PHYSIK 10

Vorbereitungsklassen



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;
Entdecker vieler Erscheinungen,
die beweisen, daß
die Erde ein Planet ist;
untersuchte als erster
experimentell den freien Fall.

Christian Huygens

geboren am 14. 4. 1629 in Den Haag,
verstorben am 8. 7. 1695
in 's Gravenhage;
Erfinder der Pendeluhr (1657);
untersuchte die Pendel-
schwingungen, entdeckte die
Gesetzmäßigkeit der Resonanz
(1665) und des Stoßes
elastischer Körper;
schuf eine grundsätzliche
Theorie der Wellenlehre
und die Modellvorstellung
von den Elementarwellen.



Isaak Newton



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

Charles Augustin Coulomb

geboren am 11. 6. 1736 in
Angoulême, verstorben am
23. 8. 1806 in Paris;
verfaßte eine Abhandlung über die
Theorie der einfachen Maschinen;
konstruierte die Torsionswaage;
untersuchte die Elastizität und
Torsionskraft von Metallfäden;
entdeckte 1785
das elektrische Grundgesetz,
das Coulombsche Gesetz,
und untersuchte
den Magnetismus.



André Marie Ampère



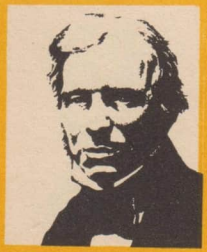
geboren am 22. 1. 1775 in Lyon,
verstorben am 10. 6. 1836
in Marseille;
Begründer der Elektrodynamik,
entdeckte die Wirkung
von stromdurchflossenen
Leitern aufeinander;
führte die Begriffe Spannung
und Strom
(heute Stromstärke) ein
und baute das Galvanometer.
Er war Professor
für Mathematik und für Physik.

Hans Christian Oersted

geboren am 14. 8. 1777
in Rudkjöbing, verstorben
am 9. 3. 1851 in Kopenhagen;
untersuchte seit 1812 die
Beziehungen zwischen
Elektrizität und Magnetismus
und entdeckte 1820
den Elektromagnetismus;
stellte erstmals Chloraluminium
dar; gründete im Jahre 1829
Dänemarks Technische Hochschule
und die Polytechnische
Hochschule.



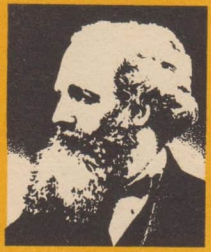
Michael Faraday



geboren am 22. 9. 1791 in
Newington Butts bei London,
verstorben am 25. 8. 1867
in Hampton Court.
Er begründete die Lehre
von den elektrischen und
magnetischen Feldern,
schuf die Modellvorstellung
von den Feldlinien und
entdeckte 1831 die
elektromagnetische Induktion;
1833 beschrieb er die
Gesetze der Elektrolyse.

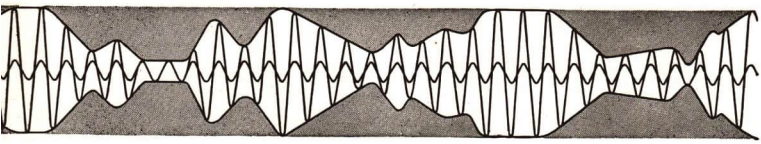
James Clerk Maxwell

geboren am 13. 6. 1831 in
Edinburgh, verstorben am
5. 11. 1879 in Cambridge;
ersetzte die Modellvorstellung
Faradays von den
elektrischen Kraftlinien
durch die Theorie
des elektrischen Feldes,
sagte das Vorhandensein
elektromagnetischer Wellen
voraus und deutete
das Licht als
elektromagnetische Welle.



PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 10 · Vorbereitungsklassen



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin

1968

An der Entwicklung des Schulbuches waren beteiligt:

Werner Golm · Günter Meyer (Mechanische Schwingungen und Wellen)

Dr. Wolfgang Manthei (Elektrischer Wechselstrom)

Dr. Helmut Mucke (Schwingkreis, Hertzsche Wellen)

Dr. Rudolf Plötz (Strahlenoptik und Lichtwellen)

Bei der Bearbeitung einzelner Textstellen wurden die bisher erschienenen Lehrbücher des Verlages zugrunde gelegt.

Vom Ministerium für Volksbildung der
Deutschen Demokratischen Republik
als Schulbuch bestätigt

1. Auflage — Ausgabe 1968
Lizenz-Nr. 203 · 1000/68 · ES 11 H
Redaktion: Werner Golm · Günter Meyer
Einband und Vorsatz: Manfred Behrend
Technische Zeichnungen: Ingrid Schäfer
Illustrationen: Fritz Hampel
Herstellung: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig (III/18/203)
Gesetzt aus der Bodoni-Antiqua
Redaktionsschluß: 15. 1. 1968
Bestell-Nr. 02 10 60-1 · Preis 3,00

Inhaltsverzeichnis

Mechanische Schwingungen und Wellen

Grundbegriffe der Schwingungslehre 8

Mechanische Schwingungen 8 – Der mechanische Schwinger 9 – Die harmonische Schwingung 9 – Die Kenngrößen einer Schwingung 10 – Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen 11 – Anwendungsbeispiele zur Dämpfung 13 – Die Schwingungsdauer einer harmonischen Schwingung 14 – Die Gleichung der harmonischen Schwingung 15 – Die grafische Darstellung einer Schwingung 16 – Das Übertragen von Schwingungen 17 – Die Resonanz 17 – Anwendungsbeispiele zu Schwingungen 18

Grundbegriffe der Wellenlehre 19

Die mechanische Kopplung 19 – Wellenarten 20 – Die Kenngrößen einer mechanischen Welle 22 – Die grafische Darstellung von Wellen 23 – Das Gesetz der Wellenausbreitung 25 – Die Überlagerung von mechanischen Wellen 26 – Das Huygenssche Prinzip 27 – Reflexion einer Welle 28 – Brechung einer Welle 29 – Stehende Wellen 31 – Reflexion einer fortschreitenden Welle 31 – Stehende Querwellen 32 – Vergleich mechanischer Schwingung und mechanischer Welle 33 – Anwendungsbeispiele zu Wellen 34

Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Elektrische Schwingungen 36

Die Wechselstromkurven 36 – Der harmonische Wechselstrom 37 – Kenngrößen des Wechselstroms 39 – Wechselstrommaschinen 40 – Kollektorgleichrichter 41 – Gleichstrommaschinen 42 – Die Effektivwerte des Wechselstroms 43 – Die Wechselstromwiderstände 44 – Der Ohmsche Widerstand 44 – Der kapazitive Widerstand 45 – Der induktive Widerstand 46 – Arbeit und Leistung des Wechselstroms 48 – Der Transformator 52 – Aufbau und Wirkungsweise des Transformators 52 – Der ideale Transformator 53 – Spannungsübersetzung 53 – Stromstärkeübersetzung 54 – Der Wirkungsgrad des Transformators 55–

Anwendungsbeispiele zum Transformator 56 – Verbundsystem der sozialistischen Staaten 57 – Elektrifizierung und Volkswirtschaft 58 – Wechselstrom und Gleichstrom 59 – Der elektrische Schwingkreis 60 – Elektrische Vorgänge im Schwingkreis 60 – Elektrische und magnetische Feldenergie 62 – Die gedämpfte elektrische Schwingung 62 – Die ungedämpfte elektrische Schwingung 63 – Frequenz eines Schwingkreises 64 – Der Rückkopplungs-Röhrengenerator 65

Die Hertzschen Wellen 67

Das Entstehen Hertzscher Wellen 67 – Empfang Hertzscher Wellen 69 – Eigenschaften und Ausbreitung Hertzscher Wellen 71 – Abschirmung 71 – Reflexion 72 – Brechung 72 – Ausbreitungsgeschwindigkeit 72 – Der Höchstfrequenzgenerator 73 – Die Wellenbereiche 74

Die drahtlose Nachrichtenübermittlung 75

Die Modulation 75 – Aufbau eines Senders 77 – Die Demodulation 77 – Aufbau eines Empfängers 79 – Amateurfunk 80 – Anwendungsbeispiele zur Nachrichtenübermittlung 81 – Maxwell, Hertz und Popow als Wissenschaftler 82

Strahlen- und Wellenoptik 84

Brechung und Reflexion

Die Brechung des Lichtes 84 – Das Brechungsgesetz 85 – Das Verhältnis der Winkel 86 – Die Brechungszahl 86 – Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten 87 – Diskussion des Brechungsgesetzes 88 – Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte 89 – Lichtdurchgang durch ein optisches Prisma 89 – Die Totalreflexion 89 – Anwendungsbeispiele zur Reflexion und Brechung 91

Lichtbrechung an optischen Linsen 92

Kenngrößen optischer Linsen 92 – Die Bildentstehung 93 – Die Abbildungsgleichung für dünne Linsen 94 – Gültigkeitsbereich der Linsengleichung 95 – Optische Geräte 96 – Mikroskop 97 – Fernrohr 97

Die Dispersion des Lichts 98

Die Spektralfarben 98 – Kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum 99 – Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum 100 – Die Spektralanalyse 101

Das Licht als elektromagnetische Welle 102

Unterschiede zwischen Gitter- und Prismenspektren 103 – Die Welleneigenschaften des Lichts 104

Die Röntgenwellen 105

Das Erscheinungsbild der Röntgenwellen 105 – Das Entstehen der Röntgenwellen 106 – Das Wesen der Röntgenwellen 106 – Das elektromagnetische Spektrum 107

Aufgaben

Fragen und Aufträge 110

Versuche 116

Schülerexperimente 119

Lösungen 134

Register 135

Verwendete Symbole

● **Fragen**

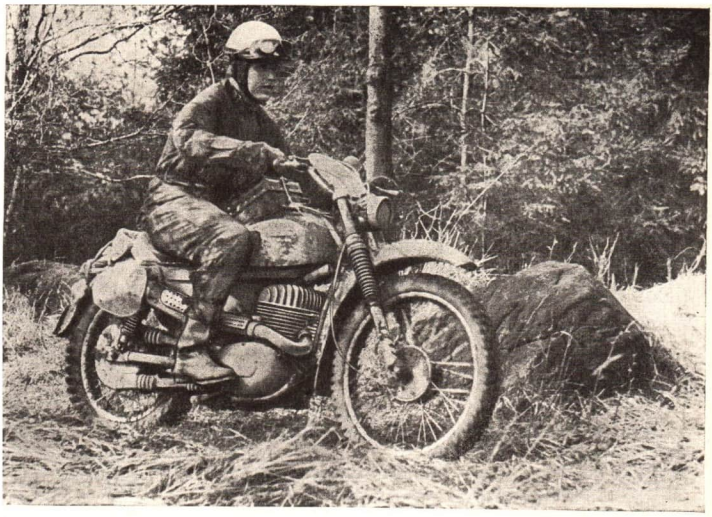
▼ **Versuche**

■ **Beispiele**

▷ **Einfache Merksätze**

▶ **Merksätze mit besonderer Bedeutung**

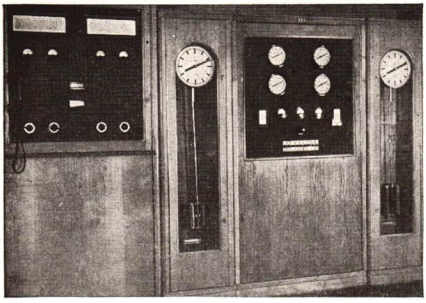
Im Abschnitt Aufgaben sind die Nummern der Fragen und Aufträge fett gedruckt, für die eine Lösung angegeben ist; Aufträge mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad sind durch einen Stern gekennzeichnet.



Mechanische Schwingungen und Wellen

Die Motorräder aus dem VEB Motorradwerke Zschopau werden in vielen Fahrstunden auf schwierigen Fahrstrecken erprobt, um die international bewährte Leistungsfähigkeit und das Zusammenwirken aller Teile ständig zu verbessern. An solchen Teilen treten oft besondere Bewegungsformen auf. An den Federbeinen sind es gedämpfte Schwingungen, am Kolben und dem Kurbelwellenzapfen sind es erzwungene Schwingungen, im Zylinder und im Auspuff gibt es Druck- und Schallwellen, und am Rahmen treten Resonanzschwingungen auf.

Diese Erscheinungen sind mechanische Schwingungen und Wellen, deren besondere Bewegungsformen im folgenden Kapitel untersucht werden. Viele der dabei erarbeiteten grundsätzlichen Begriffe gelten aber auch allgemein für Schwingungen und Wellen, wie sie zum Beispiel nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrizitätslehre und in der Optik untersucht werden.



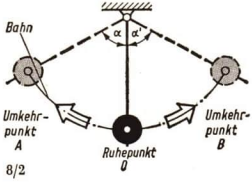
Grundbegriffe der Schwingungslehre

Die Zeitmessung ist die Grundlage vieler physikalischer Untersuchungen. Mechanische Uhren, die eine sehr genaue Zeitmessung ermöglichen, gibt es erst, seitdem durch Benutzen des Pendels für einen genauen Gang gesorgt wurde. Das Uhrenpendel hat eine besondere Bewegungsform: es führt eine mechanische Schwingung aus.

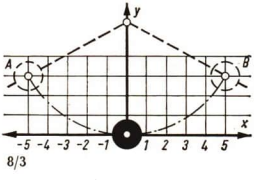
Mechanische Schwingungen

Wenn man den Bewegungsablauf eines Pendelschwingers (Bild 8/2) untersucht, stellt man fest:

1. Der Pendelkörper schwingt um seinen Ruhepunkt und durchläuft eine Bahn zwischen zwei Umkehrpunkten.
2. Der Pendelkörper erreicht die Umkehrpunkte bzw. geht in gleicher Richtung durch den Ruhepunkt in jeweils gleichen Zeitabständen; dieser Vorgang erfolgt also **periodisch.**
3. Die **Ortskoordinaten** des Pendelkörpers werden *periodisch verändert* (Bild 8/3).
4. Der **Auslenkwinkel** α wird *periodisch verändert.*
5. Die **Geschwindigkeit** des Pendelkörpers wird *periodisch verändert* (Bild 8/4).



8/2



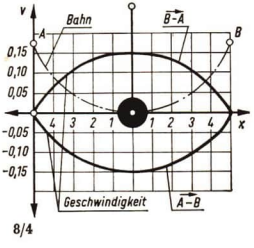
8/3

● *Beschreiben Sie die Veränderung der Geschwindigkeit des Pendelkörpers bei einer Schwingung nach Bild 8/3!*

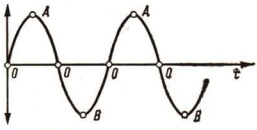
Der Pendelschwinger, der Ort mit seinen Koordinaten, der Auslenkwinkel und die Geschwindigkeit sind Begriffe aus der Mechanik, deshalb bezeichnet man den in den Bildern 8/2 bis 8/4 dargestellten Vorgang als **mechanische Schwingung.**

▶ **Die zeitlich periodische Änderung einer mechanischen Größe bezeichnet man als mechanische Schwingung.**

Jeder Vorgang, bei dem sich eine beliebige physikalische Größe periodisch ändert, wird dementsprechend ebenfalls als Schwingung aufgefaßt.



8/4

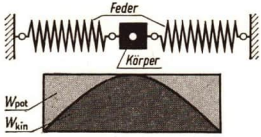


9/1 Weg-Zeit-Diagramm einer Schwingung

In den weiteren Abschnitten wird im wesentlichen die periodische Änderung des Abstandes eines schwingenden Körpers von seinem Ruhepunkt behandelt.
Zeichnet man für solch eine Schwingung die Ortskoordinaten y des Pendelkörpers in Abhängigkeit von der Zeit t auf, dann erhält man eine Kurve wie in Bild 9/1.

Versuch 1, S. 116

Der mechanische Schwinger

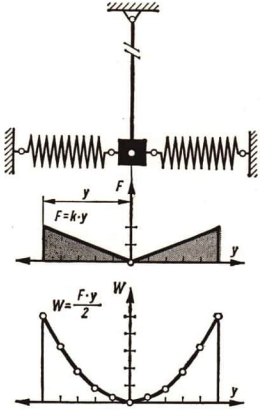


9/2 Der ausgelenkte Körper eines Federschwingers ändert durch eine rücktreibende Kraft an den Umkehrpunkten seine Richtung und wird durch die Trägheit der Masse des Körpers über seinen Ruhepunkt hinwegbewegt

Der Körper eines Federschwingers (Bild 9/2) wird nach links gezogen; er wird ausgelenkt. Die hierfür aufzuwendende Kraft hängt von der Auslenkung des Körpers vom Ruhepunkt ab; sie wächst mit zunehmender Entfernung.
Die zum Spannen der Feder aufgewandte Arbeit ist als potentielle Energie W_{pot} in der Feder 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 der Masse 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, bis der Pendelkörper endgültig in seine Ruhelage zurückgekehrt ist.

Die Energie wird zwischen zwei gekoppelten Energiespeichern ständig ausgetauscht. Energiespeicher sind beim:
Federschwinger: Körper und Feder,
Pendelschwinger: Körper und Erde.

Ein mechanischer Schwinger schwingt, wenn er durch Energiezufuhr aus seinem statischen Gleichgewicht gebracht wird.



9/3 Federkraft F und Federenergie W sind beim Federschwinger direkt proportional der Auslenkung y bzw. dem Quadrat der Auslenkung

Die harmonische Schwingung

Nach dem Hookeschen Gesetz ist bei einer gespannten Feder die Dehnung – sie ist gleich der Auslenkung des Körpers – proportional der wirkenden Kraft.
Mit zunehmender Auslenkung des Körpers wächst also auch die Federkraft (Kl. 9), die den Körper zum Ruhepunkt zurücktreibt. Es gilt für die Federkraft:

$$\vec{F} = -k \cdot \vec{y}.$$

Schwingungen, bei denen die rücktreibende Kraft als periodisch veränderliche Größe der Auslenkung des Körpers proportional ist, werden *harmonische Schwingungen* genannt. Für den Betrag der Federkraft gilt

$$F = k \cdot y.$$

■ **Eine Feder wird durch die Kraft 200 p um 5 cm gedehnt. Bestimmen Sie die Federkonstante!**

Gegeben:
$y = 5\ \text{cm}$
$F = 200\ \text{p}$

Gesucht:
k

Lösung:

$$k = \frac{F}{y}$$

$$k = \frac{200\ \text{p}}{5\ \text{cm}}$$

$$k = 40\ \text{p} \cdot \text{cm}^{-1}$$

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

$$40\ \text{p} \cdot \text{cm}^{-1} = 0{,}04 \cdot 9{,}81\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$40\ \text{p} \cdot \text{cm}^{-1} \approx 0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$$

■ **Wie groß ist der Betrag der Federkraft, wenn der Körper des Federschwingers um 2 cm von seinem Ruhepunkt entfernt wird?**

Gegeben:
$y = 2\ \text{cm}$
$k \approx 0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$

Gesucht:
F

Lösung:

$$F = k \cdot y$$

$$F \approx 0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot 2\ \text{cm}$$

$$F \approx 0{,}8\ \text{N}$$

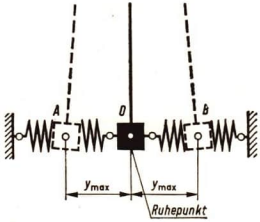
Die Kenngrößen einer Schwingung

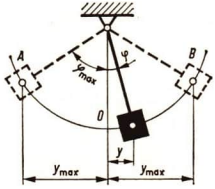
Für die Beschreibung der in diesem Abschnitt behandelten besonderen Form einer *mechanischen* Schwingung sind bestimmte charakteristische Angaben notwendig.
Man bezeichnet sie als **Kenngrößen.**

Kenngröße	Formelzeichen	Merkmal	Beziehungen
Elongation oder **Auslenkung**	y	Momentanwert der schwingenden physikalischen Größe	—
Amplitude oder **Schwingungsweite**	y_{max}	Maximalwert der schwingenden physikalischen Größe	—
Periode oder **Schwingungsdauer**	T	Zeitdauer einer vollen Schwingung, d. h. eines vollständigen Hin- und Herganges[1]	$T = \frac{t}{n}$ $T = \frac{1}{f}$
Frequenz oder **Schwingungsanzahl**	f	Quotient aus einer Anzahl von Schwingungen und der dazugehörigen Zeit	$f = \frac{n}{t}$ $f = \frac{1}{T}$
Kreisfrequenz[2]	ω		$\omega = 2\pi \cdot f$
Phasenwinkel	φ	Winkel, der in der Zeit t überstrichen wird	$\varphi = \omega \cdot t$

10/1 Kenngrößen einer Schwingung

[1] n: Beliebige Anzahl von Schwingungen; t: dazugehörige Zeit
[2] Kreisfrequenz: siehe harmonische Schwingung, S. 15





11/1 Kenngrößen am horizontalen Federschwinger und am Pendelschwinger

Einige Kenngrößen sollen am Beispiel der Ortskoordinaten eines Federschwingers erläutert werden (Bild 11/2).

Zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet sich der Schwerpunkt des Körpers 2 cm oberhalb seines Ruhepunktes. Der Abstand vom Ruhepunkt aus nach oben hat ein positives, nach unten ein negatives Vorzeichen. Im genannten Beispiel beträgt die Elogation +2 cm. Der größte Abstand, den der Körper vom Ruhepunkt erreicht, die Amplitude, beträgt 5 cm.

Geht der Körper des Federschwingers nach der Zeit T in der gleichen Richtung durch den gleichen Punkt, so sagt man, er hat die gleiche Phase wie zum ersten Beobachtungszeitpunkt. Führt der Federschwinger in der Zeit von 40 s insgesamt 50 Schwingungen aus, so ergibt sich die Periode:

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

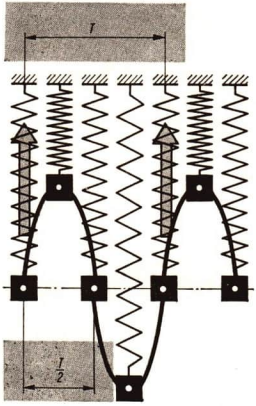
Das gewählte Zahlenbeispiel ergibt eine Frequenz von :

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

Zu Ehren des Physikers HERTZ (S. 83) 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).



11/2 Gleichgerichteter Durchgang des Körperschwerpunktes durch einen bestimmten Punkt der Bahn

Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen

Die in einem Schwinger gespeicherte Energie wird während der Schwingungen fortwährend umgewandelt. Soll der Schwinger stets die gleichen Umkehrpunkte erreichen, so muß bei jeder Einzelschwingung die gleiche mechanische Gesamtenergie zur Verfügung stehen und umgewandelt werden.

Schwingungen, deren Amplituden gleichbleiben, heißen ungedämpfte Schwingungen ◁

Wirken auf einen Schwinger Kräfte ein, die der Geschwindigkeit entgegengerichtet sind, dann verringern sich Schwingungsenergie und Amplitude.

Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, heißen gedämpfte Schwingungen. ◁

Wodurch wird die mechanische Energie eines gedämpft schwingenden Körpers umgewandelt?

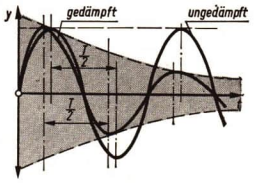
Der Betrag der Dämpfungskraft hat wesentlichen Einfluß auf den Schwingungsverlauf, wie man einem Versuch nach Bild 12/2 entnehmen kann.

2 ▼ Befindet sich der Pendelschwinger vollständig in Luft, so ist die Dämpfungskraft gering. Die Amplitude nimmt nur langsam ab
3 (Bild 12/3a).

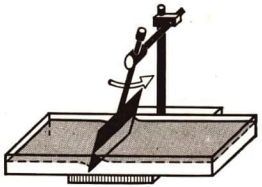
▼ Die Dämpfungsscheibe taucht vollständig in die Flüssigkeit ein. Die Dämpfungskraft ist sehr groß. Der ausgelenkte Pendelschwinger kehrt nur langsam zum Ruhepunkt zurück, ohne über diesen hinauszuschwingen.

Man bezeichnet diese in Versuch 3 beobachtete Bewegung **als aperiodisch.** Es kommt keine Schwingung mehr zustande (Bild 12/3b). Infolge der quantitativen Änderung einer Größe, nämlich der Dämpfungskraft, wird ein physikalischer Vorgang durch einen anderen physikalischen Vorgang ersetzt.

Bei einer mittleren Dämpfung, wenn die Dämpfungsscheibe zum Teil in die Flüssigkeit eintaucht, erfolgt die aperiodische Rückkehr zum Ruhepunkt am schnellsten. Man spricht dann vom **aperiodischen Grenzfall** (Bild 12/3c).



12/1 Ungedämpfte und gedämpfte Schwingung



12/2 Pendelschwinger mit Dämpfungsscheibe

■ Wie groß ist die Amplitude einer gedämpften Schwingung, wenn – wie im Beispiel auf Seite 10 – eine über den gesamten Weg eines schwingenden Körpers gleichbleibende Dämpfungskraft von $F_D = 0{,}02$ N der Federkraft $F = 0{,}8$ N entgegenwirkt?
Nach welcher Strecke y_1 ist die Gleichgewichtslage erreicht, und wie weit wird der Körper nach der anderen Seite (y_2) ausgelenkt?

Gegeben:

$F = 0{,}8$ N
$F_D = 0{,}02$ N
$k = 0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$

Gesucht:

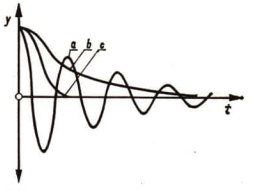
y_1 und y_2

Lösung:

$$y_1 = \frac{F - F_D}{k} \qquad y_2 = \frac{(F - F_D) - F_D}{k}$$

$$y_1 = \frac{0{,}8\ \text{N} - 0{,}02\ \text{N}}{0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}} \qquad y_2 = \frac{0{,}78\ \text{N} - 0{,}02\ \text{N}}{0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}}$$

$y_1 = 1{,}95$ cm $\qquad y_2 = 1{,}90$ cm



12/3

■ Wieviel Schwingungen führt der Schwinger unter diesen Bedingungen aus, bis er zur Ruhe kommt?

Gegeben:

$y_{max} = 2$ cm
$F = 0{,}8$ N
$F_D = 0{,}02$ N
$k = 0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$

Gesucht:

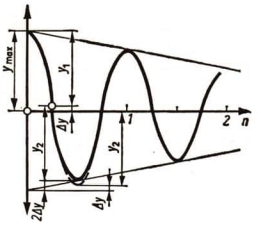
y_4
n

Lösung:

$$y_4 = \frac{F - n \cdot F_D}{k} \qquad n = \frac{y_{max}}{y_{max} - y_4}$$

$$y_4 = \frac{0{,}8\ \text{N} - 4 \cdot 0{,}02\ \text{N}}{0{,}4\ \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}} \qquad n = \frac{2\ \text{cm}}{0{,}2\ \text{cm}}$$

$y_4 = 1{,}8$ cm $\qquad n = 10$



12/4

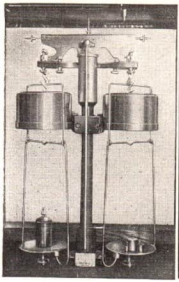
Anwendungsbeispiele zur Dämpfung

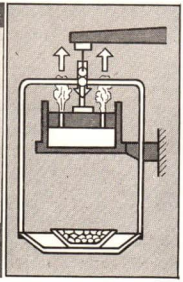
Analysenwaage. Um ein langwährendes Schwingen des Waagebalkens zu vermeiden, werden die Schwingungen gedämpft. Die Dämpfungskraft wird durch den Widerstand beim Durchströmen der Luft durch die kleinen Öffnungen im Kolben hervorgerufen.

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

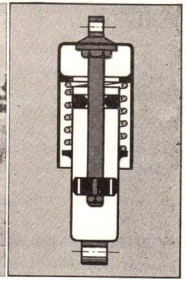
Türschließer. Damit das Schließen einer Tür nicht schlagartig erfolgt, wirkt eine hydraulische Dämpfung.
Welcher Sonderfall einer Schwingung wird hierbei erreicht?

Meßgerät. Die Anzeige durch den Zeiger soll möglichst schwingungsfrei erfolgen; eine Luftdämpfung gewährleistet dies. Zeichnen Sie das Winkel-Zeit-Diagramm des Zeigerausschlages bei starker und bei schwacher Dämpfung!

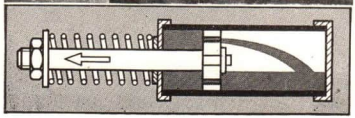


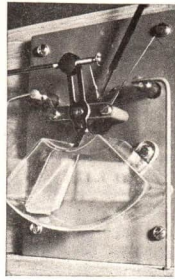


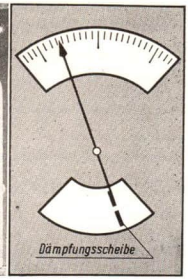












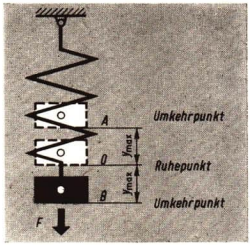
Die Schwingungsdauer einer harmonischen Schwingung

Ein Federschwinger, dessen Federkonstante k bekannt ist (↗ S. 9), wird durch eine Kraft F auf die Amplitude y_{max} ausgelenkt (Bild 14/1).
Die im Umkehrpunkt wirkende Federkraft ist dann

$$F = k \cdot y_{max}.$$

Die zur Dehnung der Feder durch die Kraft F aufgewendete Arbeit beträgt (↗ S. 9) in den Punkten A und B

$$W_{pot} = \frac{F}{2} \cdot y \text{ oder } W_{pot} = \frac{k \cdot y^2}{2}.$$



14/1

Wenn der Körper des Federschwingers durch den Ruhepunkt geht, ist die potentielle Energie der Feder vollständig in kinetische Energie der schwingenden Masse umgewandelt:

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}.$$

Die Geschwindigkeit v (↗ S. 15) ist im Ruhepunkt

$$v = 2\pi \cdot y \cdot f.$$

Nach Gleichsetzen der beiden Gleichungen erhalten wir damit die Gleichung für die

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{k \cdot y^2}{2}$$

▶ **Frequenz eines Federschwingers** und die

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

▶ **Periode eines Federschwingers**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Die Abhängigkeit der Periode T eines Federschwingers von der Masse m des Schwingkörpers $T \sim \sqrt{m}$

und von der Federkonstante k $T \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$ wird im Schülerexperiment M 1 bestätigt.

Schülerexperiment M 1, S. 120
Schülerexperiment M 2, S. 122

Beim Pendelschwinger (Bild 14/2) gelten die Gleichungen für die

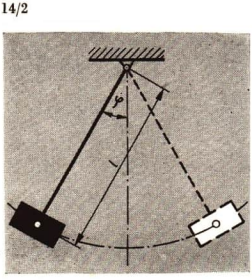
▶ **Frequenz eines Pendelschwingers** und die

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

▶ **Periode eines Pendelschwingers**

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

14/2



Die Abhängigkeit der Schwingungsdauer T eines Pendelschwingers von der Länge l, $T \sim \sqrt{l}$, bestätigen Sie im Schülerexperiment M 2.
Diese Gleichungen gelten aber nur für kleine Pendelausschläge mit einem Winkel $\varphi < 5°$!

Errechnen Sie für den auf S. 10 beschriebenen Federschwinger die Schwingungsdauer! ■

Gegeben: $k = 0{,}4\ \mathrm{N \cdot cm^{-1}} = 40\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$

$m = 0{,}2\ \mathrm{kg}$

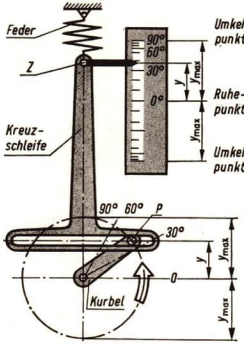
Gesucht: T

Lösung: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

$T = 2\pi\sqrt{\frac{0{,}2\ \mathrm{kg}}{40\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}}}$

$T \approx 0{,}44\ \mathrm{s}$

Die Gleichung der harmonischen Schwingung



15/1

Ein für technische und mathematische Zwecke wichtiges Getriebe ist die Kreuzschleife (Bild 15/1).
Bei einer Drehung der Kurbel führt die Kreuzschleife eine geradlinige Bewegung aus. Die vom Punkt P der Kurbel und vom Zeiger Z in der Zeit t zurückgelegten Wege y sind gleich. Die Kreuzschleife mit dem Zeiger Z führt eine harmonische Schwingung aus; denn die auf die Kreuzschleife zurückwirkende Federkraft ist proportional dem Abstand des Zeigers vom Ruhepunkt und gegen den Ruhepunkt gerichtet. Nach der Definition für den Sinus eines Winkels kann man den Weg y (Bild 15/2) errechnen:

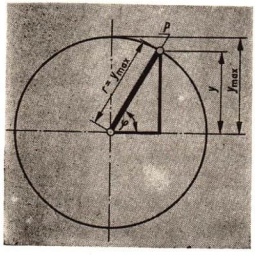
$$y = y_{max} \cdot \sin\varphi.$$

Es ist zu untersuchen, mit welchen Größen der Kreisbewegung des Punktes P eine Beziehung zur harmonischen Schwingung des Zeigers Z hergestellt werden kann.
Die Kurbel vollführt einen vollen Umlauf in der Zeit T. Der dabei überstrichene Winkel beträgt im Bogenmaß 2π. Während der Zeit t wird der Winkel φ überstrichen. Es gilt die Proportion:

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

$$\varphi = \frac{2\pi}{T}t.$$

15/2



Den Ausdruck $\frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f = \omega$ bezeichnet man als **Kreisfrequenz.**
Setzt man in die Gleichung für die Elongation

$$y = y_{max} \cdot \sin\varphi$$

die für φ hergeleitete Beziehung aus der harmonischen Schwingung ein, so erhält man die Gleichung für die

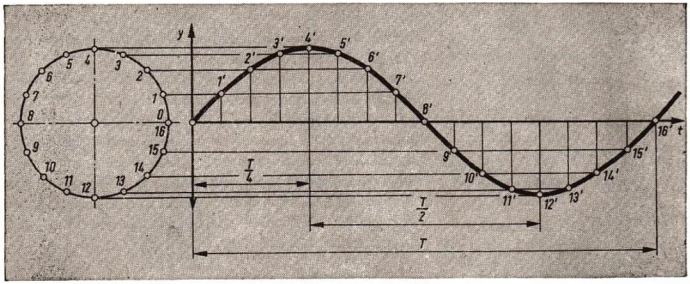
Elongation bei harmonischer Schwingung $\quad y = y_{max} \cdot \sin\omega \cdot t$ ◀

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

Die grafische Darstellung einer Schwingung

Von der Kreisbewegung des Punktes P der Kurbel (Bild 15/1) läßt sich die grafische Darstellung einer harmonischen Schwingung ableiten; diese ergibt eine Sinuskurve.

Man zeichnet einen Kreis mit der Amplitude y_{max} als Radius und teilt seinen Umfang in gleiche Abschnitte (Bild 16/1). Der waagerechte Durchmesser des Kreises wird verlängert und dient als Zeitachse.



16/1

Senkrecht dazu werden die Elongationen für verschiedene Zeitpunkte abgetragen. Die Strecke vom Ursprung 0 bis T wird gleich dem Kreisumfang $2\pi \cdot y_{max}$ gewählt.
Die grafische Darstellung ergibt ein Weg-Zeit-Diagramm. Damit ist nun auch die Aufzeichnung einer Schwingung nach Bild 9/1 begründet.

● *Prüfen Sie nochmals das Ergebnis der Übung 1 (S. 9)!*

■ Welche Elongation besitzt ein Federschwinger mit der Frequenz $f = 2$ Hz und der Amplitude $y_{max} = 3$ cm zum Zeitpunkt $t = 4$ s? Zum Zeitpunkt $t = 0$ sei die Elongation $y = 0$. Die Schwingung soll harmonisch sein.

Gegeben:	*Lösung:*
$f = 2$ Hz $= 2\ s^{-1}$	$y = y_{max} \cdot \sin \omega \cdot t$
$y_{max} = 3$ cm	$y = y_{max} \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t$
$t = 4$ s	$y = 3$ cm $\cdot \sin 2\pi \cdot 2\ s^{-1} \cdot 4$ s
Gesucht:	$y = 3$ cm $\cdot \sin 16\pi$
y	

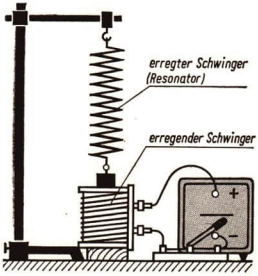
Der Sinus des Winkels 16π ist Null, so daß die Elongation zum angegebenen Zeitpunkt ebenfalls Null ist.

Fragen und Aufträge 1 bis 37, S. 110
Versuche 1 bis 13, S. 116

Das Übertragen von Schwingungen

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 Federbeschaffenheit, Dämpfung und Masse des Schwingers.

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

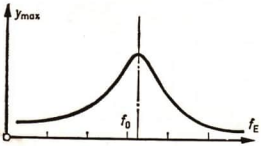


17/1

Ein Federschwinger kann auch auf andere Weise erregt werden (Bild 17/1).

Mit Hilfe einer Morsetaste kann der Stromkreis in der unter dem Eisenkörper befindlichen Spule periodisch geschlossen und geöffnet werden. Der Eisenkörper wird im Rhythmus der Erregung angezogen. 4

Im Versuch 4 erfolgt die Erregung des Federschwingers durch das Magnetfeld der Spule.
Die hervorgerufene Schwingung nennt man eine **erzwungene Schwingung.** Die Schaltfrequenz im Stromkreis der Spule ist die **Erregerfrequenz** f_E. Die Frequenz der erzwungenen Schwingung stimmt hierbei mit der Erregerfrequenz überein.

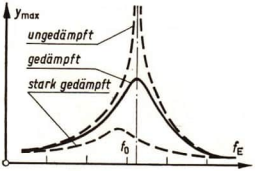


17/2 Resonanzkurve eines Schwingers mit der Eigenfrequenz f_0 bei veränderlicher Erregerfrequenz

Die Resonanz

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.
Wenn die Erregerfrequenz und die Eigenfrequenz übereinstimmen, dann sind die beiden Schwingungen in **Resonanz.**

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



17/3 Resonanzkurven eines Schwingers bei verschiedener Dämpfung

Der Verlauf der Resonanzkurve (Bild 17/3) hängt von der Dämpfung des schwingenden Systems ab. Je größer die Dämpfung, 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 17/3! ●

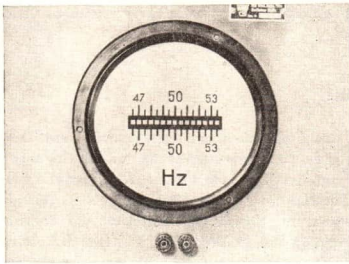
Anwendungsbeispiele zu Schwingungen

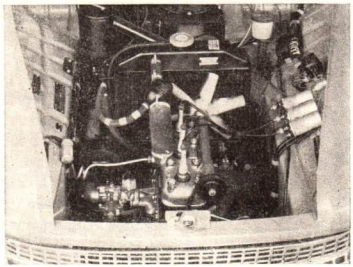
Frequenzmessung. Der Zungenfrequenzmesser besteht aus einer Reihe elastischer Stahlzungen mit verschiedenen Eigenfrequenzen. Bei Anlegen einer Wechselspannung (↗ S. 36) an den Elektromagneten des Gerätes zeigt die Zunge den stärksten Ausschlag, für die $f_E = f_0$.

