlänge und durch die Art ihrer Erzeugung unterscheiden.

Der gesamte Bereich der elektromagnetischen Wellen kann – nach einer Idee des russischen Physikers LEBEDEW (1886 bis 1918) – in einem einheitlichen System geordnet werden. Es ergibt sich dadurch eine kontinuierliche Folge von Wellen, deren Wellenlängen eine Skale von mehreren Kilometern bis herab zu wenigen Femtometern[1] belegen. Man nennt diese Folge wesensgleicher elektromagnetischer Wellen **elektromagnetisches Spektrum** (Bild 151/1).
Die beiden Grenzen des elektromagnetischen Spektrums sind nicht willkürlich gezogen. Das untere Ende bei den kleinen Frequenzen und sehr großen Wellenlängen ergibt sich aus den Grenzen der praktischen Nutzung, das obere Ende bei den hohen Frequenzen und sehr kleinen Wellenlängen ist sowohl von der Natur als auch von den technischen Errungenschaften der Menschen abhängig. Die Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik schafft die Möglichkeit, die Kenntnisse über das kurzwellige Ende des elektromagnetischen Spektrums ständig zu erweitern. So dient zum Beispiel das Weltraumforschungsprogramm der Sowjetunion mit Hilfe von Satelliten der „Kosmos"-Serie auch dem Ziel, die kosmische Strahlung zu erforschen und die Kenntnisse über diesen Bereich der elektromagnetischen Wellen zu vervollkommnen.
Das elektromagnetische Spektrum zeigt, daß die einzelnen Bereiche der elektromagnetischen Wellen nicht scharf abgegrenzt sind, sondern fließende Übergänge von einer Art der Strahlung in die benachbarte zeigen. Die Bereiche überdecken sich zum Teil.

Stellen Sie anhand von Bild 151/1 fest, welche Wellenlängenbereiche sich überdecken!
Welche Folgerungen ergeben sich daraus hinsichtlich der Eigenschaften der sich überdeckenden Bereiche?

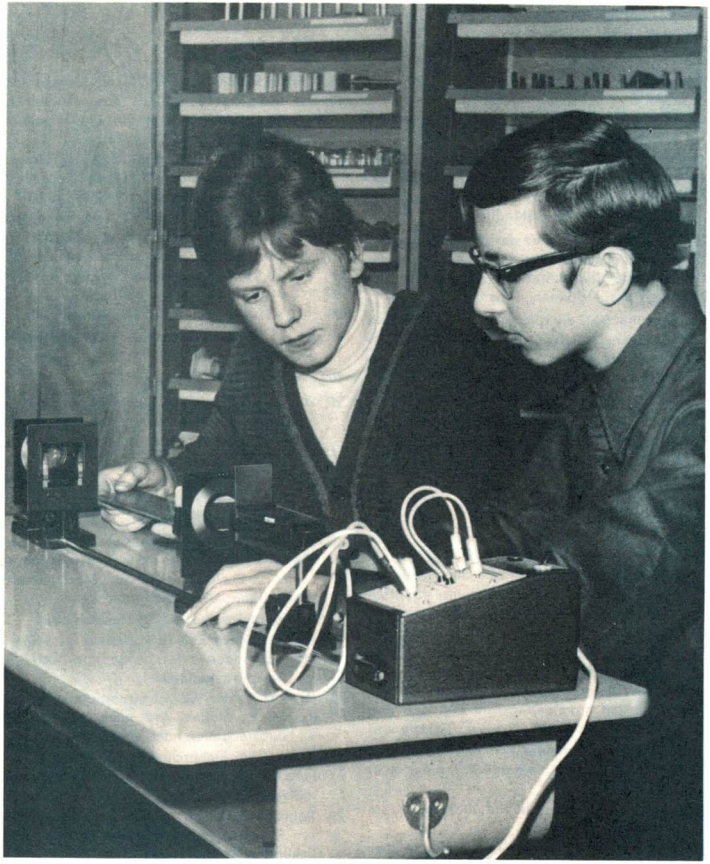
[1] Femtometer = 10^{-15} m

Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die elektromagnetischen Wellen vor allem durch die Art ihrer Erzeugung. Aber auch in ihrem *physikalischen Verhalten* weisen sie manche Unterschiede auf. Grundsätzlich gelten zwar die aus dem Bereich des Lichts bekannten Gesetze der Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz im gesamten Bereich der elektromagnetischen Wellen. Die Auswirkungen dieser Gesetze sind aber in den einzelnen Bereichen oftmals unterschiedlich, weil sich die optischen Eigenschaften der Stoffe mit der Wellenlänge ändern.
Ein weiterer Unterschied im physikalischen Verhalten besteht darin, daß es bei allen elektrisch erregten Wellen möglich ist, beliebig lange zusammenhängende Wellenzüge herzustellen, während die von Molekülen und Atomen erzeugten Wellen aus einzelnen kurzen, gedämpften Wellenzügen bestehen.

- *Suchen Sie Beispiele für unterschiedliches Verhalten von Hertzschen Wellen, Lichtwellen und Röntgenstrahlen!*

Die folgende Zusammenstellung gibt einen zusammenfassenden Überblick über Erzeugung und wichtige Anwendungsgebiete der einzelnen Wellenarten.

Wellenart	Erzeugung	Anwendungsgebiete
Hertzsche Wellen Langwellen Mittelwellen Kurzwellen Ultrakurzwellen	Röhren- und Transistorgeneratoren	Elektrische Hochfrequenz, Rundfunk, Medizin, Funkdienste
Dezimeterwellen Mikrowellen (Zentimeter- und Millimeterwellen)	Röhrengeneratoren für Höchstfrequenzen	Fernsehrundfunk, Funkmeßtechnik, hochfrequente Erhitzung
Lichtwellen Ultrarotes Licht	Ultrarotstrahler	Militärtechnik, Medizin, Ultrarot-Fotografie, Ultrarot-Telefonie
Sichtbares Licht	Lichtquellen	Beleuchtung
Ultraviolettes Licht	Bogenlampe, Quecksilberdampflampe	Medizin, Kriminaltechnik
Röntgenstrahlen	Röntgenröhre	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Medizin
Gammastrahlen	Atomkernumwandlungen	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Medizin
Kosmische Strahlen	Kernprozesse im Weltall	Wissenschaftliche Forschung



Aufgaben

Fragen, Aufträge, Versuche

Kernphysik

1. Was wissen Sie über die Rolle eines Modells in der Forschung?
2. Beschreiben Sie die Ihnen aus dem Unterricht bekannten Atommodelle! Vergleichen Sie sie! Stellen Sie fest, welche Aussagen über Modelle Ihnen unverständlich sind!
3. Welche Informationen gewinnen Sie aus der Angabe der Massenzahl und der Ordnungszahl über den Aufbau der Atome eines Elements des Periodensystems?
4. Begründen Sie die sprunghaften Änderungen der Eigenschaften der Elemente mit Hilfe des Atombaus!
5. Erklären Sie die Umordnung der Elektronen bei der Reaktion von Natrium mit Chlor!
6. Stellen Sie in einer Tabelle die Anzahl der Protonen, der Neutronen und der Elektronen für folgende Atome zusammen:

   $^{2}_{1}H$, $^{4}_{2}He$, $^{16}_{8}O$,

   $^{17}_{8}O$, $^{60}_{27}Co$, $^{206}_{82}Pb$,

   $^{207}_{82}Pb$, $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$!
7. Wodurch unterscheiden sich die Atome der Elemente Wasserstoff und Helium? Wodurch unterscheiden sich Kohlenstoffatome von Stickstoffatomen?
8. Welche Atome haben als Außenschale eine maximal besetzte Elektronenschale? Geben Sie für diese Atome den Namen der Elemente, die Kernladungszahl und den Bau der Elektronenhülle in einer Tabelle an!
9. Warum unterscheidet sich die Masse eines Lithium-Ions nur unwesentlich von der eines Lithium-Atoms?
10. Wieviel Elektronen haben dieselbe Masse wie ein Proton?
11. Erklären Sie mit Hilfe der Kenntnisse über den elektrischen Leitungsvorgang in Gasen die Arbeitsweise eines Zählrohres!
12. Erklären Sie die Arbeitsweise einer Nebelkammer!
13. Erklären Sie den Begriff Isotop!
14. Welche Isotope finden Sie unter den in Aufgabe 6 genannten Atomen?
15. Welche Elemente mit den Kernladungszahlen 3 ... 20 gehören zu den Mischelementen, welche zu den Reinelementen? (↗ Chemie in Übersichten, Seiten 22 und 23.
16. Was bedeutet die Aussage, daß die relative Atommasse von Chlor 35,453, von Sauerstoff 15,9994 und von Kohlenstoff 12,01115 ist?
17. Magnesium setzt sich zu 78% aus dem Isotop mit der Massenzahl 24 und zu jeweils 11% aus den Isotopen mit den Massenzahlen 25 und 26 zusammen. Berechnen Sie die relative Atommasse von Magnesium!
18. Was versteht man unter Spontanzerfall?
19. Geben Sie die Eigenschaften der radioaktiven Strahlung an!
20. Was bedeutet $^{222}_{86}Rn \rightarrow \cdots + ^{4}_{2}\alpha$?
21. Welche Regel gilt für die oberen und unteren Indizes bei spontanen Kernumwandlungen? Begründen Sie das aus allgemeinen Gesetzmäßigkeiten!
22. $^{218}_{84}Po$ zerfällt unter Aussendung von α-Teilchen. Bestimmen Sie den Folgekern durch Aufstellen der Zerfallsgleichung!
23. Welche Wirkung hat die Aussendung eines α- bzw. β-Teilchens auf die Stellung des Folgekerns im Periodensystem im Vergleich zur zur Stellung des Ausgangskerns?
24. Erläutern Sie den Begriff Halbwertzeit!
25. Nach welcher Zeit ist von einer ursprünglich vorhandenen Menge Radium noch $^{1}/_{2}$, $^{1}/_{4}$ und $^{1}/_{8}$ vorhanden?
26. Wieviel % der Ausgangssubstanz eines radioaktiven Stoffes sind nach Ablauf von 10 Halbwertzeiten noch vorhanden?
27. Auf welcher Eigenschaft der Organismen beruht die therapeutische Verwendung radioaktiver Strahlung?
28. Begründen Sie die von der Regierung unserer Republik getroffenen Maßnahmen zum Schutze aller mit radioaktiven Isotopen arbeitenden Personen!
29. Erläutern Sie am Beispiel der Reaktionsgleichungen den Unterschied zwischen der Kernumwandlung und der Kernspaltung!
30. Ein ^{235}Uran-Kern wird durch ein Neutron in einen ^{144}Barium-Kern und einen ^{89}Krypton-Kern gespalten. Stellen Sie den Vorgang

schematisch dar! Wieviel Neutronen werden freigesetzt? Geben Sie die Reaktionsgleichung an!