Kolbenmotor. Die vier Takte Ansaugen, Verdichten, Ausdehnen, Ausstoßen erfolgen regelmäßig nacheinander. Die Veränderung der Größen Druck und Zylindervolumen sind mechanische Schwingungen.

Baugrundverdichtung. Mit einem mechanischen Rüttelverdichter wird durch die stoßweise Belastung der Bodenplatte der Baugrund verdichtet. Das Gerät kann trotz seiner großen Masse leicht bewegt werden, da es im Betrieb durch die schwingende Belastung zeitweilig fast vom Boden abgehoben wird.

Störende Schwingungen. Sie treten an vielen, meist schnell hin- und her- oder im Kreis bewegten Teilen auf. Man versucht den störenden Schwingungen durch Auswuchten, Massestücke oder Schwungräder usw. zu begegnen.

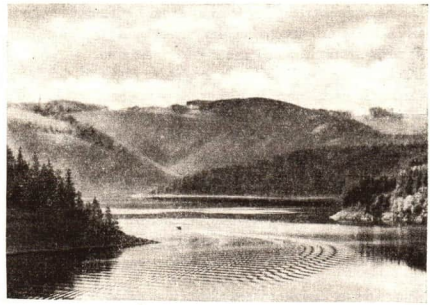








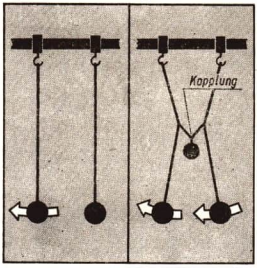
Grundbegriffe der Wellenlehre

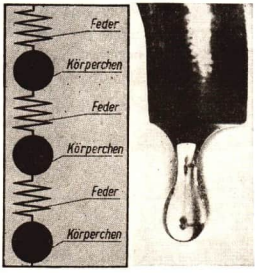


Das Motorboot hinterläßt bei seiner Fahrt weithin sichtbare Wasserwellen.
Diese Wellen entstehen dadurch, daß vom Boot Wasserteilchen verdrängt und dabei in Schwingung versetzt werden. Damit die Schwingung als Welle fortgeleitet werden kann, muß eine Verbindung, eine Kopplung zwischen den vielen Wasserteilchen bestehen.

Die mechanische Kopplung

19/2 19/3





Damit ein Schwingungserreger auf einen anderen Körper einwirken kann, muß zwischen beiden eine Verbindung bestehen. Eine solche durch elastische oder durch andere Kräfte verursachte Verbindung heißt **Kopplung.**

5 Hängt man zwei Pendelschwinger nebeneinander auf und stößt den einen an, so bleibt, wie zu erwarten, der andere Pendelschwinger in Ruhe (Bild 19/2).
6 Die zwei Pendelschwinger werden miteinander elastisch gekoppelt (Bild 19/3). Stößt man den einen Pendelschwinger an, so beginnt auch der zweite zu schwingen.

Im Versuch 6 ist die Energie des ersten Schwingers auf den zweiten Schwinger übertragen worden; die Energieübertragung wird durch ein elastisches *Kopplungsglied* ermöglicht.

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

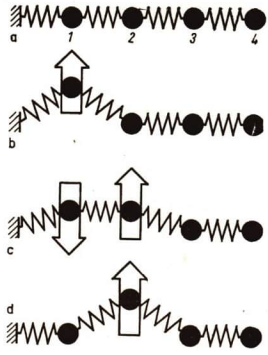
Erklären Sie, wie eine Schwingung übertragen wird, wenn mehrere Pendelschwinger bzw. mehrere Federschwinger miteinander elastisch gekoppelt sind (Bild 19/4)!

Die Wasserteilchen des Gewässers im Bild 19/1 bilden eine Kette solcher elastisch miteinander gekoppelter Schwinger.

Ein an einem Wasserhahn hängender Wassertropfen läßt die elastische Kopplung deutlich erkennen (Bild 19/5).

Wodurch sind die Wasserteilchen elastisch gekoppelt?

Die Energieübertragung wird an einer Federschwingerkette (Bild 20/1) erläutert, bei der mehrere Körperchen durch Federn elastisch miteinander gekoppelt sind.
Die Federn sind die Kopplungsglieder und zugleich jeweils für kurze Zeit Energiespeicher.
Wird das Körperchen 1 (Bild 20/1a) zum Beispiel vom Nullpunkt aus nach oben ausgelenkt (Bild 20/1b), dann wird die hierzu aufgewendete Arbeit als Energie in den Kopplungsgliedern am Körperchen 1 gespeichert.
Diese Energie bewirkt eine Rückführung des Körperchens 1 und eine Auslenkung des Körperchens 2 (Bild 20/1c). Der beschriebene Vorgang wird durch die Federschwingerkette fortgeleitet. Dabei wird Energie übertragen.



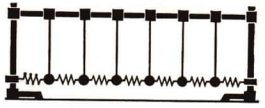
20/1 Fortschreiten einer Welle in einer Schwingerkette

▶ **Einen Vorgang, bei dem mechanische Energie durch die Bewegung gekoppelter Schwinger übertragen wird, bezeichnet man als mechanische Welle.**

Man kann die Schwingerkette als Modell für einen elastischen Körper ansehen. Ähnliche Vorgänge wie in Schwingerketten treten in festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern auf. Die Schwinger, man nennt sie auch **Oszillatoren,** sind die Teilchen der Körper. Die Gesamtheit der Oszillatoren bezeichnet man als **Medium.**
Die einzelnen Teilchen eines elastischen Körpers befinden sich infolge innerer Anziehungs- und Abstoßungskräfte in einer Gleichgewichtslage, aus der sie nur zeitweilig, beim Einwirken von Kräften, verschoben werden können.
Die zwischen den Teilchen wirkenden elastischen Kopplungskräfte übertragen die Schwingung.

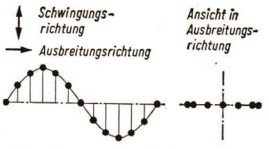
Wellenarten

Wellen werden danach unterschieden, wie die Ausbreitungsrichtung der Welle und die Schwingungsrichtung der Oszillatoren zueinander verlaufen.
Zur Untersuchung der Wellenarten kann man die Schwingerkette benutzen (Bild 20/2).



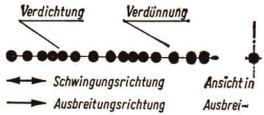
20/2 Federschwingerkette

7
▼ Das Körperchen 1 der Schwingerkette wird quer zur Längsrichtung der Schwingerkette angestoßen. Es läuft eine Welle durch die Kette. Die Körperchen schwingen in diesem Falle quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Bild 20/3).



20/3 Querwelle in Schwingerkette

Eine Welle, bei der die Oszillatoren quer zur Ausbreitungsrichtung der Wellen schwingen, bezeichnet man als **Querwelle** oder **Transversalwelle.**



21/1 Längswelle in Schwingerkette

Das Körperchen 1 wird in Längsrichtung der Schwingerkette angestoßen. Es läuft eine Welle in Längsrichtung durch die Kette. Die Körperchen schwingen in diesem Falle in Ausbreitungsrichtung der Welle (Bild 21/1).

Eine Welle, bei der die Oszillatoren in Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, bezeichnet man als **Längswelle** oder **Longitudinalwelle.**

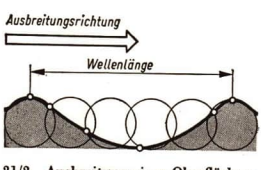
In Versuch 8 ist zu erkennen, daß die Oszillatoren an verschiedenen Stellen dichter zusammenrücken als an anderen Stellen. Man bezeichnet diese Stellen als **Verdichtung** bzw. als **Verdünnung.**

Wasserwellen könnte man auf den ersten Eindruck hin für Transversalwellen halten.

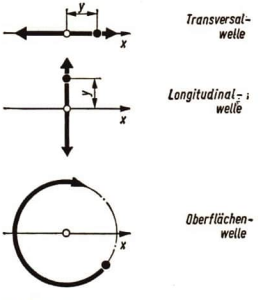
Die Wasserteilchen an der Oberfläche der Flüssigkeit führen jedoch kreisende Bewegungen aus (Bild 21/2), es entstehen **Oberflächenwellen** mit Wellenbergen und Wellentälern.

Wir fassen zusammen:

Je nach der Art, wie der einzelne Oszillator des Mediums in bezug auf die Ausbreitungsrichtung der Welle schwingt, unterscheidet man Transversalwellen, Longitudinalwellen und Oberflächenwellen (Bild 21/3).



21/2 Ausbreitung einer Oberflächenwelle auf einer Flüssigkeit (senkrechter Schnitt)



21/3 Wellenarten

Querwellen können sich nur dann bilden, wenn die Teilchen durch elastische Kräfte gekoppelt sind, also nur in festen Körpern (große Kohäsion) oder an der Oberfläche von Flüssigkeiten (Oberflächenspannung).

Längswellen können auch dann auftreten, wenn keine elastischen Kräfte zwischen den schwingenden Teilchen bestehen, also auch in Gasen. Die Welle breitet sich durch elastische Stöße der Teilchen aus.

Längswellen können sich daher im Inneren der Körper aller Aggregatzustände bilden.

Erläutern Sie an verschiedenen Beispielen die Art der Welle und ihre Ausbreitung in einem Festkörper, in einer Flüssigkeit und in einem Gas!

Wellen, die sich nur in einer Richtung, zum Beispiel längs eines Seiles, ausbreiten, heißen **lineare Wellen.**

Auf einer Flüssigkeitsoberfläche oder einer Festkörperoberfläche (Erde) breiten sich die Wellen in der Ebene aus. Wir sprechen von **Oberflächenwellen.**

Ist die Geschwindigkeit der Wellen in allen Punkten einer Ebene gleich groß, so entstehen bei punktförmigem Erregungszentrum **Kreiswellen.**

Im Innern eines Körpers bilden sich **räumliche Wellen.** Bei punktförmiger Erregung und gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit an allen Stellen des Körpers entstehen **Kugelwellen.**

Die Kenngrößen einer mechanischen Welle

Die Wellen werden ebenso wie die Schwingungen durch bestimmte Größen charakterisiert. Es sind dies die Elongation, die Amplitude, die Frequenz, die Phase, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

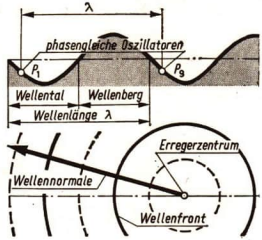
22/1 Kenngrößen einer Welle

Kenngröße	Formelzeichen	Merkmal
Elongation oder **Auslenkung**	y	Momentanwerte der Abweichung aller Oszillatoren von ihrem Ruhepunkt
Amplitude oder **Schwingungsweite**	y_{max}	Maximalwerte der Abweichung aller Oszillatoren von ihrem Ruhepunkt
Frequenz oder **Schwingungsanzahl**	f	gleich der Frequenz der Oszillatoren (↗ S. 10)
Phase	—	Schwingungszustand eines Oszillators, gegeben durch Schwingungsrichtung und Elongation (Bild 22/2)
Wellenlänge	λ	Abstand zweier in Ausbreitungsrichtung aufeinanderfolgender Oszillatoren, die sich in gleicher Phase befinden (Bild 22/2)
Ausbreitungsgeschwindigkeit	c	Geschwindigkeit, mit der sich eine Amplitude (nicht der Oszillator!) im Wellenmedium fortbewegt

Man benutzt Wasserwellen oft, um bestimmte Gesetzmäßigkeiten aus der Wellenlehre darzustellen.
Die Linien (Bild 22/2), die einander benachbarte, phasengleiche Oszillatoren verbinden, heißen **Wellenfronten.**

● *Warum sind die Oszillatoren P_1 und P_2 (Bild 22/2) phasengleich?*

Es werden bei Transversalwellen die Wellenfronten gezeichnet, die Wellenbergen oder Wellentälern entsprechen. Bei Longitudinalwellen werden die Verdichtungen beziehungsweise Verdünnungen als Wellenfronten dargestellt.
Die auf einer Wellenfront errichtete Senkrechte gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Diese Senkrechte heißt **Wellennormale.**

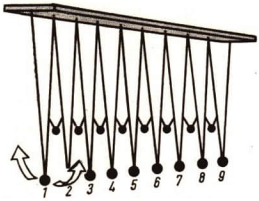


22/2 Schnitt einer Oberflächenwelle. Die Wellenfronten breiten sich kreisförmig vom Erregerzentrum aus

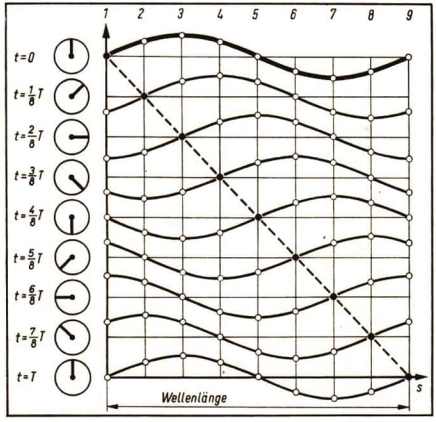
Die grafische Darstellung von Wellen

In den Bildern 23/1 und 24/1 ist eine Pendelschwingerkette dargestellt.

Welche Funktion hat die elastische Kopplung?



23/1 Transversal-Schwingerkette



23/2 Neun Momentbilder einer nach rechts fortschreitenden Transversalwelle. In der Zeit T ist die gleiche Phase um die Wellenlänge λ nach rechts gewandert. Die gestrichelte Gerade zeigt das Vorrücken der Welle um die Wellenlänge in der Zeit T.

Je nachdem, wie die Pendelschwinger aufgehängt sind, können sie quer oder längs (↗ S. 20) zur Kette in harmonische Schwingungen versetzt werden.

9

Der erste Oszillator in der Kette (Bild 23/1) wird angestoßen. In der Kette entsteht dadurch eine Transversalwelle. Alle Oszillatoren haben die gleiche Amplitude. Sie erreichen den Umkehrpunkt jedoch zu verschiedenen Zeitpunkten. Mehrere Momentbilder der Elongation aller Oszillatoren sind neben der Schwingerkette in der Draufsicht (Bild 23/2) gezeigt.

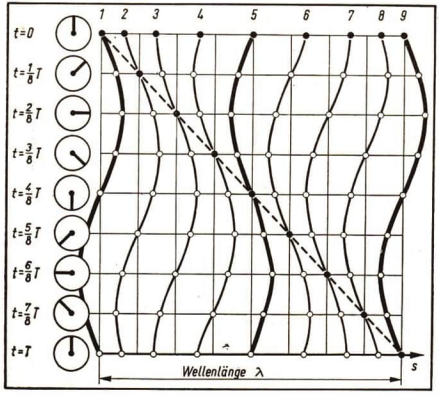
Vergleicht man die Elongation aller Oszillatoren eines Momentbildes miteinander, so sieht man, daß sich in gleichen Abständen eine bestimmte Phase wiederholt.

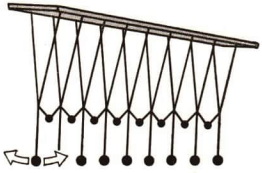
Vergleichen Sie die Phase der Oszillatoren 1, 5 und 9 zur Zeit $t = 0$!

Den verschiedenen Momentbildern ist zu entnehmen, daß sich die Oszillatoren auf einer sinusförmigen Wellenlinie anordnen, die sich nach rechts verschiebt. Daran ist das Fortschreiten einer Welle zu erkennen.

10

Der erste Oszillator in der Kette (Bild 24/1) wird angestoßen. In der Kette entsteht dadurch eine Longitudinalwelle. Alle Oszillatoren haben die gleiche Amplitude. Sie erreichen den Umkehrpunkt jedoch zu verschiedenen Zeitpunkten (Bild 24/2).





24/1 Longitudinal-Schwingerkette

24/2 Neun Momentbilder einer nach rechts fortschreitenden Longitudinalwelle. In der Zeit T ist die gleiche Phase um die Wellenlänge nach rechts gewandert (Strichlinie). Die vertikale Sinuslinie unter 1 ist das Elongations-Zeit-Diagramm einer Schwingung des Oszillators 1

Aus den Momentbildern beider Wellenarten erkennt man folgende Gesetzmäßigkeit:

▷ **Die jeweilige Elongation der Oszillatoren (zum gleichen Zeitpunkt t) ändert sich mit der Entfernung vom Erregungszentrum.**

$y = f(s)$, $t = \text{const.}$

Zur grafischen Darstellung (Bild 24/3) benutzt man die physikalische Größe Elongation der Oszillatoren.

In diesem Beispiel wurde auf der Ordinatenachse die Elongation von Oszillatoren aufgetragen. Bei anderen Wellen werden andere physikalische Größen, z. B. Druck, Temperatur, elektrische Spannung, auf der Ordinatenachse aufgetragen.

Aus dem Weg-Zeit-Diagramm eines einzelnen Oszillators (Bild 24/2) erkennt man eine weitere Gesetzmäßigkeit:

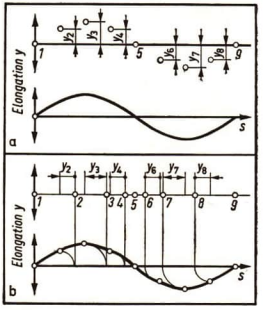
▷ **Die Elongation des einzelnen Oszillators (bei unveränderter Entfernung s) ändert sich mit der Zeit.**

$y = f(t)$, $s = \text{const.}$

Beide Aussagen kann man zusammenfassen:

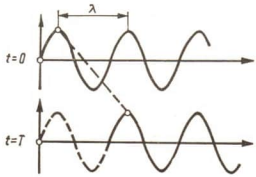
▶ **Eine mechanische Welle ist ein Vorgang, bei dem sich eine mechanische Größe örtlich und zeitlich ändert und bei dem Energie übertragen wird.** $y = f(s, t)$

Aus den Darstellungen geht hervor, daß Wellen in einem Diagramm nicht vollständig dargestellt werden können.



24/3 Grafische Darstellung der Momentanwerte der Elongationen einer
a) Transversalwelle und einer
b) Longitudinalwelle.
Die Entfernung s ist der jeweilige Abstand des Ruhepunktes eines Oszillators vom Erregerzentrum

Das Gesetz der Wellenausbreitung



25/1 Fortschreiten einer Welle

Zwischen der Frequenz, der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang.

Im Bild 25/1 verschiebt sich ein Wellenberg um eine Wellenlänge nach rechts (vergleiche mit Bild 23/2). Die dabei verstrichene Zeit ist gleich der Schwindungsdauer T jedes Teilchens des Mediums. Die Geschwindigkeit ist der Quotient von Weg und Zeit: $v = s/t$. Für die Geschwindigkeit v wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit c gesetzt. Ersetzt man in der Gleichung $c = s/t$ die beliebige Strecke s durch die Wellenlänge λ, so ist für die Zeit t die Schwingungsdauer T zu setzen. Hieraus ergibt sich:

$$c = \frac{\lambda}{T}. \quad \text{Mit } T = \frac{1}{f} \text{ erhält man das}$$

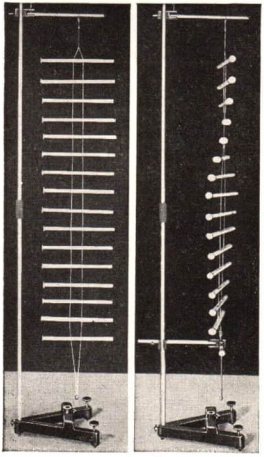
Gesetz der Wellenausbreitung $\quad c = \lambda \cdot f.$ ◀

Eine Wasserwelle hat eine Wellenlänge von 26 cm. Es laufen 10 Wellenberge in 8,3 Sekunden durch einen Beobachtungspunkt. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit? ■

Gegeben:	*Lösung:*
$\lambda = 26$ cm	$c = \lambda \cdot f \quad c = \lambda \cdot \frac{n}{t}$
$n = 10$	
$t = 8{,}3$ s	$c = 26\text{ cm} \cdot \frac{10}{8{,}3\text{ s}}$
Gesucht:	$c \approx 31{,}3\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
c	

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt etwa 31,3 cm · s^{-1}.