31. Welche Bedingungen müssen für das Zustandekommen einer ungesteuerten Kernreaktion erfüllt sein? Begründen Sie Ihre Aussage!
32. Erklären Sie das große Durchdringungsvermögen der Neutronen!
33. Berichten Sie über die Nutzung der Kernenergie in Kernreaktoren in unserer Republik!
34. Welche schädlichen Wirkungen treten bei Atombombenexplosionen auf?
35. Warum ist der Kampf für die Ächtung der Kernwaffen das zentrale Problem aller Abrüstungsbemühungen der UdSSR? Benutzen Sie das Lehrbuch und die Tagespresse!

Mechanische Schwingungen

36. Nennen Sie an Beispielen alle Ihnen bekannten physikalischen Größen, die sich bei einer mechanischen Schwingung ändern!
37. Bauen Sie nach Bild 155/1 einen Sandpendelschwinger! Der Trichter soll eine sehr kleine Öffnung haben. Verschließen Sie den Trichter mit dem Stopfen, und füllen Sie feinen Sand („Ata" o. ä.) ein! Nach dem Herausziehen des Stopfens wird der Trichter in pendelnde Bewegung gesetzt und das Brett möglichst gleichmäßig schnell unter der Trichteröffnung weggezogen.
Zeichnen Sie die Sandspur des Pendelschwingers möglichst genau nach! Was stellt die aufgezeichnete Sandspur des Pendelschwingers dar?

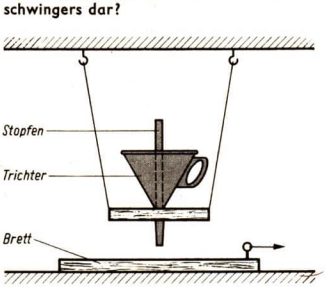


Bild 155/1 zu 37

38. Stellen Sie aus einem Gummifaden und einem Wägestück einen vertikalen Federschwinger her! Ermitteln Sie dessen Periode und Frequenz (Sekundenzeiger der Armbanduhr)!
Wie ändern sich diese Kenngrößen, wenn Sie den Gummifaden unverändert lassen und unterschiedliche Wägestücke verwenden?
39. Aus einer ungeglühten Heizwendel wird ein vertikaler Federschwinger hergestellt, indem man die Wendel aufhängt und mit einem Gegenstand belastet. Bestimmen Sie Periode und Frequenz bei verschiedenen Amplituden!
40. Beschreiben Sie mechanische Schwingungen unter Verwendung des von dem Sandpendel (↗ Aufgabe 37) aufgezeichneten Weg-Zeit-Diagramms!
41. Vergleichen Sie einen Pendelschwinger mit einem Federschwinger, und führen Sie unterschiedliche und gemeinsame Merkmale an!
42. Beschreiben Sie die Energieumwandlungen am Federschwinger!
43. Beschreiben Sie den Vorgang der Schallerzeugung an einer Schallquelle als mechanische Schwingung!
44. Eine Stimmgabel hat die Frequenz 440 Hz. Wie lange dauert eine Schwingung?
45. Beschreiben Sie die Kenngrößen einer Schwingung an einem Federschwinger, dessen Energiespeicher aus einem Gummiband besteht!
46. Was versteht man unter einer mechanischen Schwingung?
47. Nennen Sie Beispiele für mechanische Schwingungen aus der Technik!
48. Welche Periode hat eine Schwingung mit einer Frequenz von 7,3 Hz?
49. Wie ändert sich der Anteil der potentiellen und der kinetischen Energie an einem vertikalen Federschwinger während einer Schwingung?
50. Bestimmen Sie die Schwingungsdauer eines Pendelschwingers von 50 cm Länge, indem Sie die Zeit für 20 Schwingungen messen,
a) für eine Auslenkung um etwa 5° gegenüber der Vertikalen,
b) für eine Auslenkung um etwa 20°!
c) Warum treten Abweichungen von der errechneten Schwingungsdauer auf?
51. Ermitteln Sie die Fallbeschleunigung mit Hilfe eines Pendelschwingers!
52. Berechnen Sie für verschiedene Pendelschwinger die Schwingungsdauer aus der

Pendellänge, und prüfen Sie das Ergebnis durch Zeitmessung für 100 Schwingungen bei kleinen Amplituden!

53. Stellen Sie nach Bild 156/1 eine Versuchsanordnung zusammen! In welcher Höhe muß das Wägestück II befestigt werden, damit Resonanz herrscht?

54. Bauen Sie ein Drehpendel mit Dreipunktaufhängung nach Bild 156/2! Die Schwingung der Unruhe einer Taschenuhr (Drehschwingung) wird als Erregerschwingung benutzt. Durch Verstellen der Strecke l am Drehpendel ist Resonanz herbeizuführen! Beobachten Sie die Amplitude!

55. Hängen Sie vor einer hell beleuchteten Fläche einen Körper an einem etwa 1,5 m langen Faden auf (Bild 157/1). Lassen Sie das Pendel in einer Ebene schwingen, und beobachten Sie den Schatten des Pendelkörpers auf der Fläche! Halten Sie Bahn und Umkehrpunkte fest!
Lassen Sie das gleiche Pendel eine Kreisbewegung ausführen, und beobachten Sie wiederum den Schatten auf der Fläche! Erläutern Sie an den Bahnpunkten die harmonische Bewegung einer linearen Pendelbewegung und einer Kreisbewegung!

56. Bauen Sie ein bifilares Pendel nach Bild 157/2!
Beobachten Sie die harmonischen Schwingungen an diesem Pendel! Bringen Sie eine Dämpfungsscheibe am Pendel an, und vergleichen Sie die gedämpfte Schwingung mit der „ungedämpften" Schwingung!
Nach wie vielen Schwingungen ist die Amplitude auf 0,5 y_{max}; 0,25 y_{max} zurückgegangen?

57. Ein Baukran trägt die Last an einem 23 m langen Seil. Wie groß ist die Schwingungsdauer dieses Pendelschwingers?

58. Konstruieren Sie nach dem in Bild 52/1 beschriebenen Verfahren den zeitlichen Verlauf einer harmonischen Schwingung mit $y_{max} = 2{,}5$ cm!

59. Zeichnen Sie das Bild der Funktion
$y = y_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$ mit $y_{max} = 3$ cm und $f = 0{,}5$ Hz!
Berechnen Sie die Auslenkung für $t = 0, {}^1/_4; {}^2/_4; {}^3/_4; {}^4/_4 \ldots {}^8/_4$ s!

60. Welche Elongation besitzt ein Pendelschwinger zu den Zeiten ${}^1/_2$; 1; ${}^3/_2$; 2 s, wenn die Periode $T = 1$ s und die Amplitude 20 cm betragen?
Zur Zeit Null sei die Elongation Null!

61. Welche Länge muß ein Fadenpendel haben, das die Schwingungsdauer $T = 4$ s aufweisen soll? Kontrollieren Sie Ihre Berechnung durch einen Versuch!

62. Welchen Einfluß haben die Temperaturänderungen auf den Gang einer Pendeluhr, und wie könnte man sie ausgleichen?

63. Drei vollkommen gleiche Pendeluhren werden am 45. Breitengrad auf die gleiche Zeit gestellt. Je eine der Uhren wird in das Polargebiet bzw. in die Äquatorgegend gebracht. Bei erneutem Vergleich mittels Radiosignal zeigen die Uhren unterschiedliche Zeiten an. Die Temperatur soll überall gleich sein! Wie unterscheiden sich die Uhren in ihrem Gang?

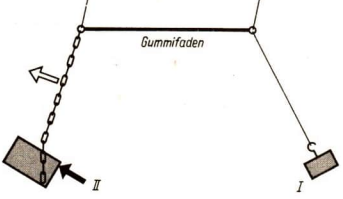


Bild 156/1 zu 53

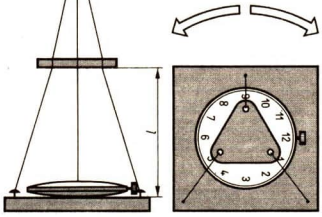


Bild 156/2 zu 54

64. FOUCAULT verwendete bei seinem berühmten Pendelversuch zum Nachweis der Erdrotation (1852 im Pantheon in Paris) einen Pendelschwinger mit einer Länge von 67 m und einem Pendelkörper von 28 kg. Berechnen Sie die Schwingungsdauer dieses Pendels!

65. Berechnen Sie die Länge eines sogenannten „Sekundenpendels" ($T = 2$ s) für einen Ort auf 50° geographischer Breite ($g = 9{,}8092\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$)!

66. Setzen Sie das Hinterrad eines umgekehrt aufgestellten Fahrrades in sehr schnelle Drehungen! Welche Beobachtung machen Sie?
Warum werden vor allem Rennräder zentriert? Wie geschieht das?

67. GALILEO GALILEI schreibt in seinen Untersuchungen über die Pendelschwingungen: „... einem ruhenden, noch so schweren Pendel können wir durch bloßes Anblasen eine Bewegung erteilen, und zwar eine recht beträchtliche, wenn wir ..." Setzen Sie den Gedankengang fort!

68. Warum sollen Marschabteilungen über Brücken, vor allem über Hängebrücken, nicht im Gleichschritt marschieren?

69. Einer Stimmgabel mit der Frequenz $f = 400$ Hz wird eine Stimmgabel mit der Frequenz $f = 280$ Hz gegenübergestellt und angeschlagen. Erfolgt ein Mitschwingen? Begründen Sie Ihre Antwort!

70. Auf welche Weise dämpft man die Schwingungsübertragung vom Kraftwagenmotor auf den Fahrzeugrahmen?

71. Untersuchen Sie, auf welche Weise in Produktionsbetrieben die Ausbreitung störender Schwingungen auf die Gebäudeteile vermindert wird!

72. Warum müssen Kraftfahrzeugräder sorgfältig ausgewuchtet sein?
Welche Gefahrenquelle ergeben sich durch nicht ausgewuchtete Räder?

73. Warum sitzt das Orchester im Konzertsaal auf einem Holzpodium?

Elektromagnetische Schwingungen

74. Wie groß ist die Kreisfrequenz eines Wechselstroms mit der Frequenz $16^2/_3$ Hz? Wie groß ist die Schwingungsdauer des $16^2/_3$-Hz-Wechselstroms? Vergleichen Sie diese Werte mit den entsprechenden Werten des 50-Hz-Wechselstroms!