25/2



Im Wellengerät nach Julius (Bild 25/2) sind Querstäbe mit Schnüren verknüpft. Sie tragen an ihren Enden je eine kleine Scheibe. Jeder Querstab führt Schwingungen aus, wenn er seitlich angestoßen wird. Durch die Kopplung werden alle Querstäbe in Schwingungen versetzt.

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

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

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

Die Überlagerung von mechanischen Wellen

Bei einer mechanischen Welle wird die zu übertragende Energie von einem Oszillator aufgenommen und an den benachbarten Oszillator über ein Kopplungsglied weitergegeben.

● *Welche Funktion haben die Kopplungsglieder in einem Medium?*

In vielen Fällen wird durch ein Medium nicht nur eine, sondern es werden mehrere Wellen fortgeleitet. Dabei überlagern sich diese Wellen, das heißt, einem Oszillator können zu gleicher Zeit mehrere Energiebeträge mitgeteilt werden.

● *Welcher Zusammenhang besteht zwischen Amplitude und Energie eines Oszillators?*

11

▼ In einer Wellenwanne werden von zwei Erregerzentren zwei voneinander unabhängige Wellen erzeugt. Es entsteht das im Bild 26/1 gezeigte Wellenbild.



26/1 Überlagerung von Wellen (2 Erregerzentren)

Wenn sich zwei oder mehrere Wellen in einem Medium ausbreiten, so überlagern sie sich, das heißt, es entsteht eine resultierende Welle. Bei einer solchen Überlagerung von Wellen (Bild 26/1) werden sie verstärkt, geschwächt oder ausgelöscht.
Man bezeichnet die Überlagerung von Wellen als **Interferenz.** Eine Wellenverstärkung tritt an solchen Stellen ein, wo einem Oszillator aus beiden Wellen Energie zugeführt wird; dadurch wird die Amplitude größer. Eine Wellenschwächung tritt an solchen Stellen ein, wo einem Oszillator in einer Welle Energie zugeführt wird, und wo er gleichzeitig in einer anderen Welle Energie abgibt; dadurch wird die Amplitude kleiner; sie entspricht dann der Differenz der beiden Energiebeträge.

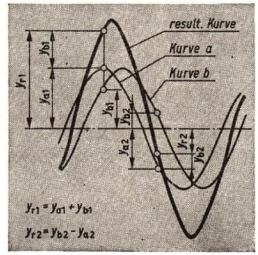
● *Erklären Sie den Vorgang der Wellenauslöschung bei der Überlagerung zweier Wellen!*

Aus Beobachtungen wurde allgemein folgender Erfahrungssatz gefunden:

▷ **Laufen in einem Medium zwei oder mehrere Wellen, so überlagern sie sich ungestört.**

Aus diesem Satz wird abgeleitet:

Die grafische Darstellung von zwei einander überlagernden Wellen erhält man, wenn man die Elongationen der Oszillatoren geometrisch addiert. In Bild 26/2 ist gezeigt, wie die geometrische Addition durchgeführt wird.



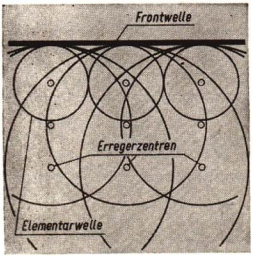
26/2 Darstellung einer aus zwei Wellen entstandenen Überlagerungswelle

Das Huygenssche Prinzip

Alle wesentlichen Fortschritte unserer Naturerkenntnis sind so entstanden, daß bestimmte Vorstellungen über die Erscheinungen entwickelt wurden. Eine solche Hypothese war beispielsweise anfangs die Annahme, daß die Wärme nichts anderes ist als die Bewegung der kleinsten Teilchen eines Körpers.
Die Hypothese dient als Richtschnur für weitere Überlegungen und für den Aufbau von Versuchsreihen. Sie nimmt größere Wahrscheinlichkeit an, wenn sie durch die Versuchsergebnisse immer wieder bestätigt wird. Besteht kein Zweifel mehr an der Richtigkeit einer solchen Annahme, so wird die Hypothese zur Theorie. Das ist bei der Wärmebewegung der Fall. Wir sprechen daher von der kinetischen Wärmetheorie. Stehen jedoch einzelne Versuche im Widerspruch zur Annahme, so muß die Hypothese geändert oder sogar fallengelassen werden.

Die aus der Kl. 6 bekannten Gesetzmäßigkeiten der Reflexion und der Brechung, die bei der Ausbreitung von Wellen auftreten können, lassen sich mit Hilfe einer Hypothese erklären, die man das Huygenssche Prinzip nennt.

Jeder Punkt eines Mediums, der von einer fortschreitenden Wellenfront erreicht wird, kann als Erregungszentrum einer neuen Welle, einer Elementarwelle, betrachtet werden. In Ausbreitungsrichtung der Welle setzen sich die Elementarwellen zu einer Frontwelle zusammen.



27/1 Elementarwellen bilden eine fortschreitende Frontwelle

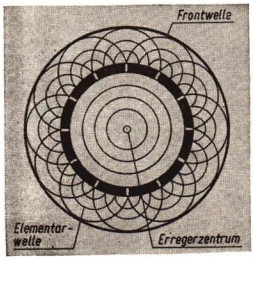
So müßten beispielsweise von allen Punkten der jeweils vordersten Wellenfront einer fortschreitenden ebenen Welle in jedem Augenblick Elementarwellen kreisförmig sich ausbreiten (Bild 27/1). Diese Elementarwellen treten nicht einzeln in Erscheinung, sie überlagern sich.

Zur Veranschaulichung dient folgender Versuch:

12

In einer Wellenwanne wird eine Kreiswelle hervorgerufen (Bild 27/2). Das Erregungszentrum ist von einem Ring mit mehreren Öffnungen umgeben. Jede Öffnung wirkt als Erregerzentrum einer Elementarwelle. Diese überlagern einander so, daß sie in einer bestimmten Entfernung vom Ring eine gemeinsame Frontwelle bilden. Diese neue, aus den Elementarwellen entstandene Welle stimmt überein mit der Welle, die ohne Behinderung durch den Ring fortwandern würde.

27/2 Bildung einer kreisförmigen Frontwelle



Christian Huygens. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts verschob sich das Zentrum der wissenschaftlichen Entwicklung von Italien nach Westeuropa (England, Frankreich, Niederlande). Das aufstrebende Bürgertum hatte dort bereits politische und ökonomische Machtpositionen inne und war sehr daran interessiert, den Handel und die Schiffahrt zu fördern und die Manufakturen zu erweitern.
Ein Wissenschaftler jener Zeit war Christian Huygens.

Bekannt wurde HUYGENS durch seine Entdeckungen des Saturnringes und eines Saturnmondes. 1665 wurde HUYGENS als Mitglied an die neu gegründete Akademie der Wissenschaften nach Paris berufen, wo er bis 1681 blieb. Bereits 1657 hatte HUYGENS die Pendeluhr erfunden. 1690 erschien „Traité de la lumière" (Abhandlung über das Licht). In diesem 1678 verfaßten Buch formulierte HUYGENS das nach ihm benannte Huygenssche Prinzip: „Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ... zu bedenken, daß jedes Teilchen des Stoffes, in welchem eine Welle sich ausbreitet, ... seine Bewegung ... allen übrigen davon abgibt, welche es berühren ... Daher muß sich um jedes Teilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Teilchen ist."
Die sehr klaren Gedankengänge HUYGENS' bilden noch heute die beste Modellvorstellung und theoretische Grundlage für viele Wellenerscheinungen, wie z. B. Reflexion und Brechung. HUYGENS gilt neben NEWTON und LEIBNITZ als einer der bedeutendsten Wissenschaftler des 17. Jahrhunderts.

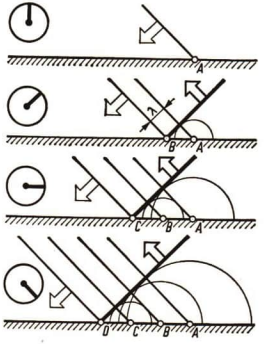


28/1 CHRISTIAN HUYGENS (1629 bis 1695)

Reflexion einer Welle

Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips läßt sich die Reflexion von Wellen erklären (Bild 28/2):

■ **Eine Wellenfront trifft bei A auf die Wand. Um A bildet sich eine Elementarwelle. Nach einer bestimmten Zeit wird von der fortschreitenden Wellenfront der Punkt B erreicht. Die in dieser Zeit durchlaufene Strecke sei λ. Auch um B bildet sich eine Elementarwelle. Die zum ersten Zeitpunkt um A entstandene Elementarwelle hat sich inzwischen nach allen Seiten um die Strecke λ ausgebreitet. Die fortschreitende Wellenfront erreicht dann den Punkt C, um den eine weitere Elementarwelle entsteht. Der Radius der Wellen um A und B beträgt zu diesem Zeitpunkt $2 \cdot \lambda$ beziehungsweise λ.**
Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die Elementarwellen für vier Punkte gezeichnet.
In Wirklichkeit werden an allen Punkten des Hindernisses, die von der einfallenden Welle erreicht werden, Elementarwellen erzeugt. Sie durchdringen einander und bilden eine neue Frontwelle. Auf diese Weise entsteht die reflektierte Wellenfront.



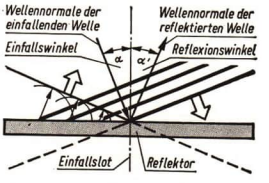
28/2 Reflexion einer Welle

Zwischen der Richtung der Wellenfront der einfallenden und der reflektierten Welle bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge (Bild 28/3).

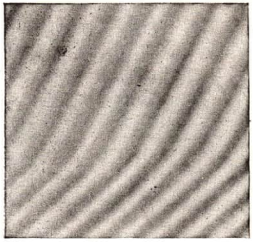
● *Erklären Sie den Begriff Einfallswinkel!*

Diese Zusammenhänge sind als Reflexionsgesetz bekannt.

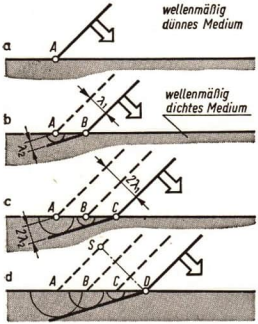
▶ **Bei der Reflexion einer ebenen Welle an einem ebenflächigen Hindernis ist der Reflexionswinkel α' gleich dem Einfallswinkel α.** $\alpha' = \alpha$



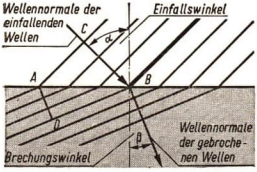
28/3 Der Reflexionswinkel α' ist gleich dem Einfallswinkel α



29/1 Brechung von Wasserwellen in der Wellenwanne. In der Wellenwanne liegt eine Glasplatte, die vom Wasser nur wenige Millimeter bedeckt wird. An der Grenzfläche zwischen flachem und tieferem Wasser sind die Wellenfronten geknickt



29/2 Konstruktion der gebrochenen Welle mit Hilfe von Elementarwellen



29/3 Brechung einer Welle

Brechung einer Welle

In einer Wellenwanne kann man beobachten, daß Wellen mit geradlinigen Wellenfronten, die aus dem Bereich des tiefen Wassers kommen und schräg auf die Grenzlinie zwischen tiefem und flachem Wasser treffen, aus ihrer Richtung abgelenkt werden (Bild 29/1). Die Richtungsänderung bezeichnet man als **Brechung.**

Im flachen Wasser macht sich der Einfluß des Grundes auf die Wasserwellenbewegung hemmend bemerkbar. Die Wasserwellen haben hier eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als im tiefen Wasser. Das Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit größer ist, wird *wellenmäßig dünner* genannt. Im *wellenmäßig dichteren* Medium breitet sich die Welle langsamer aus.

Das Huygenssche Prinzip ermöglicht auch eine Erklärung der Brechung. Die Darstellung ist auf eine einzige Wellenfront beschränkt (Bild 29/2).

Die Wellenfront trifft im Punkte A auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien (Bild 29/2a). Um A entsteht eine Elementarwelle, die in beiden Medien eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. ■

Der Radius der gezeichneten Welle (Bild 29/2b) ist daher im wellenmäßig dichteren Medium kleiner als im wellenmäßig dünneren Medium. Bei weiterem Vorrücken der einfallenden Wellenfront entstehen um jeden Punkt der Grenzlinie Elementarwellen.

Die Elementarwellen im wellenmäßig dichteren Medium setzen sich zu einer gemeinsamen Welle zusammen. Diese bleibt gegenüber dem Teil zurück, der im wellenmäßig dünneren Medium verläuft. Die Wellenfront ist infolgedessen an der Grenzlinie gebrochen.

Erklären Sie den Begriff Brechungswinkel! ●

Unter Verwendung der Begriffe Einfallswinkel und Brechungswinkel können die Vorgänge bei der Brechung qualitativ[1] erfaßt werden. Es ergibt sich:

Beim Übergang einer Welle in ein wellenmäßig dichteres Medium ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel. ◁

Wie verhalten sich Brechungswinkel und Einfallswinkel beim Übergang einer Welle in ein wellenmäßig dünneres Medium? ●

An der Grenzfläche kommt es außerdem stets zu einer Reflexion, die in der Zeichnung aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen wurde.

Jede Brechung einer Welle ist mit einer Reflexion verbunden. ◁

[1] qualitativ: der Qualität, dem Wert nach; hier: dem Wesen nach

Die Zusammenhänge zeigen, Einfalls- und Brechungswinkel können auch quantitativ[1] ausgedrückt werden (Bild 30/1). Die einfallende Wellenfront AS hat nach dem Fortschreiten um eine Wellenlänge die neue Lage TD. Die verschieden langen Strecken $\overline{AT}$ und $\overline{SD}$ werden von der Wellenfront in der gleichen Zeit zurückgelegt. Das ist möglich, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen verschieden sind.

Versuche ergaben, daß die Frequenz bei einer Wellenbrechung unabhängig vom Medium konstant bleibt. Das Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten beträgt demnach

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1 \cdot f}{\lambda_2 \cdot f} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Unter Verwendung der Sinusfunktion ergibt sich für den Einfallswinkel α die Beziehung

$$\sin\alpha = \frac{\lambda_1}{\overline{AD}}$$

und für den Brechungswinkel β die Beziehung

$$\sin\beta = \frac{\lambda_2}{\overline{AD}}.$$

Bildet man den Quotienten aus $\sin\alpha$ und $\sin\beta$, so erhält man

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Das Verhältnis $\lambda_1 : \lambda_2$ ist gleich $c_1 : c_2$. Daraus erhält man das

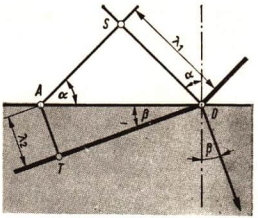
▶ **Brechungsgesetz** $\sin\alpha : \sin\beta = c_1 : c_2$.

Das Verhältnis der Sinuswerte des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist stets gleich dem Verhältnis der Beträge der Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Es heißt Brechungsverhältnis oder

▶ **Brechungszahl** $n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$ bzw. $n = \frac{c_1}{c_2}$.

Hier haben wir ein Beispiel dafür, wie man ohne Experiment ein Naturgesetz finden kann. Aus drei als richtig angenommenen oder als richtig erkannten Voraussetzungen (Huygenssches Prinzip, verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien, Gesetz der Wellenausbreitung) wird das Brechungsgesetz abgeleitet. Solches Vorgehen nennt man theoretische Ableitung. Die theoretischen Überlegungen müssen nicht immer – wie in unserem Fall – zu richtigen Ergebnissen führen. Deshalb muß man die Ergebnisse (nicht jeden Schritt der Überlegung) in der Praxis, d. h. am Experiment, überprüfen. Stimmen Ergebnis von theoretischer Ableitung und Experiment nicht überein, so muß man je-

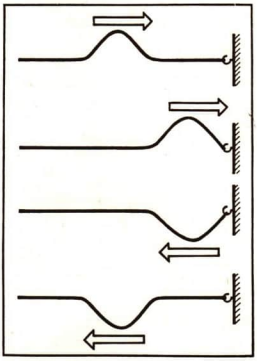
[1] quantitativ: der Quantität, der Menge nach; hier: zahlenmäßig



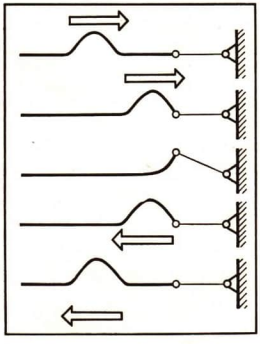
30/1 Zur Ableitung des Brechungsgesetzes

Fragen und Aufträge 38 bis 62, S. 111
Versuche 14 bis 18, S. 117

den logischen Schritt der Ableitung kontrollieren, und wenn kein Fehler zu finden ist, die Voraussetzungen überprüfen. Es kann sein, daß in den Voraussetzungen etwas steckt, was uns bisher noch nicht bewußt ist, das Ergebnis aber beeinflußt. Als Beispiel sei hier erwähnt, daß wir in dem Huygensschen Prinzip, wie wir es benutzen, die Annahme vorausgesetzt haben, daß sich zwei Wellensysteme so überlagern, daß keines das andere irgendwie in seiner Ausbreitung stört. Das ist eine Annahme, die gar nicht selbstverständlich ist, sich aber als richtig erwiesen hat.



31/1 Reflexion am festen Ende



31/2 Reflexion am losen Ende

Stehende Wellen

Um die Vorgänge bei zwei einander entgegenlaufenden Wellen zu verstehen, untersucht man Wellen, deren Träger sich nur in einer Dimension erstreckt, zum Beispiel Querwellen in einem Seil.

Reflexion einer fortschreitenden Welle.

13 ▼ Ein Seil wird an einem Wandhaken befestigt und das freie Ende ruckartig einmal auf und nieder bewegt (Bild 31/1). Dadurch entsteht ein Wellenberg, der durch das Seil zur Wand läuft. Dort wird er als Wellental reflektiert. Durch die Reflexion wird anstelle eines Wellenberges ein Wellental zurückgeworfen. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Phasenumkehr*.

Beschreiben Sie die Phase eines Punktes, wenn er auf einem Wellenberg liegt! ●

Der im Versuch 13 dargestellte Vorgang wird bezeichnet als **Reflexion am festen Ende** (Bild 31/1).

14 ▼ Wird das Seil unter Zwischenschaltung eines langen dünnen Fadens an der Wand befestigt (Bild 31/2), so tritt bei der Reflexion keine Phasenumkehr auf. Man nennt diese Erscheinung *Phasengleichlauf*. Das Seil kann ausschwingen, so daß der Wellenberg als Wellenberg reflektiert wird.

Der im Versuch 14 dargestellte Vorgang wird bezeichnet als **Reflexion am losen Ende** (Bild 31/2).

Erteilt man einem Seil in regelmäßigem Abstand Anstöße (periodische Welle), so treten bei der Reflexion an einer Wand die gleichen Erscheinungen auf. Die Phasenumkehr von Wellenberg zu Wellental bei der Reflexion am festen Ende heißt **Phasensprung,** am losen Ende spricht man vom **Phasengleichlauf.**

Bei der Reflexion einer Welle am „festen Ende" tritt ein Phasensprung von $\lambda/2$ auf. ◁

Bei der Reflexion einer Welle am „losen Ende" tritt Phasengleichlauf auf. ◁

Stehende Querwellen. Ein Sonderfall entsteht bei der Überlagerung gegenläufiger Wellen: Mit gleicher Geschwindigkeit sollen sich zwei Querwellen mit derselben Schwingungsebene, Wellenlänge und Amplitude entgegenlaufen. Bei periodischer Bewegung eines freien Seilendes entsteht auf Grund der Überlagerung der hinlaufenden und der reflektierten Welle eine besondere Schwingungsform (Bild 32/1). Im gleichen Abstand sind Stellen vorhanden, die sich ständig in Ruhe befinden. Dazwischen befinden sich Stellen maximaler Amplitude.