75. Di Amplitude eines Wechselstroms von 50 Hz mit sinusförmiger Stromstärkekurve beträgt 2 A. Wie groß sind die Momentanstromstärken zur Zeit
$t_1 = 0{,}25\ T$; $t_7 = 2{,}75\ T$;
$t_2 = 0{,}33\ T$; $t_8 = 3{,}75\ T$?
$t_3 = 0{,}50\ T$;
$t_4 = 0{,}75\ T$;
$t_5 = 0{,}90\ T$;
$t_6 = 1{,}25\ T$;
Zur Zeit $t_0 = 0$ sei $i_{max} = 0$ A!

76. Konstruieren Sie eine Spannungs-Zeit-Kurve! Wählen Sie auf der Abszissenachse für eine volle Schwingung 12 cm ($T \triangleq 12$ cm)! Wiederholen Sie die Konstruktion für den-

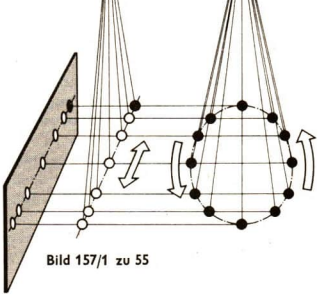


Bild 157/1 zu 55

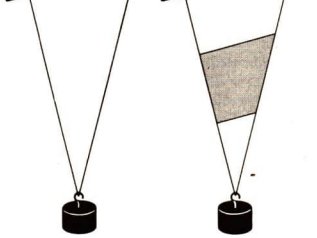


Bild 157/2 zu 56

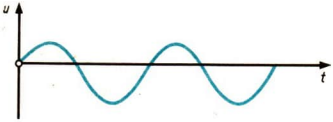


Bild 158/1 zu 77

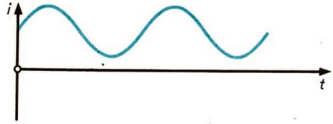


Bild 158/2 zu 78

selben Schwingungsvorgang, und wählen Sie jetzt als Periodeneinheit $2\pi \cdot r$ ($T \triangleq 2\pi \cdot r$), wobei r der Radius des Leitkreises ist! Sind beide Kurven gleichwertig?

77. Diskutieren Sie die grafische Darstellung nach Bild 158/1 in bezug auf ihren physikalischen Sachverhalt!
78. Beschreiben Sie den Strom in einem Stromkreis anhand der Stromstärke-Zeit-Kurve nach Bild 158/2!
79. Stellen Sie einige Beispiele über den Einsatz elektrischer Maschinen in der Praxis zusammen, und machen Sie dazu nähere Angaben in bezug auf Art und Aufgabe der Maschinen!
80. Begründen Sie, warum für die Messung von Wechselspannung und Wechselstromstärke besonders konstruierte Wechselstrommeßgeräte notwendig sind!
81. In einem Wechselstromkreis wird bei der üblichen Netzspannung $U = 220$ V eine effektive Stromstärke von 4,5 A und eine Wirkleistung von 495 W gemessen.
    a) Wie groß ist die Scheinleistung?
    b) Wie groß ist der Leistungsfaktor $\cos\varphi$?
82. Ein 7,6-kW-Wechselstrommotor für 380-V-Netzanschluß hat einen Leistungsfaktor von $\cos\varphi = 0{,}82$. Wie groß ist die Stromstärke?
83. Durch die Primärspule (1 500 Windungen) eines Transformators fließt ein Strom mit einer Stromstärke von 0,9 A.
    a) Wie groß wäre im Falle einer verlustlosen Energieübertragung die Kurzschlußstromstärke in einer Sekundärspule mit 10 Windungen?
    b) Welche Stromstärke ergibt sich bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 0{,}6$?
84. Der Transformator für den Betrieb einer Kohlebogenlampe gibt sekundärseitig eine Spannung von 44 V ab. Bei einer Netzspannung von 220 V fließt ein Sekundärstrom mit einer Stromstärke von 10 A. Für welche Stromstärke muß der Draht der Primärspule im Idealfall ausgelegt sein?
85. In einem Wechselstromkreis werden an einem Schaltelement mit einem rein Ohmschen Widerstand eine Spannung $u_{max} = 10$ V und eine Stromstärke $i_{max} = 5$ A gemessen. Konstruieren Sie maßstabgerecht die Spannung-Zeit-Kurve für zwei volle Perioden! Konstruieren Sie gleichfalls für zwei volle Perioden die Stromstärke-Zeit-Kurve! Entwickeln Sie aus beiden Kurven die Leistungskurve, und schraffieren Sie in Ihrer grafischen Darstellung die Fläche, die ein Maß für die elektrische Energie ist!
86. Fertigen Sie die gleichen grafischen Darstellungen wie in Aufgabe 85 für einen rein kapazitiven Widerstand an!
87. Zählen Sie Beispiele auf, wo in der Volkswirtschaft Transformatoren verwendet werden!
    Berücksichtigen Sie vor allem Ihre eigenen Erfahrungen in der sozialistischen Produktion!
88. Untersuchen Sie anhand der Fachliteratur die geschichtliche Entwicklung der Wechselstromtechnik, und berichten Sie in einem Vortrag darüber!
89. Sammeln Sie Berichte über die Bedeutung der Elektrotechnik für die Volkswirtschaft der DDR in der Phase des entwickelten gesellschaftlichen Systems des Sozialismus, und gestalten Sie dazu eine Wandzeitung!
90. Entwickeln Sie Versuchsanordnungen, um den sinusförmigen Spannungs- oder Stromstärkeverlauf des elektrischen Wechselstroms experimentell nachzuweisen!
91. Entwickeln Sie eine Versuchsanordnung, mit deren Hilfe man den Wirkungsgrad eines Fernleitungssystems (Modellversuch) ermitteln kann!
92. Ein Wechselstrommotor mit einer Wirkleistung von 3 kW nimmt bei einer Spannung von 220 V einen Strom von 18 A auf. Wie groß ist der Leistungsfaktor $\cos\varphi$?
93. Unter welchen Bedingungen ist die Wirkleistung im Wechselstromkreis gleich Null?

94. Eine Lampe für 6 V soll an die Netzspannung (220 V) angeschlossen werden.
Welches Übersetzungsverhältnis muß der Transformator haben? Welche anderen Schaltungsmöglichkeiten gibt es, um die Lampe anzuschließen?

95. Durch eine Hochspannungsleitung soll eine Leistung von 150 MW übertragen werden.
Berechnen Sie die Stromstärken
a) für eine Spannung von 220 kV!
b) für eine Spannung von 380 kV!
c) Welche Stromstärke würde sich bei einer Spannung von 380 V ergeben?
d) Weshalb ist die Spannung von 380 V ungeeignet?

96. Zeichnen Sie einen geschlossenen Schwingkreis, und beschreiben Sie den Ablauf der elektromagnetischen Schwingung für die Zeiten $t = 0$; $t = \frac{T}{4}$; $t = \frac{T}{2}$; $t = \frac{3T}{4}$; $t = T$!
Skizzieren Sie die elektrischen bzw. die magnetischen Feldlinien; geben Sie den Verlauf des Stromflusses und der Spannung während der Schwingungen in einem Diagramm an!

97. Welche Energieumwandlungen finden im geschlossenen Schwingkreis statt?

98. Wodurch wird die Dämpfung der elektromagnetischen Schwingung im geschlossenen Schwingkreis verursacht?

99. Vergleichen Sie die Energieumwandlungen im geschlossenen Schwingkreis und beim Pendelschwinger!

100. Erklären Sie die Wirkungsweise der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung anhand der Schaltskizze!

Mechanische Wellen

101. Führen Sie in einer mit Wasser gefüllten Fotoschale (oder ähnlichem Gefäß) folgende Versuche durch!
Tauchen Sie einen Holzstab senkrecht in größeren zeitlichen Abständen in der Mitte der Schale in das Wasser ein!
Tauchen Sie den Holzstab in kurzen zeitlichen Abständen periodisch in das Wasser ein!
Tauchen Sie ein Lineal mit der gesamten Kante periodisch in das Wasser ein!
Beschreiben und erklären Sie die beobachteten Erscheinungen!

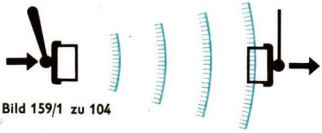


Bild 159/1 zu 104

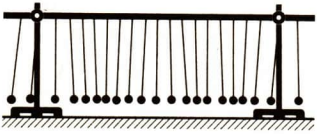


Bild 159/2 zu 108

102. Erklären Sie die wesentlichen physikalischen Eigenschaften von Schwinger und Kopplung!

103. Erzeugen Sie mit Hilfe eines an beiden Enden eingespannten Seiles Wellen! Schätzen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle! Was geschieht am Seilende?

104. Von zwei Konservendosen werden Deckel und Boden entfernt. Die Dosen werden einseitig durch gespanntes Pergamentpapier verschlossen. Führen Sie damit einen Versuch nach Bild 159/1 durch! Erklären Sie Ihre Beobachtungen!

105. Erklären Sie die Merkmale der Welle und der Schwingung!

106. Stellen Sie eine Schwingung und eine Welle grafisch dar! Worin besteht der Unterschied in der Aussage der Bilder?

107. Welches Merkmal einer Welle fehlt bei einem windbewegten Ährenfeld? Vergleichen Sie mit dem folgenden Versuch!

108. Mit dem dargestellten Modellversuch (Bild 159/2) sollen die Bewegungsvorgänge bei einer Welle veranschaulicht werden.
Welche wichtige Voraussetzung fehlt dieser Anordnung für die Entstehung und Ausbreitung einer Welle? Vergleichen Sie mit der vorausgegangenen Frage!

109. Einem Kinde ist ein Ball in einen Teich gefallen. Es wirft Steine hinter dem Ball ins Wasser.
Warum wird der Ball auf diese Weise im allgemeinen nicht an das Ufer gelangen?

110. Wie sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit,

die Wellenlänge, die Frequenz einer Welle zu bestimmen?
In welchem gesetzmäßigen Zusammenhang stehen diese Kenngrößen zueinander?

111. Überlegen Sie, wie festzustellen ist, ob die Geschwindigkeit von Schallwellen in Luft oder in Stahl (Aluminium, Wasser, Eis) größer ist! Überprüfen Sie Ihre Feststellung mit Hilfe der Angaben des „Tafelwerkes"!

112. Wie groß ist die Wellenlänge einer Oberflächenwelle, deren Frequenz 13,5 Hz und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit 23 cm · s^{-1} betragen?

113. Welche Frequenz hat eine Schallwelle, deren Wellenlänge in Luft 77 cm beträgt? Entnehmen Sie die Schallgeschwindigkeit dem „Tafelwerk"!