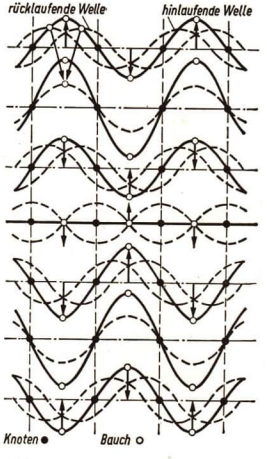


32/1 Erzeugung einer stehenden Welle

Man bezeichnet eine solche Welle als **stehende Welle.**

Die ständig in Ruhe bleibenden Stellen heißen *Bewegungsknoten*, die Stellen maximaler Amplitude nennt man *Bewegungsbäuche*.

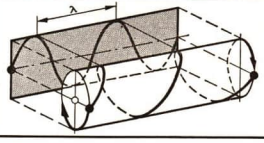
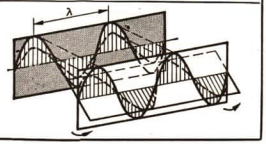
Bei der stehenden Welle haben die hin- und die rücklaufende Welle gleiche Wellenlänge und Amplitude. Entsteht die stehende Welle durch Reflexion am festen Ende, so hat sie dort einen Knoten. Die anderen Knoten liegen $1 \cdot \frac{\lambda}{2}, 2 \cdot \frac{\lambda}{2}, \ldots$ vom festen Ende entfernt. Entsteht die stehende Welle durch Reflexion am losen Ende, so hat sie dort einen Schwingungsbauch. Die Knoten liegen $1 \cdot \frac{\lambda}{4}$, $3 \cdot \frac{\lambda}{4}$ ... vom losen Ende entfernt (Bild 32/2).



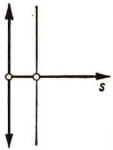
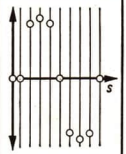
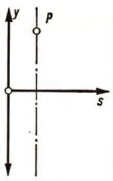
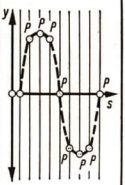
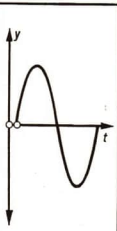
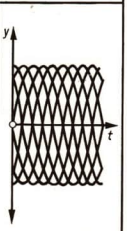
32/2

Bei der zeichnerischen Darstellung einer stehenden Querwelle (Bild 32/2) ist jede der beiden Teilwellen von Bild zu Bild um eine Achtelwellenlänge weitergeschoben, und zwar die eine nach links, die andere nach rechts. Die resultierende Welle schreitet nicht fort. Der Abstand zweier Knoten ist konstant und beträgt jeweils $\frac{\lambda}{2}$.

32/3 Fortschreitende und stehende Wellen

	fortschreitende Welle	stehende Welle
Die Amplitude	ist bei allen Punkten gleich, sie erreichen diese aber nacheinander.	ist in den Bewegungsbäuchen am größten. In den Bewegungsknoten ist sie Null.
Die Phase	ist im Bereich einer Wellenlänge für jeden Punkt anders.	ist zwischen zwei benachbarten Knoten bei allen Punkten gleich.
Die Energie	wird übertragen.	wird reflektiert.
Das Modell	ist der Schatten einer rotierenden Schraubenlinie.	ist der Schatten einer rotierenden ebenen Sinuslinie.
		

Vergleich mechanischer Schwingung und mechanischer Welle

Schwingung	Welle	
$y = f(t)$	$y = f(s,t)$	Eine mechanische Schwingung ist die zeitlich periodische Änderung einer mechanischen Größe. Eine mechanische harmonische Welle ist ein Vorgang, bei dem sich zeitlich und örtlich periodisch eine mechanische Größe ändert.
 kein Medium (Vakuum)	 Medium (Luft)	Bei einer Schwingung wird keine Energie übertragen. Bei einer mechanischen Welle wird Energie übertragen, sie wird abhängig von der Elongation an die benachbarten Oszillatoren weitergegeben.
		Bei einer mechanischen Schwingung führt z. B. nur ein Oszillator eine Bewegung auf einer bestimmten Bahn aus. Bei einer mechanischen Welle führen z. B. mehrere miteinander gekoppelte Oszillatoren eine Bewegung auf bestimmten Bahnen aus (Bild 22/2).
		Bei einer mechanischen Schwingung wird die Elongation y eines Oszillators zu einem bestimmten Zeitpunkt durch den Punkt P dargestellt. Bei einer mechanischen Welle werden die Elongationen y mehrerer Oszillatoren zu einem bestimmten Zeitpunkt als Funktion der Entfernung s $(y = f(s))$ der Oszillatoren vom Erregerzentrum dargestellt. Die Verbindungslinie der Punkte P ist eine Sinuskurve.
		Bei einer mechanischen harmonischen Schwingung wird die Elongation y eines Oszillators als Funktion der Zeit t $(y = f(t))$ in einem Diagramm als eine Sinuskurve dargestellt. Bei einer mechanischen harmonischen Welle werden die Elongationen y mehrerer Oszillatoren als Funktion der Zeit t in einem Diagramm als eine Schar von Sinuskurven dargestellt. Beachte: Die Sinuskurve einer Schwingung mit $y = f(t)$ ist nicht die Sinuskurve einer Welle mit $y = f(s)$.

Anwendungsbeispiele zu Wellen

In der **Fischerei** wird zum Aufsuchen von Fischschwärmen der Echograf benutzt. Die ausgesandten und reflektierten Ultraschall-Wellen zeichnen auf dem Bildschirm das untersuchte Gebiet ab. Fischschwärme werden damit nicht nur sehr leicht geortet, sondern auch die Tiefe, in der sie sich befinden, wird sehr genau festgestellt.

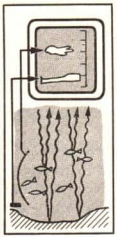
Bei der **Ultraschall-Werkstoffprüfung** wird auf Grund der Reflexion der Wellen festgestellt, ob sich im Werkstück reflektierende Schichten befinden.

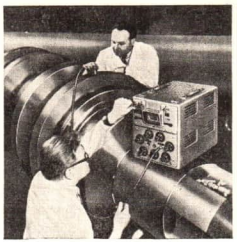
Diese Stellen sind meist Fehlerquellen im Werkstoff. Der erste Zacken auf dem Bildschirm stammt vom ausgesendeten Impuls, der rechte stammt von dem an der Werkstückgegenseite reflektierten Impuls, der mittlere Zacken ist durch Reflexion an einer Fehlerstelle entstanden.

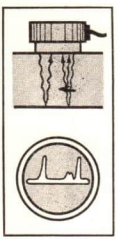
Die von einem **Schiffskörper** verursachten Wellen verbrauchen Antriebsenergie. Die günstigste Form des Schiffskörpers und der Energieaufwand durch Wellenbildung werden in Modellversuchen ermittelt.

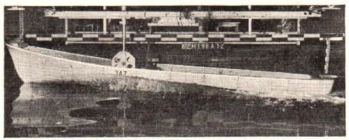
Zugvögel fliegen oft in Keilform. Die Vögel nutzen dabei die vom voranfliegenden Vogel unter Energieaufwand durch die Flügelbewegung in der Luft erzeugten Wellen aus, um mit möglichst geringem eigenen Energieaufwand auf diesen Wellen zu fliegen.





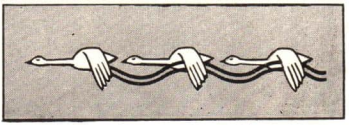


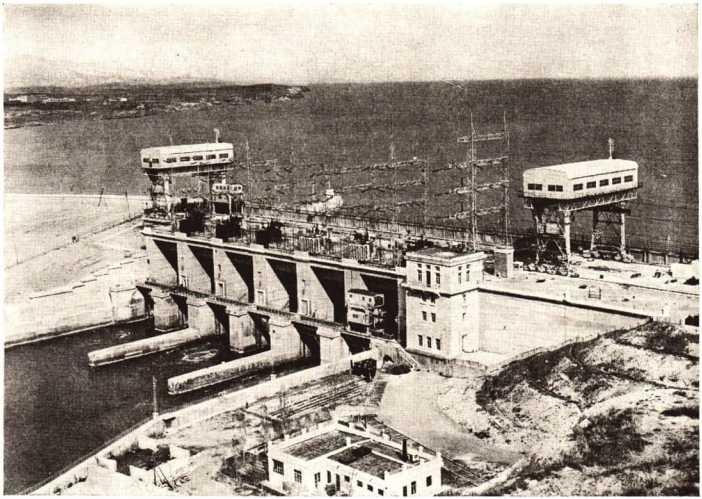








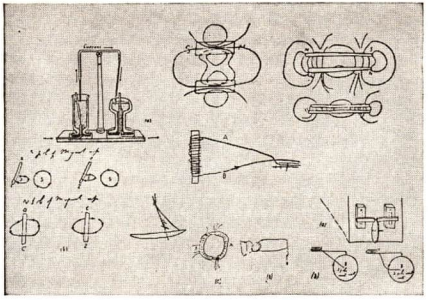




Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Zur Versorgung der Städte und Dörfer mit elektrischer Energie wird in den Generatoren der Wärmekraft-, Wasserkraft- und Atomkraftwerke aus chemischer Energie, mechanischer Energie oder Kernenergie elektrische Energie gewonnen. Die in den Generatoren induzierte Spannung ändert sich dabei ständig in einem bestimmten Rhythmus, der Leitungsstrom wechselt periodisch seine Richtung, die Energie breitet sich in den Leitungssystemen wellenartig aus.

Es gibt auch eine Energieübertragung durch elektromagnetische Wellen, die nicht an elektrische Leiter gebunden sind. Hertzsche Wellen und Lichtwellen breiten sich frei im Raume aus, dadurch können Funk- und Lichtsignale zwischen weit entfernten Stationen auf der Erde oder im Weltenraum drahtlos übertragen werden. Die Hertzschen Wellen und Lichtwellen verhalten sich in vielerlei Hinsicht wie mechanische Wellen.



Elektrische Schwingungen

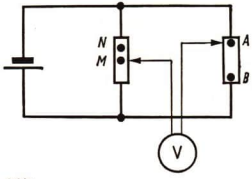
Nach zehnjähriger Forschung gelang es MICHAEL FARADAY im August 1831 erstmalig, Induktionsströme zu erzeugen. Die Induktionsgesetze anwendend, baute er bald danach kleine Rotationsstromerzeuger und Apparaturen (siehe Originalskizzen), die den heutigen Transformatoren ähnlich waren.

Die Wechselstromkurven

In einem Gleichstromkreis fließt der elektrische Strom immer in derselben Richtung.

● ***Wie ist die elektrische Stromrichtung im Unterschied zur Richtung des Elektronenstromes definiert?***

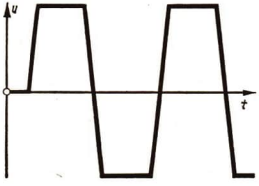
Es ist für viele Untersuchungen unwichtig, ob sich die Stromstärke ändert oder nicht, entscheidend ist, daß die Stromrichtung erhalten bleibt. Fließt der Strom aber abwechselnd in entgegengesetzter Richtung, so sagt man, daß in dem Stromkreis ein *Wechselstrom* fließt. Ein Wechselstrom ist also ein Strom, der seine Richtung *periodisch* ändert. Es ändert sich meist auch die Stromstärke.
Eine Wechselspannung kann man durch ein ständiges Umpolen einer Gleichspannungsquelle erzeugen.



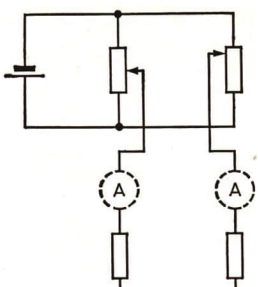
36/2

1 ▼ Der Schieberabgriff am linken Potentiometer (Bild 36/2) ist zunächst auf die Mitte eingestellt (Punkt M). Der Schieber am rechten Potentiometer wird gleichmäßig zum Punkt A verschoben, bleibt einige Zeit dort stehen, wird gleichmäßig zum Punkt B verschoben, bleibt dort wieder einige Zeit stehen, wird gleichmäßig zum Punkt A zurückgeschoben usw. Der Zeiger am Gleichspannungsmeßgerät mit dem Nullpunkt in der Mitte der Skale schlägt abwechselnd nach rechts und links aus.

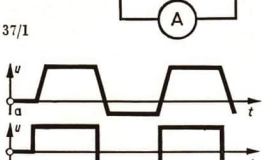
36/3



Den Spannungsverlauf nach Versuch 1 zeigt Bild 36/3. Die Wechselspannung nach Bild 36/3 bezeichnet man als **symmetrische Wechselspannung.**



37/1



37/2



37/3

37/4



Wird der linke Schieberabgriff von M nach N verstellt (Bild 36/2) und der Versuch 1 wiederholt, so erhält man eine Spannungs-Zeit-Kurve, wie sie in Bild 37/2a wiedergegeben ist.

Die Wechselspannung nach Bild 37/2a bezeichnet man als unsymmetrische Wechselspannung. Die Spannungs-Zeit-Kurven können beliebige Formen haben und brauchen nicht trapezförmig zu sein (Bild 37/2b, c).

Wie muß der Schieber am rechten Potentiometer nach Bild 36/2 bewegt werden, damit man annähernd rechteckförmige oder dreieckförmige Spannungskurven erhält?

Der Spannungsmesser in der Versuchsanordnung nach Bild 36/2 wird durch Glühlampen oder andere Widerstände ersetzt. Man erhält einen geschlossenen Stromkreis (Bild 37/1). Zum Stromstärkenachweis werden ein oder besser mehrere Gleichstrommeßgeräte mit dem Nullpunkt in der Mitte der Skale eingeschaltet. Alle Meßgeräte zeigen gleichzeitig eine gleichsinnige Veränderung der physikalischen Größe Stromstärke an. Die entsprechenden Stromstärke-Zeit-Kurven sind den Spannungskurven aus den Versuchen 1 und 2 ähnlich.

Eine wichtige Sonderstellung unter den Kurvenformen nimmt die sinusförmige Spannungskurve beziehungsweise die sinusförmige Stromstärkekurve ein (Bild 37/3). Die zeitlich sinusförmige Spannungskurve ist die einzige *formbeständige Wechselspannungskurve*; bei einer aufgeprägten Wechselspannung, die sich in der Zeit sinusförmig ändert (sinusförmige Wechselspannung), ist auch die Stromstärke-Zeit-Kurve sinusförmig. Bei allen anderen Wechselspannungsformen wird durch das Einschalten von Kondensatoren, Spulen, Schwingkreisen und so weiter die Kurvenform geändert, das heißt, die Stromstärke-Zeit-Kurvenform stimmt nicht mehr mit der Spannungs-Zeit-Kurvenform überein. Aus diesem Grunde ist man in der Praxis bemüht, nicht solche, sondern harmonische (↗ harmonische Schwingung S. 15) Wechselspannungen zu erzeugen, deren Kurven sinusförmig verlaufen.

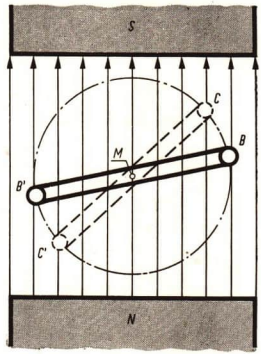
Der harmonische Wechselstrom

Die einfachste Weise, harmonische Wechselspannungen zu erzeugen, besteht darin, eine ebene Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld mit gleichmäßiger Geschwindigkeit zu drehen (Bild 37/4). Der von der Leiterschleife umschlossene Teil des Magnetfeldes wird dabei ständig vergrößert oder verkleinert. Die **Änderung** des magnetischen Flusses durch die Leiterschleife ist ein Maß für die induzierte Spannung. Hierbei ist auf Grund der Induktionsgesetze die induzierte Spannung am größten, wenn die Leiterschleife bei

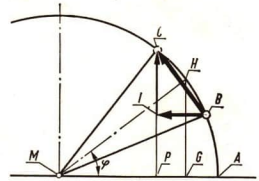
ihrer Drehung die senkrechte Lage erreicht hat (die Bewegung erfolgt dann rechtwinklig zu den Feldlinien). Steht die Ebene der Leiterschleife genau senkrecht auf den Feldlinien, wechselt die Polarität der induzierten Spannung, und die Stromrichtung kehrt sich um.

● *Vergleichen Sie die wirksame Fläche einer Induktionsspule (Induktionsgesetz, Kl. 9) mit der wirksamen Fläche einer drehbaren Leiterschleife!*

Dreht man die Leiterschleife in dem homogenen Magnetfeld beispielsweise aus der Stellung BB′ in die Stellung CC′ (Bild 38/1), ändert sich der magnetische Fluß durch die Schleifenfläche um einen bestimmten Betrag, der der Strecke JB proportional (Bild 38/2) ist. Die Länge der Schleife braucht nicht bekannt zu sein, da sie in eine Proportionalitätskonstante eingeht. Zur mathematischen Beschreibung der Spannungserzeugung ist es zweckmäßig, die Strecke JB durch den Winkel φ auszudrücken. Dazu wird der Bogen BC durch H halbiert. Von C wird das Lot auf MA gefällt; von B wird das Lot auf CP gefällt. Der Schnittpunkt dieser beiden Geraden ist J.
Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke MGH und CJB (die entsprechenden Schenkel der beiden Dreiecke stehen senkrecht aufeinander) folgt, daß JB proportional GH ist. Damit ist gezeigt, daß auch die Strecke $GH = MH \cdot \sin\varphi$ ein Maß für die Änderung des magnetischen Flusses bei der Drehung der Leiterschleife von B nach C ist. Die induzierte Spannung u ist also proportional $\sin\varphi$; daraus folgt $u = k \cdot \sin\varphi$. Eine Dimensionsbetrachtung zeigt, daß k die Dimension einer Spannung hat. Wenn $\varphi = 90°$ und damit $\sin\varphi = 1$ ist, wird $k = u_{max}$. Für φ setzt man $\omega \cdot t$ (↗ S.10).



38/1 B, C, B′, C′ Leiterquerschnitte
M Drehachse



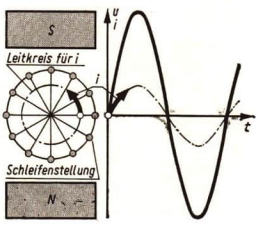
38/2 für I gilt J

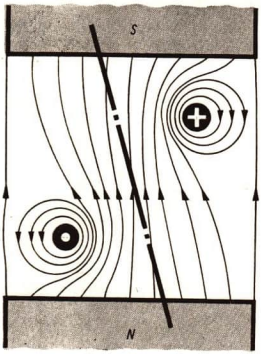
Daraus ergibt sich der

▶ **Momentanwert der Wechselspannung** $u = u_{max} \cdot \sin\omega \cdot t$.

Faßt man den Kreis ABC als Leitkreis auf, so kann daraus ähnlich wie bei der grafischen Darstellung der mechanischen Schwingung die entsprechende Spannungskurve entwickelt werden, indem man für bestimmte, konstante Zeitintervalle einer vollen Umdrehung der Leiterschleife die entsprechenden Werte der Spannung auf der Ordinate einträgt (Bild 38/3). Der Zusammenhang zwischen der Leiterschleifendrehung in einem homogenen Magnetfeld, dem Leitkreis, der Stromstärke-Zeit-Kurve und der Spannungs-Zeit-Kurve in einem rechtwinkligen Koordinatensystem ist in Bild 38/3 dargestellt. Einen Beitrag zur Induktion liefert nur die Bewegungskomponente des Leiters quer zu

38/3





39/1 Veränderung eines Magnetfeldes durch eine bewegte Leiterschleife

den Feldlinien. Diese Komponente wird harmonisch verändert bei gleichmäßiger Kreisbewegung des Leiters (↗ S. 15); demzufolge ist die induzierte Spannung eine harmonische Wechselspannung.

Durch eine entsprechende Ableitung erhält man den

Momentanwert der Wechselstromstärke $i = i_{max} \cdot \sin\omega \cdot t.$ ◀

Harmonische Wechselspannung und harmonische Wechselstromstärke entstehen immer nur unter der Voraussetzung, daß sich die Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld gleichförmig dreht. In den Wechselstromgeneratoren entsteht nicht zwangsläufig eine harmonische Wechselspannung, denn das ursprünglich homogene Magnetfeld wird durch das Magnetfeld der induzierten Ströme und durch die Eisenkörper, auf die die Leiterschleifen gewickelt sind, erheblich verformt (Bild 39/1). Harmonischer Wechselstrom wird nur dann von Generatoren erzeugt, wenn besondere konstruktive Maßnahmen an den Generatoren vorgenommen worden sind.

Kenngrößen des Wechselstroms

Wechselspannung und Wechselstromstärke ändern in ständiger Wiederholung ihren Zustand; die Spannung u und die Stromstärke i sind periodische Funktionen der Zeit und stellen damit elektrische Schwingungen dar.

$$u = f_1(t) = f_1(t + n \cdot T),$$

$$i = f_2(t) = f_2(t + n \cdot T).$$

Aufgabe 64, S. 112

Zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungen bestehen dabei formal weitgehende Übereinstimmungen. In der Tabelle 39/2 sind verschiedene mechanische und elektrische Größen einander gegenübergestellt.

39/2

Kenngröße	mechanische Schwingung		elektrische Schwingung	
	Beispiel	Einheit	Beispiel	Einheit
Elongation	y; α	cm; Grad	u; i	V; A
Amplitude	y_{max}; α_{max}	cm; Grad	u_{max}; i_{max}	V; A
Periode	T	s	T	s
Frequenz	f	s^{-1}	f	s^{-1}

Wechselstrommaschinen

Generator. Spannungen können induziert werden, indem man eine Leiterschleife in einem konstanten Magnetfeld dreht oder die Magnetfeldstärke in einer ruhenden Schleife ändert. Entsprechend sind zwei verschiedene Wege zur Erzeugung eines Wechselstromes möglich (Bild 40/1):

1. Eine Leiterschleife dreht sich in einem Magnetfeld.
2. Ein Magnetfeld kreist zwischen feststehenden Leiterschleifen.

Die subjektive Anwendung der physikalisch-objektiven Induktionsgesetze durch den Menschen in der Praxis führt somit auf zwei technisch verschiedene Varianten.

Wechselstromgeneratoren benötigen zur Erzeugung des Magnetfeldes Gleichstrom, der von einer besonderen Gleichspannungsquelle geliefert werden muß. Wird der Gleichstrom feststehenden Wicklungen (Stator) zugeführt und die induzierte Wechselspannung über zwei Schleifringe dem rotierenden Schleifensystem (Rotor) entnommen, spricht man von einer **Außenpolmaschine** (Bild 40/1). Eine **Innenpolmaschine** (Bild 40/1) liegt vor, wenn man das Magnetfeld im drehbaren Rotor erzeugt und die induzierte Wechselspannung am Stator abgreift. Das Rotorfeld einer Innenpolmaschine (Bild 40/2) wird gedreht. Dabei ändert sich der magnetische Fluß durch die Statorspulen periodisch, und es wird eine Wechselspannung induziert. Die dabei aufgewendete mechanische Energie wird durch die Induktion in elektrische Energie eines Wechselstroms umgewandelt.

Motor. Ein Wechselstromgenerator kann im Prinzip auch als Motor betrieben werden, wenn die Statorwicklung mit Wechselstrom und die Rotorwicklung mit Gleichstrom beschickt werden (Synchronmotor). Die Pole des Stators wechseln im Rhythmus des Wechselstroms ihre Polarität und ziehen den Rotor entsprechend an. Die Drehgeschwindigkeit des Rotors ist somit durch die Frequenz des Wechselstroms bestimmt.

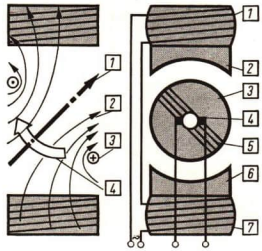
Neben den Synchronmotoren werden vielfach *Reihenschlußmotoren* (Wechselstrom-Asynchron-Motor) verwendet (Bild 40/3).

Bei einem solchen Motor sind Rotorwicklung (1) und Statorwicklung (2) in Reihe geschaltet (Bild 41/1). Derartige Motoren haben ein hohes Anzugsvermögen und ihre Drehzahl ist einstellbar.

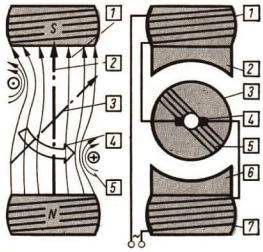
● *Beschreiben Sie das Zusammenwirken von Statorfeld und Rotorfeld (Bild 40/3) in den einzelnen Etappen!*



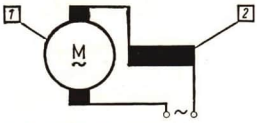
40/1
Außenpol-, Innenpolmaschine



40/2
1 Richtung des Rotorfeldes
2 Rotorfeldlinien
3 Rotorspule
4 Drehbewegung
1, 7 Statorspulen
2, 6 Polschuh
3 Rotor
4 Schleifkontakt (Stromzuführung)
5 Rotorspule



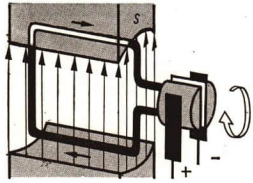
40/3
1 Statorfeld
2 Richtung des Statorfeldes
3 Richtung des Rotorfeldes
4 Drehbewegung
5 Rotorfeld
1, 7 Statorspulen
2, 6 Polschuh
3 Rotor
4 Schleifkontakte
5 Spule des Rotors



41/1 Schaltbild eines Wechselstrom-Reihenschlußmotors

Bei der Reihenschaltung von Statorwicklung und Rotorwicklung wechselt der Wechselstrom seine Richtung immer gleichzeitig in beiden Wicklungen des Motors. Dadurch wird auch die Polarität des Statorfeldes und des Rotorfeldes gleichzeitig gewechselt, so daß hierdurch keine Störung der Drehbewegung eintritt.

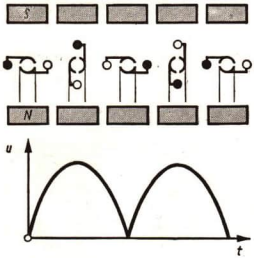
Kollektorgleichrichter



41/2 Gleichstromgenerator mit einer Rotorschleife und Kollektor

Wechselstrom ist für bestimmte technische Produktionsverfahren (Galvanotechnik) und den Betrieb mancher Einrichtungen (Straßenbahn, Felderzeugung in Drehstromgeneratoren und so weiter) wegen der periodischen Änderung der Stromrichtung ungeeignet. In solchen Fällen wird der Wechselstrom in *Gleichstrom* umgewandelt.

Gleichstromgeneratoren arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Wechselstromgeneratoren. Ein Unterschied besteht nur darin, daß die Schleifringe des Wechselstromgenerators beim Gleichstromgenerator durch einen *Kollektor* ersetzt sind. Der Kollektor hat die Aufgabe, den induzierten Wechselstrom gleichzurichten. Das Modell eines Gleichstromgenerators mit einem Kollektor aus zwei Lamellen zeigt Bild 41/2. Der Zusammenhang zwischen der jeweiligen Lage der rotierenden Leiterschleife und der induzierten Gleichspannung ist in Bild 41/3 grafisch dargestellt.

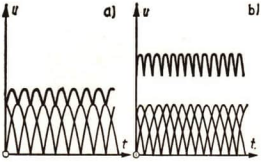


41/3 Spannungsgleichrichtung durch den Kollektor (geteilter Schleifring)

Die elektrische Stromrichtung in den beiden entscheidenden Teilen der Leiterschleife wird durch ⊕ und ⊙ bezeichnet, hier durch ● und ○ angedeutet. Im ersten Fall verläuft die Stromrichtung vom Betrachter des Bildes weg, im zweiten Fall auf den Betrachter zu.

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

Um die induzierte Spannung U_i im Gleichstromgenerator zu erhöhen, wird die Windungszahl N jeder Rotorwicklung im Vergleich zur einfachen Leiterschleife vervielfacht $\left(U_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$.



41/4 a) Geglättete Gleichstromspannung bei zwei Rotorwicklungen
b) Geglättete Gleichstromspannung bei drei Rotorwicklungen

Der Rotor eines Gleichstromgenerators erhält immer mehrere Wicklungen, die jeweils in einem Lamellenpaar des Kollektors enden. Die Wicklungen werden so miteinander verbunden, daß sie alle gleichzeitig zur Erzeugung der Klemmenspannung beitragen. Die Überlagerung aller pulsierenden Gleichspannungen ergibt eine *geglättete Gleichspannung* (Bild 41/4).

Gleichstrommaschinen

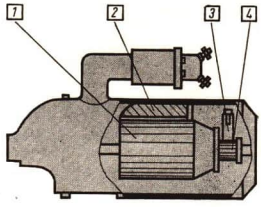
Wird ein Leiter von Gleichstrom durchflossen und in geeigneter Weise in ein Magnetfeld gebracht, so wird er mechanisch bewegt (UVW-Regel, Kl. 9, S. 57). Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt (nicht parallel zu den Feldlinien), so fließt in ihm ein Strom.

Auf Grund dieser Gesetzmäßigkeit können Gleichstrommaschinen konstruiert werden, die je nach Art der zugeführten Energie als Generator oder als Motor arbeiten.

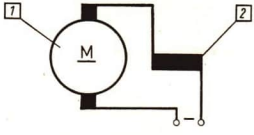
Wird eine Gleichstrommaschine mechanisch angetrieben, wirkt sie nach dem Generatorprinzip und liefert einen Gleichstrom. Legt man umgekehrt an dieselbe Gleichstrommaschine eine Gleichspannung, so arbeitet sie als Gleichstrommotor und ist in der Lage, andere Maschinen oder Geräte mechanisch anzutreiben.

Jede Gleichstrommaschine besteht im wesentlichen aus dem Rotor oder Anker (1), der Statorwicklung (2), den Bürsten (3) und dem Kollektor (4). Als Beispiel hierfür ist in Bild 42/1 ein Kfz-Anlaßmotor im Schnitt gezeigt.

Nach der UVW-Regel ist die Bewegungsrichtung eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld feststellbar. In einem Reihenschlußmotor (Bild 42/2), der in einem Gleichstromkreis liegt, ist die Drehrichtung konstruktiv festgelegt durch die Schaltung von Rotorwicklung (1) und Statorwicklung (2).



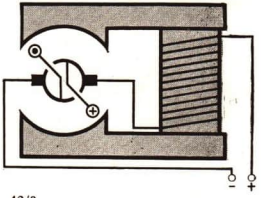
42/1 Kfz-Anlaßmotor
1 Rotor
2 Statorwicklung
3 Bürste
4 Kollektor



42/2 Schaltbild eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors (Kfz-Anlaßmotor)

● *Welche Wirkung wird durch ein Umpolen eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors erreicht?*

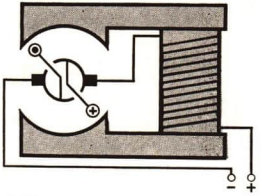
4 ▼ Aus Aufbauteilen wird ein Gleichstromreihenschlußmotor zusammengebaut!
Bestimmen Sie mit der UVW-Regel und der Regel für stromdurchflossene Spulen (rechte Hand) die Drehrichtung des Rotors im Bild 42/3!



42/3

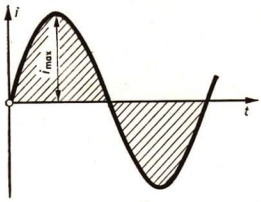
5 ▼ Der Aufbau des Reihenschlußmotors (Bild 42/4) wird so geändert, daß nur der Rotor oder nur der Stator umgepolt werden. Bestimmen Sie die Drehrichtung des Rotors und überprüfen Sie das Ergebnis im Experiment!

Da die Polarität der Spannungsquelle keinen Einfluß auf die Drehrichtung des Ankers besitzt, können Reihenschlußmotoren auch mit Wechselstrom gespeist werden. Sie können also mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom angetrieben werden. Solche Motoren heißen *Universalmotoren* und werden meist in elektrischen Haushaltsgeräten (Küchenmaschine, Staubsauger) und Elektrowerkzeugen (Bohrmaschine) verwendet.

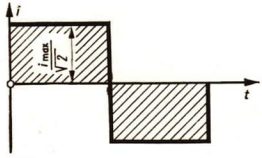


42/4

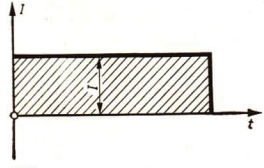
Die Effektivwerte des Wechselstroms



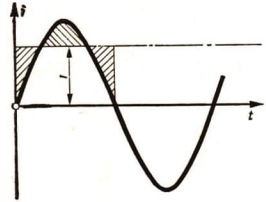
43/1



43/2



43/3



43/4

Die Stromstärke eines harmonischen Wechselstroms läßt sich nicht unmittelbar messen, da sich der Betrag der Stromstärke fortwährend ändert und die Stromrichtung in bestimmten Intervallen wechselt (Bild 43/1).
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, obwohl die Maximalwerte der Wechselspannung oder der Wechselstromstärke nicht Null sind.
Vergleichbar mit der einfach zu messenden Stromstärke eines Gleichstromes ist nur ein bestimmter Mittelwert der Wechselstromstärke. Dazu bedient man sich der Wärmewirkung eines Gleichstromes und vergleicht diese mit der Wärmewirkung eines Wechselstromes. Die Wärmewirkung eines elektrischen Stromes ist unabhängig von seiner Richtung. Ein harmonischer Wechselstrom, der während der Zeit T an beliebiger Stelle des Stromkreises durch den Leiterquerschnitt fließt (Bild 43/1), bringt den gleichen Wärmeeffekt hervor wie ein rechteckförmiger Wechselstrom mit der Amplitude $\frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$ während der beiden Halbperioden $T/2$ (Bild 43/2) oder ein entsprechender Gleichstrom mit dem Ordinatenwert $\frac{i_{max}}{\sqrt{2}} = I$ während der Zeit T (Bild 43/3). Die gesuchten Mittelwerte des harmonischen Wechselstromes (Bild 43/4) werden bezeichnet als

Effektivwert der Stromstärke $I = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$ ◀

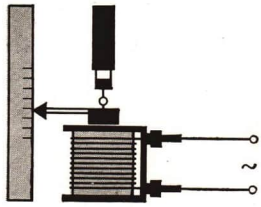
und als

Effektivwert der Spannung $U = \frac{u_{max}}{\sqrt{2}}$. ◀

Wenn im folgenden die Spannung U und die Stromstärke I des Wechselstromes genannt werden, sind stets die Effektivwerte gemeint.
Ähnlich wie die Wärmewirkung hängen auch die Lichtwirkung, die chemische Wirkung und die magnetische Wirkung des Wechselstromes von den Effektivwerten ab. Die Tatsache, daß der Betrag der magnetischen Wirkung durch die Effektivwerte des Wechselstromes bedingt wird, nutzt man bei der Konstruktion von Dreheisenmeßgeräten zur Messung der Wechselstromstärke aus. Solche Meßgeräte zeigen die Effektivwerte an.

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 44/1).

- *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?*



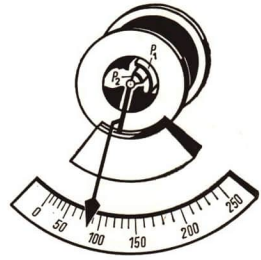
44/1

Die Wechselstromwiderstände

Der Widerstand eines Schaltelements in einem Gleichstromkreis wird bekanntlich nach der Stromstärke-Spannungs-Meßmethode bestimmt. Legt man an ein Ohmsches Schaltelement (bifilar, das heißt gegenläufig gewickelter Schiebewiderstand) statt einer Gleichspannung U eine gleichgroße Wechselspannung U, so fließt in dem Stromkreis ein Wechselstrom, dessen Wert (Effektivwert) mit dem des Gleichstroms übereinstimmt.

Das Schaltelement begrenzt also bei gleichen Spannungsbeträgen die Gleich- und Wechselströme in gleicher Weise; es gilt allgemein

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

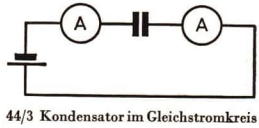


44/2 Rundspul-Dreheisenmeßgerät
Die Platten P_1 und P_2 werden gleichsinnig magnetisiert und stoßen einander ab. Die Feder für das rücktreibende Moment ist weggelassen. Wird das Gerät von einem Wechselstrom durchflossen, so zeigt das Meßsystem einen Mittelwert an. Dieser Mittelwert ist der Effektivwert des Wechselstroms

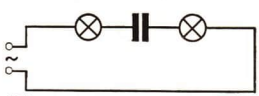
▷ **Der Widerstand eines Ohmschen Schaltelements in einem Wechselstromkreis wird als Wirkwiderstand bezeichnet.**

Im Gegensatz zu einem bifilar gewickelten Schiebewiderstand zeigt ein Kondensator in einem Wechselstromkreis ein deutlich anderes Verhalten 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 44/3). Wird eine Wechselspannung an den Kondensator gelegt, fließt in dem Stromkreis fortwährend ein Wechselstrom.

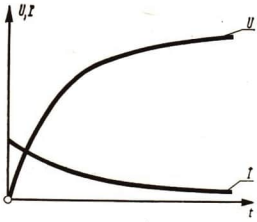
Schaltet man beispielsweise zwei Glühlampen und einen Kondensator geeigneter Kapazität hintereinander in einen Wechselstromkreis, dann glühen die Lampenwendel mehr oder weniger hell. Wird die Kapazität des Kondensators vergrößert, so steigt die Stromstärke und die Glühlampen leuchten heller (Bild 44/4). Dabei spielt sich folgender Vorgang ab: Von einer Gleichspannungsquelle werden Elektronen auf eine Platte des Kondensators befördert. Unter



44/3 Kondensator im Gleichstromkreis



44/4
Kondensator im Wechselstromkreis



45/1

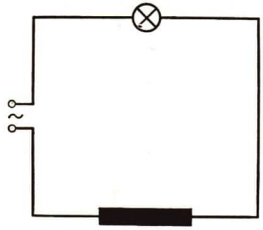
dem Einfluß der schon aufgeladenen Platte werden die elektrischen Ladungen auf der anderen, anfangs noch neutralen Kondensatorplatte durch Influenz getrennt. Hierbei fließen die negativen Ladungen (Elektronen) zur Spannungsquelle ab, die Platte selbst bleibt positiv aufgeladen. Beim Aufladen des Kondensators 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 45/1). 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. Der Richtungswechsel der Ladeströme und die sich ändernde Stromstärke führen zu einem Wechselstromfluß im Kondensatorkreis. Die Kapazität des Kondensators bestimmt dabei die effektive Stromstärke und damit den scheinbaren Wechselstromwiderstand.

Der scheinbare Widerstand eines Kondensators in einem Wechselstromkreis wird als kapazitiver Widerstand bezeichnet. ◁

Ähnlich wie ein Kondensator zeigt auch eine Spule in einem Wechselstromkreis ein anderes Verhalten als in einem Gleichstromkreis.

7 ▼

Eine 60-W-Glühlampe und eine Spule mit 1500 Windungen werden in Reihe geschaltet und an das 50-Hz-Wechselstromnetz gelegt (Bild 45/2). 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 verlischt. Würde man an Stelle der Wechselspannung eine entsprechende Gleichspannung verwenden, tritt eine solche Erscheinung nicht auf; die Glühlampe würde in beiden Fällen (Spule mit und ohne Eisenkern) unabhängig von der Induktivität mit gleicher Helligkeit leuchten.