114. Wie groß sind die Wellenlängen der Schallwellen, die an der menschlichen Hörgrenze liegen?
a) Untere Hörgrenze: 16 Hz
b) Obere Hörgrenze: 20000 Hz
Entnehmen Sie die Schallgeschwindigkeit dem „Tafelwerk"!

115. Zwischen etwa 200 Hz und 1500 Hz liegen die Frequenzen der menschlichen Sprache. Berechnen Sie die zu diesen Frequenzen gehörigen Wellenlängen!

116. Durch ein Erdbeben in Chile wurde 1922 im Pazifik eine Flutwelle erzeugt, bei der $v = 750$ km · h^{-1} und $T = 30$ min betrugen. Welche Wellenlänge hatte diese Flutwelle?

117. Das Echolot eines Schiffes registriert eine Gesamtlaufzeit des Ultraschallimpulses von 0,04 s. Wie groß ist die Wassertiefe? (Die Breite des Schiffes wird vernachlässigt, die Schallgeschwindigkeit ist dem „Tafelwerk" zu entnehmen!)

118. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Sprachrohres!

119. Es ist die resultierende Welle zweier Wellen 1 und 2 (t = konstant) mit gleicher Wellenlänge zu zeichnen! ($\lambda_1 = 7$ cm, $\lambda_2 = 7$ cm; $y_{max1} = 2$ cm, $y_{max2} = 1$ cm; Verschiebung des Anfangspunktes der Welle 1 gegenüber der Welle 2 um 1 cm nach rechts.)

120. Es ist die resultierende Welle zweier Wellen 1 und 2 (t = konstant) mit unterschiedlicher Wellenlänge zu zeichnen!
($\lambda_1 = 4$ cm, $\lambda_2 = 5$ cm; $y_{max\,1} = 1{,}5$ cm, $y_{max\,2} = 1$ cm, gleiche Anfangspunkte.)

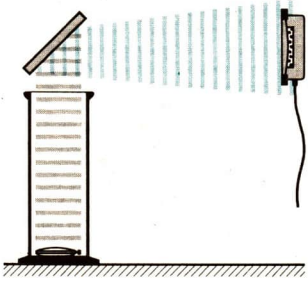


Bild 160/1 zu 122

121. Stellen Sie zeichnerisch die Reflexion und die Brechung einer Welle dar!

122. Auf den Boden eines langen Glaszylinders wird eine tickende Taschenuhr gelegt. Halten Sie über die Öffnung eine glatte Scheibe (Bild 160/1)! Erklären Sie das Ergebnis!

123. Warum müssen international anzuerkennende Schwimmrekorde bei vorgeschriebener gleichmäßiger Wassertiefe geschwommen werden?

124. Welche Wellenlänge hat eine Wasserwelle der Frequenz 13 Hz in tiefem Wasser, in dem sie sich mit einer Geschwindigkeit von 23 cm · s^{-1} fortbewegt? Welche Wellenlänge hat diese Welle nach dem Übertritt in ein Flachwassergebiet bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 20 cm · s^{-1}?

125. Warum ändern Wasserwellen an den Ufern von Teichen und Flüssen ihre Richtung?

126. Untersuchen Sie an Schallwellen die Beugung hinter einem Hindernis (z. B. Hausecke, Türspalt und Heuschober)!

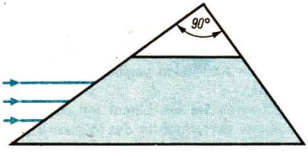


Bild 160/2 zu 129

Lichtwellen

127. Warum ist die Brechung an einem ins Wasser gehaltenen Stock am besten zu sehen, wenn man schräg auf die Wasseroberfläche blickt?
128. Warum kann man einen Glasstab in Luft oder Wasser sehen, obwohl Glas lichtdurchlässig ist?
129. Zeichnen Sie den Strahlengang an einem trapezförmigen Prisma (Bild 160/2) für drei parallel zu den parallelen Seiten des Trapezes einfallende Strahlen, und erklären Sie die für diesen optischen Körper übliche Bezeichnung Wendeprisma!
130. Beschreiben Sie das Mikroskop nach den wesentlichen Gesichtspunkten wie:
Zweck, physikalische Grundlagen, Bauelemente, Vergrößerungs- bzw. Abbildungsmaßstab (als Wdhlg.)!
131. Was muß man tun, um das astronomische Fernrohr für Erdbeobachtungen anwenden zu können (als Wdhlg.)?
132. Zwei Taschenleuchten oder andere einfache Lichtquellen, ein auf einer Nadel drehbar gelagerter Pappstern und ein weißer Schirm sind so aufzustellen, daß sich beim Drehen des Sterns seine beiden Schatten auf dem Schirm in entgegengesetztem Umlaufssinn drehen!
Skizzieren Sie den Versuchsaufbau, und erproben Sie ihn praktisch! Was soll damit gezeigt werden?
133. Man stellt einen Spiegel senkrecht auf den Tisch und legt davor einen Bogen Schreibpapier. Jemand wird aufgefordert, seinen Namen auf das Papier zu schreiben, dabei aber nur in den Spiegel zu sehen. Was geschieht? Warum?
134. Berechnen Sie die Zeit, die ein Lichtsignal von der Sonne zur Erde und vom Mond zur Erde durchschnittlich braucht!
135. Was sagt die Einheit „Lichtjahr" aus?
136. Je näher wir am Fenster stehen, desto größer ist der uns sichtbare Teil der Straße. Es wäre natürlich, so scheint es, bei der Verwendung eines Spiegels analoge Verhältnisse anzunehmen. Das ist aber nicht so. Wenn wir uns in einem an der Wand senkrecht hängenden Spiegel nur bis zum Knie sehen, sind alle Versuche vergeblich, etwa mehr sehen zu wollen, indem man näher herantritt oder weiter weggeht. Wodurch unterscheiden sich beide Fälle?
137. Unter sehr schweren Bedingungen müssen die Stahlschmelzer arbeiten, die von der Wärme des Ofens getroffen werden. Man sollte meinen, daß man ihnen zur Erleichterung eine Kleidung aus Stoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit geben müsse. Stattdessen ist die Arbeitskleidung der Metallurgen oft mit dünnen glänzenden Metallschichten bedeckt, also einem Stoff mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Warum macht man das?
138. Was beabsichtigt der Arzt, wenn er dem Patienten sogenanntes „Rotlicht" verschreibt?
139. Im Hochgebirge und am Meer erhält man auch dann eine braune Hautfärbung, wenn bedeckter Himmel ist. Was ist daraus zu schließen?
140. Das Wasser eines Gebirgssees erwärmt sich im Sommer, obwohl die Lufttemperatur im Durchschnitt niedrig ist. Wie ist das zu erklären?
141. Beschreiben Sie die Wirkung der Frühbeetfenster in gärtnerischen und landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaften als „Wärmefalle" physikalisch!
142. Warum gibt es bei Bildern, die von Hohlspiegeln erzeugt werden, keine farbigen Ränder?
143. Warum erhält man kein deutliches Spektrum, wenn der Spalt zwischen Lichtquelle

Bild 161/1 zu 146

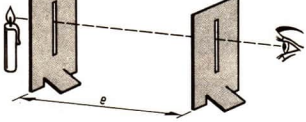


Bild 161/2 zu 147

und Prisma sehr breit ist? Begründen Sie den weißen Mittelteil des Bildes!

144. Informieren Sie sich, wo die Spektralanalyse angewendet wird!

145. Welche Eigenschaften eines Körpers können bestimmt werden mit dem:
a) Fernrohr
b) Mikroskop
c) Spektralapparat?

146. Blicken Sie durch eine Vogelfeder gegen eine 1 bis 2 m entfernte Kerze! Was beobachten Sie? Erläutern Sie die Erscheinung! Verändern Sie die Versuchsbedingungen, indem Sie die Kerzenflamme durch ein Sieb, durch Dederongewebe o. ä. betrachten!
Was beobachten Sie, wenn Sie sich der Kerzenflamme nähern oder sich von ihr entfernen (Bild 161/1)?

147. Schneiden Sie in zwei Postkarten je einen feinen Spalt mit einer Rasierklinge ein! Stellen Sie beide Karten, wie es Bild 161/2 zeigt, auf den Tisch, und beleuchten Sie den Spalt einer Karte mit einer Kerze!
Was beobachten Sie, wenn Sie über die beiden Spalte die Kerzenflamme anvisieren? Wie ändert sich die Erscheinung, wenn Sie die Entfernung e zwischen den Postkarten verändern?

148. Rotes Licht tritt in der angegebenen Weise in einen schwarzen Kasten ein und wieder aus. Zwei Möglichkeiten über den Strahlengang im Inneren sind ebenfalls bildlich dargestellt.
Wie kann durch einmalige Änderung des Input (des Lichteinfalls) entschieden werden, welches Element, Spiegel oder Prisma, sich im Inneren befindet?

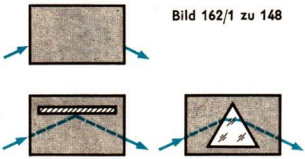


Bild 162/1 zu 148

Hertzsche Wellen

149. Skizzieren Sie als Ergänzung zu Bild 129/1 das elektromagnetische Feld um den Dipol zur Zeit $t = \frac{3}{8} T$!

150. Erklären Sie den Unterschied zwischen einer elektromagnetischen Schwingung und einer elektromagnetischen Welle!

151. Wie groß ist die Schwingungsdauer bei einem offenen Schwingkreis, der Hertzsche Wellen von 1 km Wellenlänge ausstrahlt?

152. Erklären Sie den Vorgang der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen!

153. Welche physikalischen Vorgänge werden in einem Dipol beim Auftreffen Hertzscher Wellen ausgelöst?

154. Die Länge eines $\frac{\lambda}{2}$-Dipols für Fernsehempfang beträgt 81 cm. Bestimmen Sie seine Resonanzfrequenz! In welchem Rundfunk-Wellenbereich arbeitet der Sender?

155. Was für Eigenschaften zeigen Hertzsche Wellen? Wie weist man diese Eigenschaften nach?

156. Das Programm von Radio DDR I wird vom Sender Dresden auf einer Frequenz von 1043 kHz ausgestrahlt. Berechnen Sie die Wellenlänge!

157. Der Transistorenempfänger „Stern 111" hat einen Frequenzbereich von 7,6 MHz bis 145 kHz. Welche größte und welche kleinste Wellenlänge kann mit dem Gerät empfangen werden?

158. Der Abstimmkreis in einem Rundfunkempfänger hat eine Induktivität von 200 μH. In welchem Bereich muß die Kapazität des Drehkondensators verstellbar sein, wenn der Mittelwellenbereich überstrichen werden soll?

159. Welche höchste Frequenz kann mit dem in Aufgabe 158 gegebenen Empfänger noch empfangen werden, wenn die kleinste Kapazität des Drehkondensators 10 pF beträgt?

160. Informieren Sie sich in der Programmzeitschrift des Deutschen Demokratischen Rundfunks, von welchen Sendern die Sendungen des Deutschen Fernsehfunks ausgestrahlt werden! Zeichnen Sie die Standorte dieser Sender in eine Karte der DDR ein!

161. Fertigen Sie anhand der Angaben in der Rundfunk-Programmzeitschrift eine Übersicht an, welche Frequenzen eines der in Bild 133/2 angegebenen Rundfunk-Wellenbereiche von Sendern des Deutschen Demokratischen Rundfunks belegt sind!
162. Begründen Sie die Notwendigkeit der Modulation bei der drahtlosen Telefonie!
163. Erklären Sie das physikalische Prinzip der Modulation hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen!
164. Auf welche Weise werden im Empfänger die modulierten hochfrequenten Schwingungen in Schallwellen umgewandelt?
165. Skizzieren Sie mit Hilfe von Bild 140/2 die Schaltung eines einfachen Empfängers für Kopfhörerempfang!
Führen Sie nach Möglichkeit die Schaltung praktisch aus!
166. Geben Sie einen Überblick über die wichtigsten Anwendungsgebiete der Hertzschen Wellen!
167. Bei einer Radaranlage darf das folgende Signal erst dann vom Sender ausgestrahlt werden, wenn das „Echo" seines Vorgängers eingetroffen ist. Wie weit darf unter dieser Bedingung das Radarziel entfernt sein, wenn die Signale im Abstand von 2 Millisekunden aufeinander folgen?
168. Mit Hilfe eines Radargerätes wird die Mondentfernung bestimmt. Wie groß ist diese, wenn das an der Mondoberfläche reflektierte Radarsignal nach 2,56 s zum Sender zurückkehrt?
169. Die sowjetischen automatischen Raumsonden „Venus 5" und „Venus 6" landeten am 16. bzw. 17. 5. 1969 auf dem Planeten Venus. Mit Hilfe eines Funksenders wurden die Ergebnisse wissenschaftlicher Messungen von der Venusoberfläche zur Erde übertragen. Welche Zeit benötigten die Funksignale, wenn die günstigste Stellung der Venus zur Erde angenommen wird (Entfernung etwa 42 Millionen Kilometer)?

Röntgenstrahlung

170. Warum sind die Abmessungen eines Röntgenschirmbildes immer größer als die wirklichen Maße des Gegenstandes?
171. Strahlt eine bewegte Ladung immer elektromagnetische Felder aus?
172. Warum tritt die Röntgenstrahlung nicht auch in Elektronenröhren auf?
173. Wie schützt sich medizinisches Personal vor den schädlichen Wirkungen der Röntgenstrahlung?

Wiederholung, Systematisierung

174. Wie ist es zu erklären, daß sich Bereiche des elektromagnetischen Spektrums überlappen?
175. Wodurch unterscheiden sich Mikrowellen höchster Frequenzen von langwelligen Infrarotstrahlen?
176. Suchen Sie konkrete Beispiele für die technische Nutzung der einzelnen Wellenarten des elektromagnetischen Spektrums!
177. Nennen Sie Möglichkeiten des Nachweises von Hertzschen Wellen, Lichtwellen und Röntgenstrahlen!
Erklären Sie diese Nachweisverfahren!
178. Fledermäuse stoßen zu ihrer Orientierung Ultraschallwellen mit einer Frequenz zwischen 30 und 70 kHz aus. Welcher Unterschied besteht zwischen diesen Ultraschallwellen und elektromagnetischen Wellen gleicher Frequenz?

Schwingungsdauer eines Fadenpendels — S1

Aufgabe

Ermitteln Sie die funktionale Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Fadenpendels von seiner Länge!

Vorbetrachtungen

1. Analysieren Sie den Schwingungsvorgang eines Fadenpendels, der im Bild 164/1 dargestellt wurde!
   a) Welche physikalischen Größen werden durch die Ziffern gekennzeichnet?
   b) Welche Formen mechanischer Energie des Pendelkörpers sind in den Punkten A, B und C vorhanden?
2. Geben Sie an, nach welcher Gleichung die Schwingungsdauer eines Fadenpendels berechnet werden kann, wenn man n Schwingungen in der Zeit t_n gezählt hat!
3. Schreiben Sie alle den Schwingungsvorgang beeinflussenden Größen nieder, die im folgenden Experiment konstant gehalten bzw. vernachlässigt werden (↗ S. 53 bis 54)!

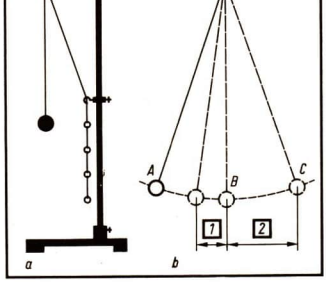


Bild 164/1

Geräte und Hilfsmittel

V-Fuß
Stativstab, 50 cm
Stativstab, 25 cm
Universalmuffe
2 Ringe mit Haken
Faden (dünn!)
Pendelkörper (z. B. Hakenkörper, 50 p)
Meßstab
Uhr mit Sekundenzeiger

Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Beantworten Sie die Fragen, und lösen Sie die Aufgaben zu den Vorbetrachtungen!
3. Vervollständigen Sie den Kopf der vorgegebenen Meßwerttabelle! (Ohne Spalten 5 und 6!)
4. Bauen Sie ein geeignetes Stativ auf! Kombinieren Sie die beiden Ringe mit Haken so, daß bei jeder Längenänderung des Fadens nicht neu geknotet werden muß! (Bild 164/1a)
5. Hängen Sie den Pendelkörper an einen dünnen Faden, der um den Haken des feststehenden Ringes gewickelt und am verschiebbaren Ring befestigt wird!
6. Ermitteln Sie jeweils für 5 unterschiedliche Längen den Mittelwert der Schwingungsdauer, indem Sie die für 10 Schwingungen erforderliche Zeit messen! Beachten Sie, daß die Messung bei kleinen Auslenkwinkeln $\alpha < 5°$ erfolgen muß! Messen Sie jeweils die Länge des Fadenpendels vom Aufhängepunkt bis zum Schwerpunkt des Pendelkörpers!
7. Stellen Sie das Bild der Funktion $T = f(l)$ in einem Diagramm dar!
8. Vergleichen Sie den Verlauf der ermittelten Funktionskurve mit den im Bild 165/1 dargestellten Kurvenverläufen! Welche Proportionalität ist vermutlich vorhanden? Schreiben Sie diese Proportionalität auch so nieder, daß die Schwingungsdauer T linear auftritt!

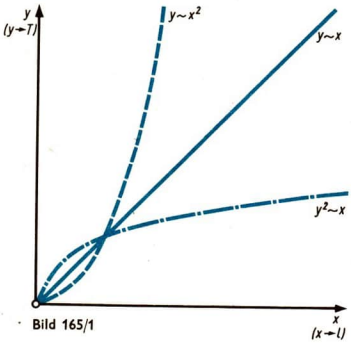


Bild 165/1

9. Überprüfen Sie die Richtigkeit der vermuteten Aussage über den funktionellen Zusammenhang zwischen Schwingungsdauer und Pendellänge, indem Sie entsprechende Quotienten bilden! (Berechnen Sie vorher $\sqrt{l}$, und tragen Sie die Werte in die Spalte 5 ein!)
10. Formulieren Sie als Ergebnis den funktionalen Zusammenhang in Worten!
11. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch, indem Sie übersichtlich systematische und zufällige Fehler herausstellen! (↗ „Physik in Übersichten").
    Beachten Sie weiterhin die Aussagen zu den Vorbetrachtungen unter 3.!

Versuchsprotokoll S 1

Schwingungsdauer eines Fadenpendels

Name: Klasse:

Aufgabe:

Lösungen und Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1a) 1 ...
2 ...

1b) A ...
B ...
C ...

2.

3.

Meßwerte:

Nr.	l in	t_n in	$T = \frac{\quad}{\quad}$ in		
1					
2					
3					
4					
5					

Diagramm:

Vermutlicher Zusammenhang:

... ~ ...

oder ... ~ ...

Ergebnis:

Zu 11.

Widerstände einer Spule und eines Kondensators im Gleich- und im Wechselstromkreis — S 2

Aufgabe

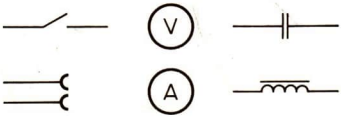
1. Ermitteln Sie den Widerstand einer Spule im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis!
2. Führen Sie die gleichen Untersuchungen an einem Kondensator aus!

Vorbetrachtungen

1. Wie lautet die Definitionsgleichung für den elektrischen Widerstand?
2. Wie kann der Widerstand eines elektrischen Gerätes ermittelt werden?
3. Wie sind Strom- und Spannungsmesser im Stromkreis zu schalten?

Geräte und Hilfsmittel

Spannungsquelle
Schalter
Spule mit Kern
Kondensator
Spannungsmesser
Strommesser
Verbindungsleiter



Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Entwerfen Sie unter Benutzung der oben genannten Schaltzeichen zwei Schaltskizzen, daß mit den entsprechenden Schaltungen die gestellten Aufgaben gelöst werden können (Protokoll)!
3. Bauen Sie die Versuchsanordnung mit der Spule nach der Schaltskizze auf!
4. Lassen Sie vom Lehrer Schaltskizze und Schaltung überprüfen, und erfragen Sie die zu wählenden Gleich- und Wechselspannungen!
5. Stellen Sie die genannte Gleichspannung an der Spannungsquelle ein, wählen Sie an den Meßinstrumenten die geeigneten Meßbereiche, und führen Sie die notwendigen Messungen an der Spule aus (Protokoll)!
6. Wiederholen Sie die Messung zweimal (Protokoll)!
7. Führen Sie die Messungen entsprechend den Punkten 5. und 6. nun mit Wechselspannung aus! Beachten Sie die richtige Meßbereichswahl an den Meßinstrumenten (Protokoll)!
8. Führen Sie die Untersuchungen entsprechend den Punkten 3. bis 7. nun mit einem Kondensator im Stromkreis durch!
9. Berechnen Sie die sich aus den Messungen ergebenden Widerstände (Protokoll)!
10. Nennen Sie Fehlerquellen! Wie wirken sie sich aus?
11. Vergleichen Sie die für Gleich- und Wechselstrom ermittelten Widerstände, und versuchen Sie, eine Begründung für das Ergebnis zu geben (Protokoll)!