45/2 Spule im Wechselstromkreis

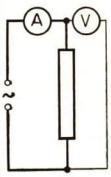
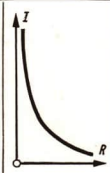
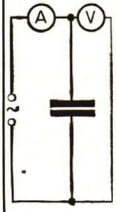
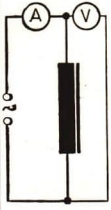
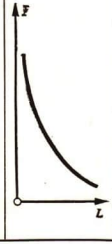
Da sich in dem Wechselstromkreis die Stromstärke fortwährend ändert, werden in der Spule nach der Lenzschen Regel auch laufend Gegenspannungen induziert. Die induzierten Spannungen wirken der Netzspannung entgegen und setzen somit die Stromstärke herab. In einem spulenförmig

gewickelten Leiter tritt neben dem Wirkwiderstand des gestreckten Leiters noch zusätzlich ein Widerstand auf.

▷ **Der zusätzlich zum Wirkwiderstand einer Spule in einem Wechselstromkreis auftretende Widerstand wird als induktiver Widerstand bezeichnet.**

Die folgende Zusammenstellung zeigt das quantitative Verhalten von Schaltelementen mit einem rein Ohmschen, rein

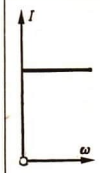
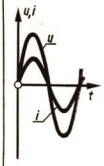
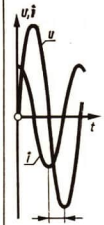
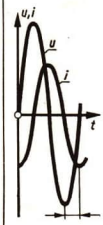
Schülerexperiment E 3, S. 124

Schaltelement	Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung		Abhängigkeit der Stromstärke vom Widerstand	
	Die Stromstärke-Spannungs-Messung an einem rein Ohmschen Schaltelement ergibt bei konstantem Widerstand und konstanter Frequenz $I \sim U$		Die Stromstärke ist bei konstanter Spannung und konstanter Frequenz dem Widerstand umgekehrt proportional $I \sim \frac{1}{R}$	
	Die Stromstärke-Spannungs-Messung an einem rein kapazitiven Schaltelement ergibt bei konstanter Kapazität und konstanter Frequenz $I \sim U$		Die Stromstärke ist bei konstanter Spannung und konstanter Frequenz der Kapazität proportional $I \sim C$	
	Die Stromstärke-Spannungs-Messung an einem rein induktiven Schaltelement ergibt bei konstanter Induktivität und konstanter Frequenz $I \sim U$		Die Stromstärke ist bei konstanter Spannung und konstanter Frequenz der Induktivität umgekehrt proportional $I \sim \frac{1}{L}$	

kapazitiven oder rein induktiven Widerstand in einem Wechselstromkreis.

Synchron schwingende Größen (Spannung, Stromstärke und so weiter) sind **phasengleich.** Die schwingenden Größen erreichen zur selben Zeit ihre entsprechenden Maximal- und Minimalwerte; die Absolutwerte können dabei unterschiedlich sein. Schwingende physikalische Größen sind **phasenverschoben,** wenn sie ihre entsprechenden Maximal- und

Schülerexperiment E 4, S. 126

Abhängigkeit der Stromstärke von der Frequenz		Gleichung für die Stromstärke	Zeitliche Verschiebung zwischen Spannungs- und Stromstärke-Kurve	
Die Stromstärke ist bei konstanter Spannung und konstantem Widerstand von der Frequenz unabhängig I = konstant		Zusammenfassend ergibt sich $I = \frac{U}{R}$ R bezeichnet man als **Ohmschen Widerstand**	Zwischen der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve besteht keine zeitliche Verschiebung. Spannung und Stromstärke schwingen synchron.	
Die Stromstärke ist bei konstanter Spannung und konstanter Kapazität der Frequenz proportional $I \sim f, \omega$		Zusammenfassend ergibt sich $I = \omega \cdot C \cdot U$ Durch Umstellung erhält man $I = \frac{U}{\frac{1}{\omega \cdot C}}$ In Anlehnung an das Ohmsche Gesetz für den Gleichstrom bildet man $I = \frac{U}{X_C}$ mit $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ X_C bezeichnet man als **kapazitiven Widerstand**	Zwischen der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve besteht (im Idealfall bei reinem X_C) eine Zeitverschiebung von $T/4$, wobei die Spannung hinter der Stromstärke zurückbleibt.	
Die Stromstärke ist bei konstanter Spannung und konstanter Induktivität der Frequenz umgekehrt proportional $I \sim \frac{1}{f}$ bzw. $I \sim \frac{1}{\omega}$		Zusammenfassend ergibt sich $I = \frac{U}{\omega \cdot L}$ In Anlehnung an das Ohmsche Gesetz für den Gleichstrom bildet man $I = \frac{U}{X_L}$ mit $X_L = \omega \cdot L$ X_L bezeichnet man als **induktiven Widerstand**	Zwischen der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve besteht (im Idealfall bei reinem X_L) eine Zeitverschiebung von $T/4$, wobei die Spannung der Stromstärke vorauseilt.	

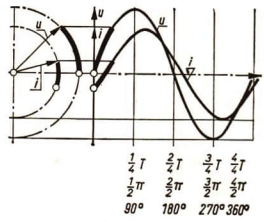
Minimalwerte zu verschiedenen Zeiten erreichen. Die Phasenverschiebung kann dabei beliebig groß sein, sie wird durch die Zeit oder den Winkel angegeben (Bild 48/1).

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. Um aber eine formale Ähnlichkeit herleiten zu können, wurde für den Wechselstromkreis der Begriff *Scheinwiderstand* $Z = U/I$ gebildet, wobei je nach Gegebenheit Z der Ohmsche Widerstand R, der kapazitive Widerstand X_C oder der induktive Widerstand X_L des jeweiligen Schaltelementes sein kann. Bei der Reihenschaltung idealer Schaltelemente mit immer nur einer Widerstandsart und auch bei der Verwendung eines einzigen realen Schaltelements mit mehreren Widerstandsarten gilt $Z^2 = R^2 + X_C^2$ bzw. $Z^2 = R^2 + X_L^2$ (Bild 48/2); im allgemeinsten Falle (Bild 48/3) ergibt sich

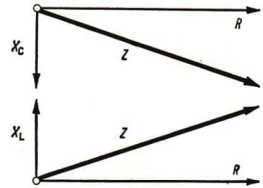
$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2.$$

Der kapazitive Widerstand und der induktive Widerstand stellen *Blindwiderstände* dar. Im Gegensatz zum Wirkwiderstand wird durch die Blindwiderstände keine elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt; überhaupt entziehen die Blindwiderstände dem Stromkreis keinerlei Energie, da die im elektrischen Feld des Kondensators und im Magnetfeld der Spule gespeicherte und dem Stromkreis zunächst entnommene elektrische Energie nach Abschaltung der Spannung wieder in den Stromkreis zurückgegeben wird.

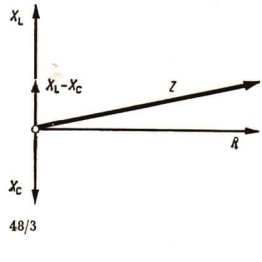
▷ **In einem Wechselstromkreis ist das Quadrat des Wirkwiderstandes plus dem Quadrat der vektoriell addierten Blindwiderstände gleich dem Quadrat des Gesamtwiderstandes.**



48/1 Phasenverschobene schwingende Größen (u, i)

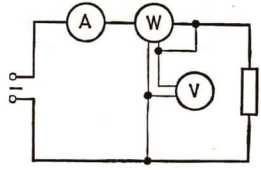


48/2



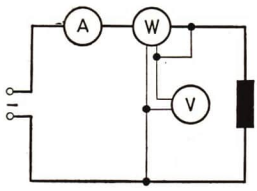
48/3

48/4



Arbeit und Leistung des Wechselstroms

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, in einem Akkumulator hauptsächlich in chemische Energie. Für die elektrische Energie oder Arbeit in einem Gleichstromkreis gilt:



49/1

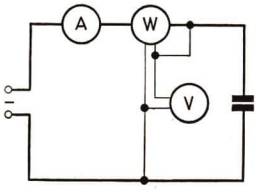
Elektrische Energie $W = U \cdot I \cdot t$ ◁

Elektrische Leistung $P = U \cdot I$

Mit Hilfe eines Stromstärkemeßgerätes und eines Spannungsmeßgerätes läßt sich die elektrische Leistung in einem Gleichstromkreis experimentell bestimmen.

8

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

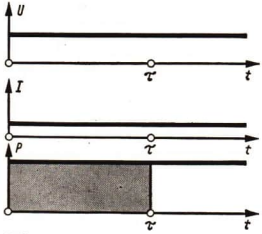


49/2

Um die elektrische Leistung in einem Wechselstromkreis 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 48/4 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.

9

Wird das Schaltelement (Bild 48/4) mit einem Ohmschen Widerstand durch eine Spule (Bild 49/1) ersetzt, so tritt wiederum völlige Übereinstimmung auf. Legt man einen Kondensator (Bild 49/2) in den Stromkreis, so ist die Leistung Null, da der Kondensator den Stromfluß faktisch unterbricht. ▼



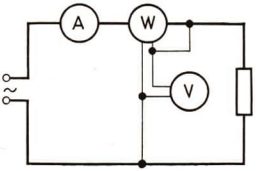
49/3

Trägt man die Spannung und die Stromstärke in einem Koordinatensystem jeweils in Abhängigkeit von der Zeit grafisch auf und bildet für jeden Augenblick $t = \tau$ das Produkt $U_\tau \cdot I_\tau$, so erhält man als Leistungs-Zeit-Darstellung eine Gerade parallel zur Zeitachse, das heißt die Leistung in einem Gleichstromkreis ist bei gleichbleibender Spannung und Stromstärke konstant. Die graue Fläche in Bild 49/3 ist ein Maß für die elektrische Energie.

49/4

10

Ersetzt man im Versuch 9 die Gleichspannungsquelle durch eine Wechselspannungsquelle (Bild 49/4), so sind wegen der Periodizität der Spannung und des Stromes andere Ergebnisse als beim Gleichstrom zu erwarten. In den Wechselstromkreis wird zunächst ein Schaltelement mit einem Ohmschen Widerstand gelegt; Stromstärke und Spannung sind hierbei in Phase. Bildet man auf Grund einer Stromstärke-Spannungs-Messung das Produkt aus U und I und vergleicht es mit dem vom Leistungsmesser angezeigten Effektivwert P, so stimmen beide Werte überein. ▼



Effektivleistung $P = U \cdot I$ ◀

Die Konstruktion der Leistungskurve für einen Wechselstromkreis mit einem Ohmschen Widerstand führt auf einen zeitlich periodischen Leistungsverlauf. Im Gegensatz zur Gleichstromleistung schwankt die Wechselstromleistung rhythmisch zwischen zwei Extremwerten (Bild 50/1). Rechnerisch ergibt sich:

$$P = u_{max} \cdot \sin\omega \cdot t \cdot i_{max} \cdot \sin\omega \cdot t$$

$$P = u_{max} \cdot i_{max} \cdot \sin^2\omega \cdot t$$

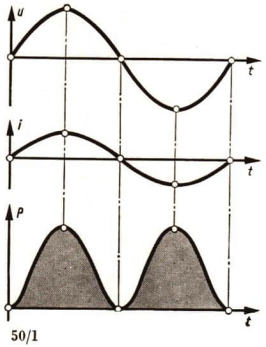
oder auf die Effektivwerte bezogen:

$$P = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\omega \cdot t \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\omega \cdot t = 2\ U \cdot I \cdot \sin^2\omega \cdot t.$$

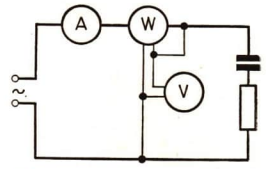
● *Welche physikalische Bedeutung hat die schraffierte Fläche in Bild 50/1?*

11

▼ In einem Wechselstromkreis werden ein Schaltelement mit einem Ohmschen Widerstand und ein Kondensator mit einem bestimmten kapazitiven Widerstand in Reihe geschaltet (Bild 50/2). Der vom Leistungsmesser angezeigte Wert ist kleiner als das Produkt aus U und I.



50/1



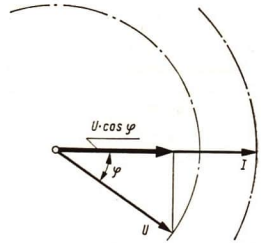
50/2

Das aus 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). Der Unterschied zwischen Wirkleistung und Scheinleistung ist durch die Phasenverschiebung φ zwischen Stromstärke und Spannung bedingt (Bild 50/3).

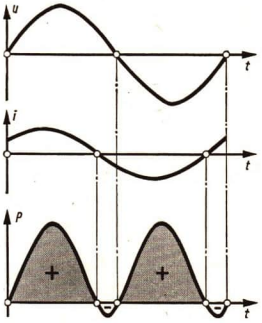
▶ **Die Wirkleistung ist gleich dem Produkt aus Scheinleistung und einem Leistungsfaktor.**

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

Der Leistungsfaktor oder Wirkfaktor ist bei sinusförmigen Spannungen und Stromstärken gleich $\cos\varphi$, bei anderen Kurvenformen ist er ein Zahlenfaktor.
Bildet man für $\cos\varphi = 1$ an Hand der Spannungs-Zeit-Kurve und der Stromstärke-Zeit-Kurve für jeden Augenblickswert $t = \tau$ das Produkt aus Spannung und Stromstärke, so erhält man eine Leistungskurve, die zum Teil über der Zeitachse und zum Teil unter der Zeitachse liegt. In dem Zeitintervall, in dem 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 Zeitspanne dagegen, in der die Kurve unterhalb der Zeitachse liegt und der Flächeninhalt zwischen Leistungskurve und Zeitachse negativ ist, fließt mit dem Zusammenbrechen des elektrischen Feldes im Kondensator elektrische Energie aus dem Stromkreis in die Spannungsquelle zurück. Die von der Spannungsquelle



50/3 Spannung und Stromstärke sind nicht in Phase



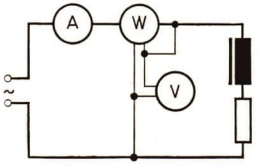
51/1

abgegebene Energie während einer Periode ist durch die Flächendifferenz der schraffierten „plus"-Fläche und der schraffierten „minus"-Fläche gegeben (Bild 51/1). Ähnlich wie bei einem Kondensator liegen die Verhältnisse bei einer Spule mit ihrem induktiven und ihrem Ohmschen Widerstand (Bild 51/2). Der Energierückfluß zur Spannungsquelle wird hier durch den jeweiligen Zusammenbruch des Magnetfeldes der Spule hervorgerufen.

Die zum Aufbau magnetischer oder elektrischer Felder benötigte und nach jeweils einer Halbperiode $T/2$ bei Zusammenbrechen der Felder wiedergewonnene Leistung bezeichnet man als Blindleistung.

Die Blindleistung ist gleich dem Produkt aus Scheinleistung und einem Blindfaktor.

$$P_B = P_S \cdot \sin\varphi$$
$$P_B = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

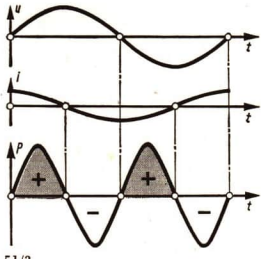


51/2

Der Blindfaktor ist bei sinusförmigen Spannungen und Stromstärken gleich $\sin\varphi$.

Ähnlich wie der Schein-, Wirk- und Blindwiderstand können auch die Schein-, Wirk- und Blindleistung in einem Zeigerbild dargestellt werden.

Beweisen Sie an Hand einer Zeigerdarstellung, daß $P_S^2 = P_W^2 + P_B^2$ *gilt!*



51/3

Liegt in einem Wechselstromkreis lediglich ein Kondensator mit einem rein kapazitiven Widerstand, dann beträgt die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung 90°. Die entsprechende Leistungskurve ist im Bild 51/3 dargestellt.

Diskutieren Sie die Leistungskurve nach Bild 51/3!

Es sei angenommen, daß eine Wechselspannungsquelle mit einem rein induktiven Widerstand belastet wird. Auch in diesem Fall ist der Absolutbetrag der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung 90°.

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!

Die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung spielt in der Praxis eine außerordentlich große Rolle. Bei der Belastung eines Stromversorgungsnetzes bemüht man sich, die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung möglichst klein zu halten, um damit Blindströme und Blindleistungen zu vermeiden.

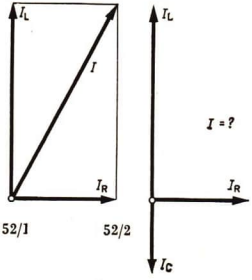
● *Welche Bedeutung hat der Blindstrom für den Stromdurchgang durch einen elektrischen Leiter und für die Leistungsabgabe eines Generators?*

Blindströme und Blindleistungen belasten in recht unökonomischer Weise die Generatoren der Kraftwerke.

▷ **Eine wirtschaftliche Energieübertragung ist nur dann gegeben, wenn der Leistungsfaktor mindestens den Wert 0,8 erreicht.**

Um die Generatoren und Leitungen von Blindströmen zu entlasten, müssen Phasenkompensationen durchgeführt werden. Den Schaltelementen (z. B. Wechselstrommotoren), die eine Phasenverschiebung hervorrufen, werden solche Schaltelemente parallel geschaltet, die eine Phasenverschiebung im entgegengesetzten Sinne bewirken und somit die Phasenverschiebung im Gesamtnetz durch Stromüberlagerung aufheben.

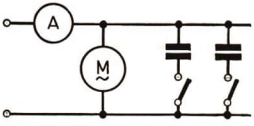
Die Zeigerdarstellung in Bild 52/1 verdeutlicht (für einen Augenblickswert) die Stromüberlagerung eines Wirkstromes I_R und eines Blindstromes I_L zum resultierenden Scheinstrom I. Wird zusätzlich ein Blindstrom I_C erzeugt (Bild 52/2), verkleinert sich entsprechend die Scheinstromstärke I.



52/1 52/2

12

▼ Dem Hauptschlußmotor, der die Phasenverschiebung im Netz bewirkt, werden Kondensatoren geeigneter Kapazität parallel geschaltet (Bild 52/3); bei einer geeigneten Anpassung der Kondensatoren wird die Phasenverschiebung kompensiert, und die Stromstärke I sinkt auf ein Minimum ab.



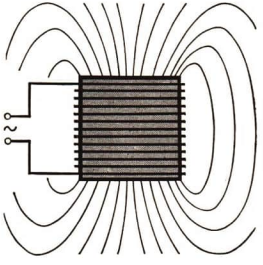
52/3

Der Transformator

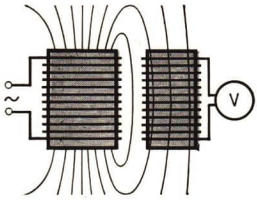
Zur Zeit wird im allgemeinen die Energieversorgung mit Wechselstrom der Energieversorgung mit Gleichstrom vorgezogen, da die Spannungen oder Stromstärken mit Hilfe von Transformatoren den technischen Bedürfnissen leicht angepaßt werden können.