Versuchsprotokoll S 2

Widerstände einer Spule und eines Kondensators im Gleich- und im Wechselstromkreis

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...
3. ...

Schaltskizze:

Meßwerte und Berechnungen:

Spule:
Gleichspannung: $U_G =$
Wechselspannung: $U_W =$

Kondensator:
Gleichspannung: $U_G =$
Wechselspannung: $U_W =$

Spule				
	Messung Nr.	U in	I in	R in .....
Gleichspannung	1 2 3			
Wechselspannung	1 2 3			

Kondensator				
	Messung Nr.	U in	I in	R in .....
Gleichspannung	1 2 3			
Wechselspannung	1 2 3			

Fehlerquellen:

Ergebnis des Vergleiches:

Begründung für das Ergebnis:

Spannungsübersetzung eines unbelasteten Transformators — S 3

Aufgabe

Bestimmen Sie den Zusammenhang zwischen dem Quotienten der Windungsanzahlen von Primär- und Sekundärspule $\frac{N_1}{N_2}$ und dem Quotienten aus Primär- und Sekundärspannung $\frac{U_1}{U_2}$ an einem unbelasteten Transformator!

Vorbetrachtungen

1. Weshalb kann an der Sekundärspule eines Transformators eine Spannung nachgewiesen werden, wenn an die Primärspule eine Wechselspannung gelegt wird?
2. Unter welchen Bedingungen kann von einem unbelasteten bzw. von einem belasteten Transformator gesprochen werden?

Geräte und Hilfsmittel

Spannungsquelle
Spannungsmesser
2 Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen
U-Kern
I-Kern
Verbindungsleiter

Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Entwerfen Sie eine Schaltskizze für eine Schaltung, mit deren Hilfe die gestellte Aufgabe gelöst werden kann (Protokoll)!
3. Bauen Sie die Versuchsanordnung auf!
4. Lassen Sie die Schaltung vom Lehrer überprüfen! Erfragen Sie die zu wählenden Primärspannungen (Protokoll)!
5. Führen Sie die notwendigen Messungen für drei Primärspannungen aus (Protokoll)!
6. Berechnen Sie die in der Aufgabe genannten Quotienten (Rechenstab), und vergleichen Sie sie (Protokoll)!
7. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung aus!

Versuchsprotokoll S 3

Spannungsübersetzung eines unbelasteten Transformators

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...

Schaltskizze:

Meßwerte und Berechnungen:

N_1	N_2	U_1 in ...V...	U_2 in ...V...	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{U_1}{U_2}$
5					

Ergebnis:

Fehlerbetrachtung:

Abhängigkeit der Sekundärspannung von der Belastung eines Transformators

S 4

Aufgabe:

Stellen Sie fest, wie sich die Sekundärspannung in Abhängigkeit von der Belastung eines Transformators ändert!

Vorbetrachtungen

1. Wie lautet die Gleichung für die Spannungsübersetzung am unbelasteten Transformator?
2. Wie ändert sich die Belastung des Transformators, wenn der Widerstand des an der Sekundärspule angeschlossenen Gerätes verringert wird?

Geräte und Hilfsmittel

Spannungsquelle
Transformator
Spannungsmesser
Strommesser
Schiebewiderstand
Verbindungsleiter

Arbeitsanweisung

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Bauen Sie die Versuchsanordnung entsprechend der Schaltskizze (Bild 168/1) auf!
3. Stellen Sie den Gesamtwiderstand R_{ges} des Schiebewiderstandes fest! Nehmen Sie Markierungen mit Bleistift oder Kreide für 10 Stellungen des Schiebers vor, so daß diese Stellungen $\frac{10}{10}, \frac{9}{10}, \frac{8}{10}, \ldots$ des Gesamtwiderstandes R_{ges} entsprechen!

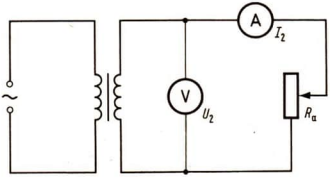


Bild 168/1

4. Lassen Sie die Schaltung vom Lehrer überprüfen, und erfragen Sie die zu wählende Primärspannung U_1 und die maximal zulässige Sekundärstromstärke I_2 (Protokoll)!
5. Führen Sie die Messungen beim größten Widerstand beginnend aus! Beachten Sie, daß die maximal zulässige Stromstärke bei der stufenweisen Verringerung des Widerstandes R_a nicht ganz erreicht wird (Protokoll)!
6. Tragen Sie die Meßwerte in ein Diagramm ein!
7. Formulieren Sie das Ergebnis der gestellten Aufgabe in einem Satz! Benutzen Sie dazu das gezeichnete Diagramm!
8. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung aus!

Versuchsprotokoll S 4

Abhängigkeit der Sekundärspannung von der Belastung eines Transformators

Name: Klasse:

Aufgabe:

Antworten zu den Vorbetrachtungen:

1. ...
2. ...

Schaltskizze:

Meßwerte und Berechnungen:

Primärspannung U_1 =
maximale Sekundärstromstärke I_2 =
Gesamtwiderstand R_{ges} =

R_a in Ω	U_2 in V

Ergebnis:

Fehlerbetrachtungen:

Beobachtung der Beugung des Lichtes

S 5

Aufgabe

Beobachten Sie die Interferenzerscheinungen bei der Beugung von Rot- und Blaufilterlicht am Doppelspalt und am schmalen Hindernis oder am einfachen Spalt!

Zusatzaufgabe

Untersuchen Sie den Zusammenhang von Streifenabstand und Beobachtungsentfernung und (oder) den Zusammenhang von Streifenabstand und Hindernisbreite!

Geräte und Hilfsmittel

Stativstab 1 m lang als Schiene zur optischen Bank
Baugruppe I
- Experimentierleuchte
- Blendenstreifen mit Spalt 0,2 mm
- T-Fuß

Baugruppe II
- Blendrahmen mit Schiebeschächten
- Rundtischchen
- T-Fuß
- Rot- und Blaufilter
- Doppelspalt
- einfacher Spalt
- dünne Näh- und Stecknadeln
- schmales Korkstück

Baugruppe III
- Transparenter Schirm
- Blendrahmen mit Linse $f = +50$ mm (..)
- T-Fuß

Arbeitsanweisungen

1. Setzen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 169/1 zusammen!
   - Beginnen Sie mit der Montage der Baugruppen! Baugruppe III besteht vorerst nur aus dem T-Fuß und dem transparenten Schirm.
   - Ordnen Sie die Baugruppen entsprechend der Abbildung auf dem Stativstab als optische Bank an! Die Baugruppen I und III stehen dabei an den äußersten Enden des Stativstabes, Baugruppe II wird nach Augenmaß in der Mitte aufgestellt.
2. Justieren Sie die Versuchsanordnung!
   - Richten Sie die Experimentierleuchte so aus, daß das schmale Lichtbündel die Öffnung des Blendrahmens zentral durchsetzt und in der Mitte des Schirmes ein unscharf begrenzter Lichtstreifen entsteht (Heben, Senken, leichtes Schwenken der Leuchte)!
   - Verschieben Sie den Stiel der Lampe im Lampenhaus, bis der Lichtstreifen auf dem Schirm etwa eine Breite von 0,5 cm erreicht!
   - Sorgen Sie durch Drehen des Stieles der Lampe für Parallelstellung von Glühwendel und Spalt!

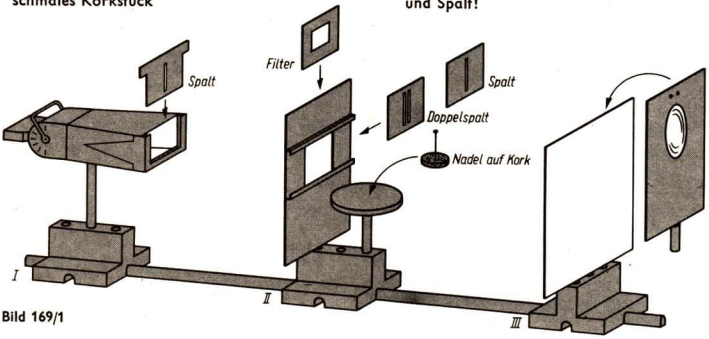


Bild 169/1

- Tauschen Sie schließlich den Bildschirm durch die Linse $f = +50$ mm aus, um die Interferenzfigur vergrößert und lichtstärker beobachten zu können!

3. Beobachten Sie die Interferenzfiguren bei der Beugung von Rot- und Blaufilterlicht am Doppelspalt und wahlweise am schmalen Hindernis oder am einfachen Spalt! Halten Sie alle Beobachtungsbefunde im Protokoll fest!
   - Versuch 1:
     Beobachtung der Beugung am Doppelspalt. Setzen Sie den Doppelspalt gut durchleuchtet in den waagerechten Schacht, den Rot- und später den Blaufilter in den senkrechten Schacht des Blendrahmens der Baugruppe II ein! Vergleichen Sie die entstehenden Interferenzfiguren!
   - Versuch 2:
     Beobachtung der Beugung am schmalen Hindernis. Entfernen Sie den Doppelspalt, setzen Sie dafür auf das Tischchen eine in ein Korkstück eingestochene Nadel in den Strahlengang! Achten Sie besonders auf die Mitte des Schattens der Nadel!
   - Versuch 3:
     Beobachtung der Beugung am einfachen Spalt. Ersetzen Sie den Doppelspalt durch einen einfachen Spalt, und vergleichen Sie die Interferenzfiguren für Rot- und Blaufilterlicht!
4. Untersuchen Sie zusätzlich den Zusammenhang von Streifenabstand und Beobachtungsentfernung oder (und) den Zusammenhang von Streifenabstand und Hindernisbreite!
   - Zusatzversuch 1:
     Ordnen Sie alles wie beim Versuch 1! Rücken Sie die Baugruppe II dicht an die Linse! Beobachten Sie die Interferenzfigur, während Sie die Baugruppe II langsam auf die Lichtquelle zu bis über die Mittellage hinaus bewegen. Wie ändert sich der Streifenabstand? Welcher Zusammenhang besteht zwischen Beobachtungsentfernung und Streifenabstand?
   - Zusatzversuch 2:
     Ordnen Sie alles wie beim Versuch 2! Tauschen Sie nacheinander Nadeln von verschiedenem Durchmesser gegeneinander aus, und beobachten Sie jeweils das Interferenzbild! Welcher Zusammenhang besteht zwischen Streifenabstand und Hindernisbreite?

Versuchsprotokoll S 5

Beobachtung der Beugung des Lichtes

Name: Klasse:

Aufgabe:

Beobachtungen zur Beugung von Rot- und Blaufilterlicht am Doppelspalt

am Hindernis
einfacher Spalt

Zusammenhang von Lichtfarbe und Streifenabstand:

Rotfilterlicht $\frac{\text{kleiner}}{\text{großer}}$ Streifenabstand

Blaufilterlicht $\frac{\text{kleiner}}{\text{großer}}$ Streifenabstand

Zusatzaufgabe:

Zusammenhang von Streifenabstand und Beobachtungsentfernung:

Je desto

Zusammenhang von Streifenabstand und Hindernisbreite:

Je desto

Beobachtung der Beugung des Lichtes an einem Strichgitter

S 6

Aufgabe

1. Beobachten Sie die Beugung des Lichts an einem Strichgitter!
2. Untersuchen Sie den Einfluß der Gitterkonstante auf den Streifenabstand der Interferenzfigur!

Zusatzaufgabe

3. Bestimmen Sie die Wellenlänge von Rot- und Blaufilterlicht und (oder) die Grenzen des Bereiches des sichtbaren Lichtes!

Geräte und Hilfsmittel

Stativstab 1 m lang als Schiene zur optischen Bank
Meßstab 1 m
Lineal mit Millimeterteilung, durchsichtig (nur für Zusatzversuch)
Baugruppe I
  Experimentierleuchte
  Blendenstreifen mit Spalt 0,2 mm
  T-Fuß
Baugruppe II
  Blendrahmen mit Linse $f = +100$ mm (...)
  Handapparat
  T-Fuß
  Rot- und Blaufilter
  Gitter, $b = 0{,}1$ mm (.) und $b = 0{,}05$ mm (..)
Baugruppe III
  Blendrahmen mit Schiebeschächten
  Blendrahmen mit Linse $f = +50$ mm (..)
  2 T-Füße
  Streifen Transparentpapier

Arbeitsanweisungen

1. Bereiten Sie das Protokoll vor!
2. Setzen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 171/1 zusammen!
   - Beginnen Sie mit der Montage der einzelnen Baugruppen. Ordnen Sie die fertigen Baugruppen nach der Abbildung auf dem Stativstab als optische Bank an! Die Entfernung zwischen dem Blendrahmen mit Schiebeschächten und der ersten Nut des Handapparates soll dabei genau 500 mm betragen. Die Okularentfernung wird auf 50 mm eingestellt.
3. Justieren Sie die Versuchsanordnung!
   - Verschieben Sie die Baugruppe I längs der optischen Achse, bis auf dem in den Blendrahmen eingeschobenen Transparentpapierstreifen ein scharfes Bild des Spaltes erscheint! Durch Heben, Senken oder leichtes Schwenken der Leuchte kann das Bild genau auf die Mitte des Schirmes projiziert werden.
   - Ziehen Sie den Stiel der Lampe bis zum Anschlag aus dem Lampenhaus heraus! Sorgen Sie durch Drehen am Stiel für Parallelstellung von Glühwendel und Spalt!

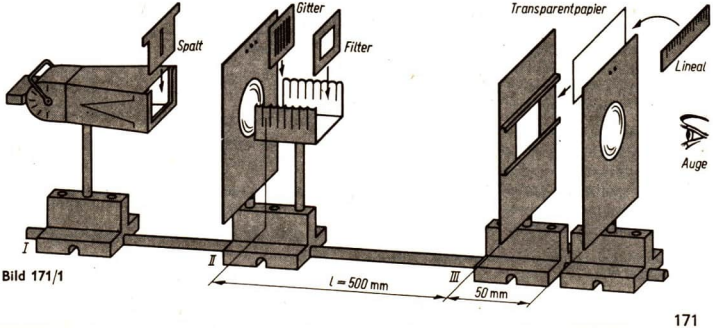


Bild 171/1

- Entfernen Sie den Transparentpapierstreifen! Wenn Sie durch das Okular blicken, müssen Sie in der Mitte des Gesichtsfeldes das scharfe, vergrößerte Bild des Spaltes sehen.

4. Führen Sie nunmehr die Experimente zur Beugung des Lichtes am Strichgitter durch! Fixieren Sie alle Beobachtungsbefunde im Protokoll!

   - Versuch 1:
     Beobachten Sie die Interferenzfiguren bei der Beugung von Rot- und Blaufilterlicht am Gitter, $b = 0{,}1$ mm (.)!
     Schieben Sie dazu das Gitter in die erste Nut, das Filter in die letzte Nut des Handapparates ein! Vergleichen Sie die Interferenzfiguren für Rot- und Blaufilterlicht!

   - Versuch 2:
     Wiederholen Sie den Versuch 1, jedoch mit dem Gitter (. .), $b = 0{,}05$ mm![1]

   - Versuch 3:
     Belassen Sie alles wie im Versuch 2, entfernen Sie lediglich das Farbfilter! Wie ändert sich die Interferenzfigur bei Glühlicht im Vergleich zum Filterlicht?

5. Bestimmen Sie zusätzlich die Wellenlänge von Rot- und Blaufilterlicht und (oder) die Grenzen des Bereichs des sichtbaren Lichtes!

   - Zusatzversuch 1:
     Ordnen Sie alles wie beim Versuch 2! Schieben Sie jedoch in den Schiebeschacht des Blendrahmens ein durchsichtiges Lineal mit Millimeterteilung ein! Messen Sie jeweils den Abstand zwischen Mitte des Spaltbildes und Mitte des ersten hellen Streifens! (Genauer wird die Messung, wenn Sie den Abstand der beiden, das Spaltbild säumenden hellen Streifen messen und das Meßergebnis halbieren!) Halbe Millimeter schätzen! Tragen Sie die Meßwerte in die Zeilen 1 und 2 der vorbereiteten Tabelle ein!

   - Zusatzversuch 2:
     Die Durchführung erfolgt ähnlich wie im Zusatzversuch 1, jedoch wird ohne Farbfilter gearbeitet. Ermitteln Sie die Farbe und den Streifenabstand des inneren und äußeren Randes des ersten hellen Streifens zur Mitte des Spaltbildes! Tragen Sie die Ergebnisse in die Spalten 3 und 4 der Tabelle ein!

6. Berechnen Sie die Wellenlänge für Rot- und Blaufilterlicht oder (und) für die ermittelten Grenzfarben des sichtbaren Lichtes! Tragen Sie die Ergebnisse in die letzte Zeile der Tabelle ein!

[1] Welchen Einfluß übt die Gitterkonstante auf den Streifenabstand aus?

Versuchsprotokoll S 6

Beobachtung der Beugung des Lichts

Name: Klasse:

Aufgabe:

Zusammenhang von Streifenabstand und Lichtfarbe:

Zusammenhang von Streifenabstand und Gitterkonstante:
Je desto

Zusatzaufgabe:

Meßtabelle

Messung-Nr.	1	2	3	4
Lichtfarbe	Blau	Rot		
Entfernung Gitterbeobachtungsebene e in mm	500	500	500	500
Gitterkonstante b in mm	0,05	0,05	0,05	0,05
Streifenabstand s in mm				
Wellenlänge $\lambda = \frac{b \cdot s}{e}$ λ in mm				

Rotes Licht hat eine Wellenlänge von

Blaues Licht hat eine Wellenlänge von

Die Grenzen des sichtbaren Lichtes liegen zwischen

Lösungen

Kernphysik

17. $A_r = 24{,}33$

26. $\frac{1}{2^{10}} = \frac{1}{1024} = 0{,}000977 = 0{,}0977\,\%$

Schwingungen

44. $T = 0{,}00227$ s
48. $T = 0{,}137$ s
57. $T = 9{,}6$ s
60. $y = 0$
61. $l = 3{,}98$ m
64. $T = 16{,}41$ s
65. $l = 99{,}5$ cm
74. $\omega \approx 105\ s^{-1}$
    $T \approx 0{,}06$ s
75. $i_1 = 2{,}00$ A
    $i_2 = 1{,}73$ A
    $i_3 = 0{,}00$ A
    $i_4 = -2{,}00$ A
    $i_5 \approx -1{,}18$ A
    $i_6 = 2{,}00$ A
    $i_7 = -2{,}00$ A
    $i_8 = -2{,}00$ A
81. $P_s = 990$ VA
    $\cos\varphi = 0{,}500$
82. $I \approx 24$ A
83. $I_1 \approx 135$ A
    $I_2 = 81$ A
84. $I_2 = 2$ A
92. $\varphi = 0{,}76$
94. 36,7 : 1
95. a) $I \approx 680$ A
    b) $I = 395$ A
    c) $I = 395000$ A

Wellen

112. $\lambda = 1{,}7$ cm
113. $f = 442$ Hz
114. $\lambda_1 = 21{,}25$ m
     $\lambda_2 = 0{,}017$ m
115. $\lambda_1 = 1{,}7$ m
     $\lambda_2 = 0{,}226$ m
116. $\lambda = 375$ km
117. $s = 29$ m
124. $\lambda_1 = 1{,}77$ cm
     $\lambda_2 = 1{,}54$ cm
134. $t_1 \approx 5 \cdot 10^2$ s
     $t_2 \approx 1{,}27$ s
151. $T = 3{,}3\ \mu$s
154. $f = 185$ MHz
     (FS-Band III)
156. $\lambda = 287{,}5$ m
157. $\lambda_{max} = 2070$ m
     $\lambda_{min} = 39{,}5$ m
158. $C_{min} = 49{,}3$ pF
     $C_{max} = 444$ pF
159. $f = 3{,}57$ MHz
167. $s = 300$ km
168. $s = 384000$ km
169. $t = 140$ s

Register

Absorptions-
–linien 125
–spektrum 124, 125
Abstimmkreis 137
Amplitude 48
Antenne 136
Arbeit, elektrische 66
– im Wechselstromkreis 72
Atom 7
–hülle 7, 8, 116
–kern 7, 14, 16
–masse, absolute 9
––, relative 9
–modell 6
Ausbreitungsgeschwindigkeit 107, 132, 134

Beugung 105, 111
Blasenkammer 10, 13
Brechung 106, 110
Brechungsgesetz 109

Dämpfung 56
Dämpfungskraft 57
Demodulation 139
Dipol 129
Drehspulmeßgerät 67
Durchdringungs-
–fähigkeit 133
–vermögen 20, 22

Effektivwert des Wechselstroms 66
Eigenfrequenz 58, 90, 129
Einfallswinkel 107
Elektronen 8
–bewegung 117
Elementarteilchen 10
Elongation 48, 50, 100
Emissionsspektrum 124, 125
Empfänger 139, 140
Empfangsdipol 135
Energieniveau 117
–schema 8
Energie, elektromagnetische 130, 136
–, kinetische 46
–, mechanische 58
–, potentielle 46
–übertragung 97
–umwandlung 64, 128
Erregerfrequenz 58, 90

Federschwinger 45, 47
Feldenergie 135
Fernsehrundfunk 141
FRAUNHOFER 125
Frequenz 48, 134, 136
– des Wechselstroms 63
–einheit 49
–messung 60
Funkmeßtechnik 143
Funktionsmodell 45

Gaszentrifuge 18
Gesetz, dynamisches 24
–, statistisches 24
Gitter 113
Gleichstrom, Arbeit eines 66
–kreis 66
––, Leistung im 67
Größen, elektrische 61
Grundgleichung der Wellenausbreitung 103

Halbwertzeit 23, 30
Helligkeitsmaxima 112
–minima 112
HERTZ 49, 132
Hertzsche Wellen 132
Hochfrequenzerwärmung, induktive 93
–, kapazitive 93
HUYGENS 55, 111
Hypothese 111

Induktion 131
– einer Wechselspannung 64
induktiver Widerstand 69, 71
Induktivität 69
Interferenz 104, 105
–bild 112
Ionisierungsvermögen 20, 22
Isotope, radioaktive 23
Isotopentrennung 17

Kapazität 70
kapazitiver Widerstand 70, 71
Kern, instabiler 19, 38
–, isotoper 15
–fusion 36
–kraftwerk 41
–ladungszahl 9, 15
–modell 14, 38
–reaktor 34, 35
–spaltung 31, 39
–spurplatte 24
–umwandlung 29, 37
–zerfall, spontaner 20
Kettenreaktion 33
KIRCHHOFF 127
Kopplung 96
–, induktive 91
Korpuskulartheorie des Lichts 111
Kreis
–frequenz 50, 64
–welle 99
Kugelwelle 99

Leistung eines Wechselstroms 69
Leistungs
–faktor 74
–messer 68, 74
Licht, Beugung des 112
–emission 117
–, Entstehung des 116
–quellen 112
–strahl 108, 111
–, Wesen des 110
Linienspektrum 123

MARCONI 137
Massen
–einheit, atomare 9, 16
–spektrograf 17
–zahl 9, 15
MAXWELL 132

Mischelemente 16
Modell 97
Modulation 138
Momentanwert der Auslenkung 50
– der Wechselspannung 62
– der Wechselstromstärke 62

Nebelkammer 13, 25
Neutron 15, 25, 38
NEWTON 111, 127

Oberflächenwelle 99
Ordnungszahl 10

Pendelschwinger 47
–, Periode eines 55
Periode 48
Photon 117
POPOW 137
Positron 11, 31
Proton 14, 25, 38

Radaranlage 143
radioaktive Strahlung 19
Raumwelle 99
Reflexion 110, 133
Reflexionsgesetz 109
Reinelement 16
Resonanz 59, 137
–kurve 59
–verminderung 60
Röhrengenerator 92
Röntgenstrahlung 121, 145
RÖNTGEN 145
Rückkopplungsschaltung 92
Rundspul–Dreheisenmeßgerät 67

Schalenaufbau 9
Schall 114
–welle 98
Scheinleistung 74
Schwinger 45, 102
Schwingkreis 86
–, geschlossener 128
–, offener 128, 135
Schwingung 102
–, elektrische 61
–, elektromagnetische 61, 87, 91,129, 135
–, erzwungene 58, 90
–, freie 58
–, gedämpfte 56
–, harmonische 49, 61, 63
–, mechanische 44, 47
–, ungedämpfte 56
Schwingungsdauer 52
Seilwelle 98
Spalt 112
–bild 125
Spannungskurve 61
Spannungsübersetzung 78
Spektral
–farben 120
–analyse 126
Spektrum 119, 120
–, kontinuierliches 121, 123
Spontanzerfall 19
Strahlen 22
–schutz 28
Strahlung 22
–, radioaktive 19
–, ultrarote 121
–, ultraviolette 121
Stromstärke 66
–übersetzung 79
Stufendiffusion 17

Teilchen 20, 21
Telegrafie 138
Telefonie 138
Thermodiffusion 18
Thomsonsche Schwingungsgleichung 89
Tonfrequenzbereich 138
Tonrundfunk 141
Trägerfrequenz 138
Transformator 76
–, idealer 79
–, unbelasteter 78
–, Wirkungsgrad des 80

Überlagerungsprinzip 114
Umkehrpunkt 45

Verschiebung, zeitliche 72
Vorgang, zeitlich periodischer 63

Wasserwellen 98
Wechselfeld 88
–, elektrisches 128
–, elektromagnetisches 135
–, magnetische 128
Wechselspannung 64
–, Momentanwert der 62
Wechselstrom 61
–, Effektivwert des 66
–, Frequenz des 63
–generator 64
–kreis, Arbeit im 72
–, Leistung eines 69
–stärke 62
Welle 101, 102, 110
–, Definition einer 98
–, elektromagnetische 131
–, Hertzsche 132
–, lineare 99
–, mechanische 96
Wellen
–ausbreitung, Grundgleichung der 103
–, Brechung von 106
–frequenz 101
–front 101
–länge 101, 114, 132, 134
–theorie des Lichts 111
–, Überlagerung von 104
–zentrum 114
Wesen des Lichts 110, 114
Widerstand, induktiver 69, 71
–, kapazitiver 70, 71
–, ohmscher 68, 71
Wirkleistung 74
Wirkungsgrad des Transformators 80

YOUNG 127

Zählrohr 13
Zungenfrequenzmesser 66

CERN, Genf: 10/2 · Demme, Berlin: 146/1 · Deutsche Fotothek Dresden: 148/1 · Deutscher, Berlin: 132/3 · VEB DMR, Rostock: 27/1 · Ende, Jena: 57/7 · Fey, Berlin: 75/1 · VEB Funkwerk Erfurt: 43/1 · Golm, Berlin: 153/1 · Institut für Denkmalpflege – Außenstelle Halle: 148/2 · Klöppel, NVA: 108/1, 122/2 · Meyer, Berlin: 75/2 · Nationale Forschungs- und Gedenkstätten Weimar: 119/1 · Nixdorf, Berlin: 81/4 · Pritsche, Dresden: 19/5 · Schmidt, Berlin: 96/1 · Dr. Schmidt, Leipzig: 25/1 · Seidel, Karl-Marx-Stadt: 126/1 · Strohbusch, Potsdam: 127/1 · v. d. Tann, Thalheim: 62/2 · VEB Transformatoren- und Röntgenwerk, Dresden: 149/1 · Uhlenhut, NVA: 130/1 · Volk und Wissen, Archiv: 6/1, 19/1, 26/3, 27/3, 29/1, 38/1, 39/1, 39/2, 57/1, 57/3, 60/2, 61/1, 76/1, 76/2, 82/1, 93/1, 103/2, 103/3, 104/1, 106/1, 106/3, 113/1, 113/2, 122/1, 132/5, 148/2, 148/3, 151/1 · Volk und Wissen, Seifert: 30/1, 44/1, 57/5, 81/1, 81/5, 122/4, 132/1, 132/2, 148/1 · Zentralbild: 5/1, 11/2, 12/1, 14/1, 26/1, 34/1, 37/1, 37/2, 41/1, 42/1, 60/3, 61/1, 93/2, 95/1, 114/1, 114/2, 132/3, 133/1 · ZIS, Halle: 122/3.

Reproduktionen aus: Schpolski, Atomphysik Bd. II Deutscher Verlag der Wissenschaften: 21/1, 21/2, 25/4, 32/1.

Julius Robert Mayer

geboren am 25. 11. 1814 in Heilbronn, verstorben am 20. 3. 1878 in Heilbronn; untersuchte als Schiffsarzt in den Tropen den Zusammenhang zwischen Wärme und mechanischer Energie; formulierte den Satz von der Erhaltung der Energie.

James Clerk Maxwell

geboren am 13. 6. 1831 in Edinburgh, verstorben am 5. 11. 1879 in Cambridge; entwickelte die Theorie des elektrischen Feldes; sagte das Vorhandensein elektromagnetischer Wellen voraus; deutete das Licht als elektromagnetische Welle.

Heinrich Rudolf Hertz

geboren am 22. 2. 1857 in Hamburg, verstorben am 1. 1. 1894 in Bonn; entdeckte die vorausgesagten elektromagnetischen Erscheinungen; bewies die Übereinstimmung der Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen mit den Eigenschaften des Lichts.

Max Planck

geboren am 23. 4. 1858 in Kiel, verstorben am 4. 10 1947 in Göttingen; brachte den 2. Hauptsatz der Thermodynamik in allgemeingültige Form; entdeckte das Wirkungsquantum als Naturkonstante, Beitrag zur Quantentheorie des Lichts.

Otto Hahn

geboren am 8. 3. 1879 in Frankfurt (Main), verstorben am 28. 7. 1968 in Göttingen; entdeckte mehrere radioaktive Elemente und 1938 die Kernspaltung; verpflichtete sich 1957, an der Herstellung von Atomwaffen nicht mitzuwirken.

Albert Einstein

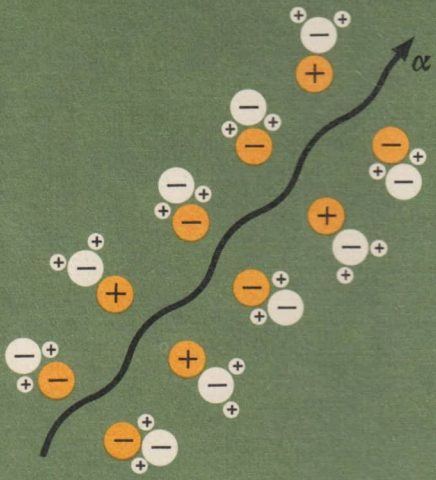
geboren am 14. 3. 1879 in Ulm, verstorben am 18. 4. 1955 in Princeton; entdeckte die atomistische Struktur der Strahlung; schuf die Quantentheorie des Lichts; schuf die allgemeine und die spezielle Relativitätstheorie.

Niels Bohr

geboren am 7. 10. 1885 in Kopenhagen, verstorben am 18. 11. 1962 in Carlsberg; erklärte 1913 das Wasserstoffspektrum; entwarf 1920 das Bohrsche Atommodell; entwickelte eine Theorie zur Voraussage noch unbekannter Elemente.

Frederic Joliot-Curie

geboren am 19. 3. 1900 in Paris, verstorben am 14. 8. 1958 in St. Antoine; entwickelte Verfahren zum Messen der Halbwertzeiten; entdeckte die künstliche Radioaktivität; baute 1948 einen Kernreaktor; seit 1949 Präsident des Weltfriedensrates.



Kurzwort: 02 10 03 Lehrb. Physik Kl 10
Schulpreis DDR: 2,70