Aufbau und Wirkungsweise des Transformators. Schickt man Wechselstrom durch eine Spule, so entsteht im Raum um die Spule herum ein magnetisches Wechselfeld (Bild 52/4). 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 53/1), dann wird in der zweiten Spule eine Wechselspannung induziert. Das magnetische Feld ist ein Kopplungsglied (↗ S. 19). Die elektrische Energie wird auf die zweite Spule übertragen. Die magnetische Kopplung

52/4

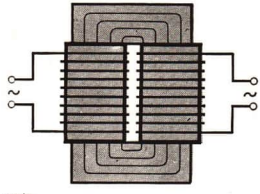


läßt sich verstärken, wenn man beide Spulen auf einen geschlossenen Eisenkern bringt (Bild 53/2). Das von der stromdurchflossenen Spule erzeugte magnetische Feld besteht jetzt fast ausschließlich innerhalb des geschlossenen Eisenkerns, und nahezu der gesamte magnetische Fluß durchsetzt die zweite Spule. Eine solche Vorrichtung aus Eisenkern und zwei Spulen bezeichnet man als **Transformator.**



53/1

Die Spule auf der Eingangsseite wird als Primärspule bezeichnet, die Spule auf der Ausgangsseite heißt Sekundärspule. Der Energiefluß zwischen Primär- und Sekundärspule wird durch das magnetische Wechselfeld hervorgerufen, eine galvanische Verbindung zwischen den Spulen besteht bei dieser Transformatorenform nicht. Die Primär- und Sekundärspannung bzw. die Primär- und Sekundärstromstärke haben die gleiche Frequenz.



53/2

Der ideale Transformator

Spannungsübersetzung. Ist bei einem Transformator die Windungszahl N_2 der Sekundärspule größer als die Windungszahl N_1 der Primärspule, so ist auch die Sekundärspannung U_2 höher als die Primärspannung U_1 (Bild 53/4). Versuche ergeben, daß das Spannungsverhältnis nur vom Verhältnis der Windungszahlen beider Spulen abhängt. Die Abolutwerte der Spannungen haben keinen Einfluß auf das Spannungsverhältnis.

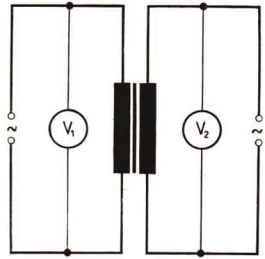


53/3 Schaltzeichen eines Transformators

Überprüfen Sie diese Aussage experimentell an selbstgewählten Beispielen! Der Transformator muß dabei unbelastet sein, d. h. im Leerlauf betrieben werden.

Wählt man die Windungszahl N_2 der Sekundärspule kleiner als die Windungszahl N_1 der Primärspule, so wird auch die Sekundärspannung U_2 im Vergleich zur angelegten Primärspannung U_1 niedriger.

53/4



Wie hoch ist die Sekundärspannung im Vergleich zur Primärspannung, wenn die Primärspule und die Sekundärspule gleiche Windungszahlen haben? Überprüfen Sie ihre Überlegungen durch ein Experiment!

Die angelegte Primärspannung U_1 erzeugt einen Primärwechselstrom, der eine Änderung des magnetischen Flusses im geschlossenen Eisenkern des Transformators hervorruft. Nach dem Induktionsgesetz besteht die Beziehung $U_1 = N_1 \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$. Durch die in der Primärspule erzeugte Änderung des magnetischen Flusses Φ wird in der Sekun-

därspule eine Sekundärspannung $U_2 = N_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ induziert.

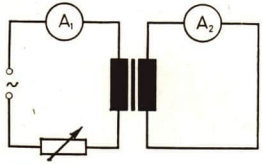
Durch formales Gleichsetzen von $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ erhält man in Übereinstimmung mit dem Experiment eine Gleichung für das

▶ **Spannungsverhältnis (Leerlauf)** $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

Den Quotienten aus der Windungszahl der Oberspannungsseite zur Windungszahl der Unterspannungsseite nennt man das **Übersetzungsverhältnis** des Transformators. Dabei ist es gleichgültig, ob die Primärseite oder die Sekundärseite Oberspannungsseite ist.

Stromstärkeübersetzung. Da sich die Spannungen durch Transformatoren herauf- und heruntersetzen lassen, ist auf Grund des Energieerhaltungssatzes anzunehmen, daß sich mit den Spannungen auch gleichzeitig die Stromstärken ändern. Diese Vermutung kann experimentell überprüft werden. Dabei muß im Gegensatz zum Bild 53/4 ein sekundärseitig kurzgeschlossener Transformator verwendet werden, damit ein Strom fließt.

13 ▼ Die Sekundärspule des Transformators ist mit dem Stromstärkemeßgerät A_2 (Bild 54/1) 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.



54/1

Faßt man das Versuchsergebnis zusammen, so findet man die Gleichung für das

▶ **Stromstärkenverhältnis (Kurzschluß)** $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$

Dieser Sachverhalt kann auch durch die Amperewindungszahl (Produkt aus Stromstärke und Windungszahl) wie folgt ausgedrückt werden:

Bei einem idealen Transformator ist die Amperewindungszahl $I_1 \cdot N_1$ auf der Primärseite gleich der Amperewindungszahl $I_2 \cdot N_2$ auf der Sekundärseite.

Im Transformator erfolgt eine Energieübertragung vom elektrischen Feld des Primärstromkreises zum magnetischen Feld als Kopplung und von da zum elektrischen Feld des Sekundärstromkreises. Beim idealen Transformator erfolgt die Übertragung der Energie verlustlos, so daß man schreiben kann:

▶ **Transformatorgleichung (idealer Transformator)** $I_1 \cdot U_1 = I_2 \cdot U_2$

Der Wirkungsgrad der Transformators

Die Transformatorgleichung läßt sich in der Praxis nur näherungsweise realisieren. Jeder Transformator zeigt bestimmte Leistungsverluste, die sich auf die Stromstärke- und Spannungsübersetzung auswirken. Es gilt nämlich auf Grund des Energieerhaltungssatzes

$$I_1 \cdot U_1 \cdot \cos\varphi_1 = I_2 \cdot U_2 \cdot \cos\varphi_2 + P_v,$$

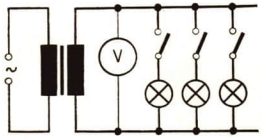
wobei P_v die Leistungsverluste im Transformator sind.
Die Leistungsverluste setzen sich zusammen aus:

Stromwärmeverlust, hervorgerufen durch den Ohmschen Widerstand,

Induktionsverlust, hervorgerufen durch Induktion (Ummagnetisierung, Wirbelströme, Feldstreuung).

Durch geeignete Wahl der Werkstoffe (Dynamobleche), durch Blätterung der Eisenkerne, durch zweckmäßige Wicklung der Spulen usw. können die Verluste in bestimmten Grenzen gehalten werden.
Die Wirbelströme sind Induktionsströme, die durch das magnetische Wechselfeld im Eisenkern entstehen.

Beschreiben Sie den räumlichen Verlauf der Wirbelstrombahnen im Eisenkern! Wie wirkt sich die Blätterung der Eisenkerne auf die Wirbelstrombildung aus?

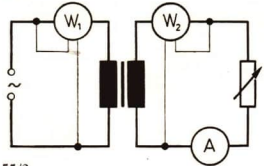


55/1

Für den Techniker und den Betriebsökonomen haben die Spannungskonstanz bei zunehmender Belastung eines Transformators und der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Belastung größte Bedeutung. Belastet man einen Transformator, so fällt die Sekundärspannung trotz des konstant bleibenden Übersetzungsverhältnisses ab.

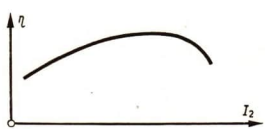
14

Schaltet man nacheinander die einzelnen Glühlampen in den Sekundärkreis, geht der Ausschlag des Spannungsmeßgerätes jeweils um einen bestimmten Betrag zurück, und die Helligkeit der Glühlampen nimmt entsprechend ab (Bild 55/1).



55/2

Das Absinken der Sekundärspannung bei zunehmender Belastung (Sekundärstromstärke) wirkt sich auf den Wirkungsgrad des Transformators aus. Der Wirkungsgrad eines Kleintransformators kann durch direkte Leistungsmessungen ermittelt werden (Bild 55/2).
Der Quotient aus sekundärseitiger Wirkleistung und primärseitiger Wirkleistung ergibt den



55/3

Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

Versuche zeigen, daß der Wirkungsgrad bei einer bestimmten Sekundärstromstärke ein Maximum annimmt (Bild 55/3).

Fragen und Aufträge 63 bis 90, S. 112
Versuche 19 bis 23, S. 118

Anwendungsbeispiele zum Transformator

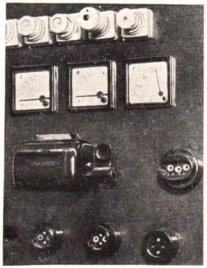
Meßwandler. Sie dienen zur Erweiterung des Meßbereichs und zur Trennung der Niederspannungsmeßschaltung vom Hochspannungsnetz. Sie werden zumeist bei Stromstärken $I > 200$ A und bei Spannungen $U > 600$ V angewendet.

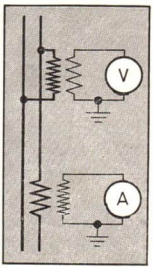
Widerstandsschweißung. Auch bei Schweißmaschinen wird das Transformatorprinzip angewendet. Zwei Werkstückteile werden zusammengepreßt und in den Sekundärkreis eines Transformators gelegt.

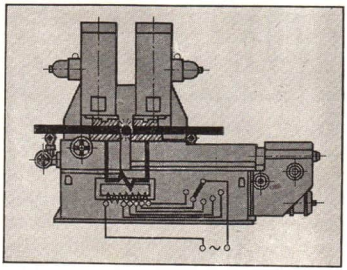
An der Berührungsstelle besteht ein sehr hoher Übergangswiderstand, der bei Stromfluß zu einer starken Erwärmung und Verschmelzung der Teile führt. Hierbei treten Stromstärken von etwa 10000 A auf.

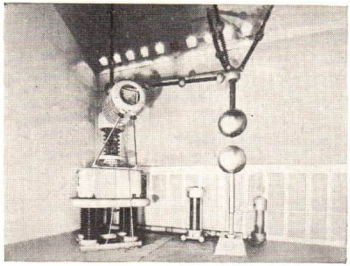
Prüftransformator. Mit den Prüftransformatoren werden Hochspannungen erzeugt. Mit diesen hohen Spannungen überprüft man beispielsweise Wicklungsmaterial und Isolierstoffe auf elektrische Durchschlagfestigkeit.

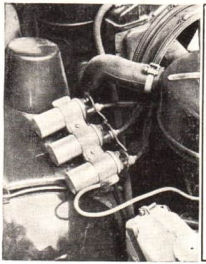
Zündspule. Die Zündspule eines Kraftfahrzeuges ist ein Transformator. Sie liefert die hohe Spannung von etwa 12000 V zum Funkenüberschlag zwischen den Elektroden der Zündkerze bei einer Primärspannung von 6 V.

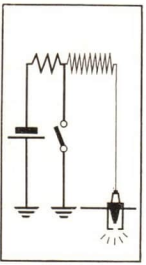








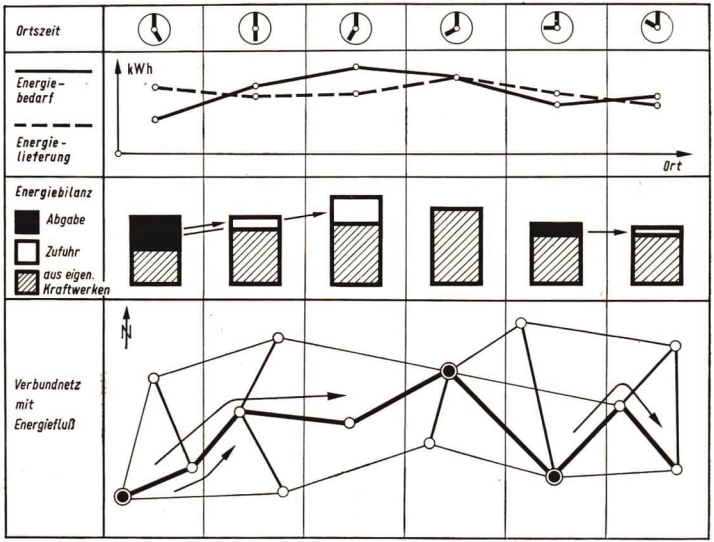




Verbundsystem der sozialistischen Staaten

Die Energieübertragung in Hochspannungsfreileitungen ist ohne Transformator nicht denkbar. In den oftmals sehr langen Freileitungen können große Spannungsabfälle bzw. 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. Das ist bei einer bestimmten Leistung nur möglich, wenn man den Wechselstrom mit hoher Spannung (220 kV, 380 kV) fortleitet und erst beim Energieabnehmer auf die notwendige Betriebsspannung herabsetzt.

Um die Elektroenergieversorgung eines Landes vor Störungen zu schützen, werden die Versorgungsnetze der Kraftwerke zu einem **Verbundnetz** vereinigt. Fällt ein Kraftwerk oder ein Leitungsabschnitt aus, dann können andere Kraftwerke die Versorgung mit übernehmen, oder der Strom wird über andere Leitungsabschnitte dem Energieabnehmer zugeführt. Neben derart technischen Erwä-

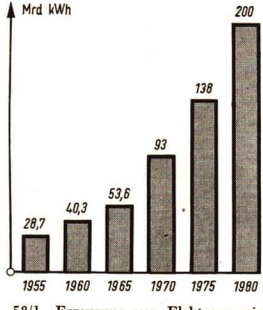


57/1 Prinzip eines Verbundnetzes

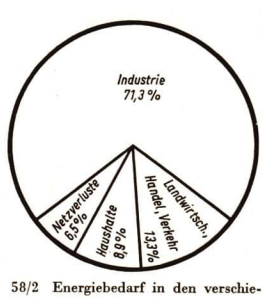
gungen spielen auch ökonomische Belange eine große Rolle. Durch das Zusammenschalten werden die einzelnen Kraftwerke wirtschaftlicher ausgenutzt. Im Bedarfsfalle können weitentlegene Kraftwerke zur Energiedeckung beitragen. Der Bau einer Fernleitung von 500 km Länge mit einer Übertragungsleistung von 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. Um die wirtschaftliche und politische Einheit zu stärken, 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.

Elektrifizierung und Volkswirtschaft

In einem hochindustrialisierten Land wie die DDR werden an die Versorgung der Industrie und Landwirtschaft 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 Haushaltungen erfordern immer mehr Elektroenergie. Einen besonders hohen Eigenbedarf an elektrischer Energie hat die chemische Industrie, die eine Schlüsselstellung in der Volkswirtschaft der DDR einnimmt. Mit dem weiteren Ausbau solcher energieintensiven Betriebe wie dem Erdölverarbeitungswerk Schwedt, dem Werk Leuna II, dem Chemiefaserkombinat in Wilhelm-Pieck-Stadt Guben und so weiter steigt der Bedarf an Elektroenergie weiter an.
Die Deutsche Demokratische Republik gehört in der Pro-Kopf-Erzeugung von Elektroenergie zu den führenden Staaten der Welt; sie übertrifft Industrieländer wie Frankreich, Westdeutschland, Italien, die CSSR und Österreich. Die jährliche Zuwachsrate bei der Erzeugung von Elektroenergie beträgt für die DDR etwa 8%.



58/1 Erzeugung von Elektroenergie in der DDR



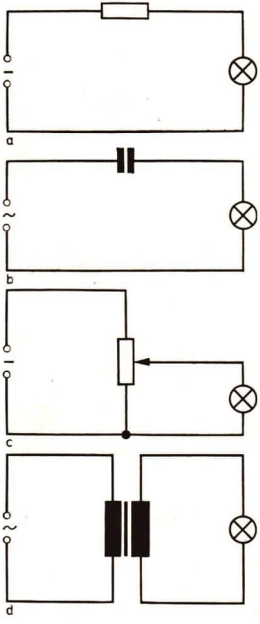
58/2 Energiebedarf in den verschiedenen Wirtschaftszweigen

Ein wesentlicher Vorzug des Wechselstroms gegenüber dem Gleichstrom besteht darin, daß Spannung und Stromstärke mit Hilfe von Transformatoren leicht geändert werden können. Solche einfachen Möglichkeiten bestehen für den Gleichstrom nicht.

Ein Nachteil des Wechselstroms gegenüber dem Gleichstrom besteht darin, daß bei bestimmten Schaltelementen neben dem Ohmschen Widerstand auch kapazitive und induktive Widerstände auftreten und demzufolge eine Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung hervorrufen. Die Phasenverschiebung bewirkt, daß in den Leitungen neben dem Wirkstrom zusätzlich ein bestimmter Blindstrom fließt und einen größeren Querschnitt der Leitungsdrähte notwendig macht. Wird der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ kleiner als 0,8, so ist die Energieübertragung durch Wechselstrom nicht mehr wirtschaftlich. Darum versucht man auch, die Phasenverschiebung durch geeignete Maßnahmen zu kompensieren.

Stimmen eine Gleichspannung und eine Wechselspannung bezüglich ihrer Meßwerte überein, so ist zu beachten, daß beim Wechselstrom die Scheitelspannung um den Faktor $\sqrt{2}$ höher liegt als die gemessene Effektivspannung. Daraus resultiert, daß die Isolierung für Wechselspannungssysteme für eine höhere Spannung ausgelegt sein müssen als für die entsprechenden Gleichspannungsleitungen.

Um wieviel Volt liegt die Scheitelspannung einer 220-kV-Wechselstromfreileitung über der Spannung einer 220-kV-Gleichstromfreileitung?



59/1 Stromstärke- und Spannungsbegrenzung

Muß in einer Versuchsanordnung die Spannung oder die Stromstärke begrenzt werden, so geschieht das in Gleichstromkreisen durch Spannungsteiler oder Vorschaltwiderstände.

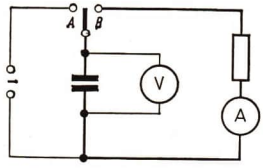
In den Spannungsteilern und in den Vorschaltwiderständen können unter Umständen erhebliche Wärmeverluste auftreten. Beim Wechselstrom dagegen können Stromstärke- und Spannungsanpassungen mit Hilfe von Transformatoren verlustarm erreicht werden; Stromstärken lassen sich in einfacher Weise auch durch Kondensatoren fast wattlos begrenzen.

Diskutieren Sie die Versuchsanordnungen nach Bild 59/1a bis d! Berechnen Sie den Wirkungsgrad der Versuchsanordnungen unter Verwendung selbstgewählter Zahlenbeispiele! Führen Sie entsprechende Versuche durch!

Der elektrische Schwingkreis

Beim elektrischen Wechselstrom war unter anderem der Auf- und Abbau magnetischer Felder in Spulen und elektrischer Felder in Kondensatoren besprochen worden. Die Veränderung dieser Felder ging dabei mit 50 Hz für technische Zwecke verhältnismäßig langsam vor sich. Gelingt es aber, die Frequenz dieser Stromwechsel wesentlich zu erhöhen, dann treten völlig neue und für die moderne Technik höchst bedeutungsvolle Eigenschaften in Erscheinung.

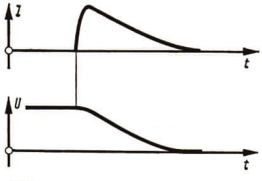
Die im Wechselstromkreis auftretenden sinusförmigen Veränderungen der Stromstärke kann man als elektrische Schwingungen auffassen, bei denen sich magnetische und elektrische Felder periodisch ändern.



60/1

Jedes schwingfähige System enthält Bauelemente, die Energie speichern können; im Bereich der elektrischen Erscheinungen sind das Spulen und Kondensatoren.

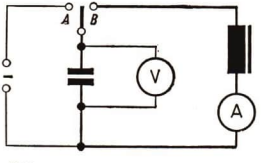
Der Einfluß dieser Bauelemente auf den Elektronenstrom in einem Stromkreis soll untersucht werden.



60/2

15 ▼ Ein Kondensator wird nach dem Aufladen mit einem Ohmschen Widerstand in einen Stromkreis geschaltet (Bild 60/1). Der Zeiger des Stromstärkemeßgerätes geht nach dem Ausschlag gleichmäßig zurück, der Zeiger des Spannungsmeßgerätes zeigt einen dem Stromstärkeabfall ähnlichen Verlauf des Spannungsabfalls an.

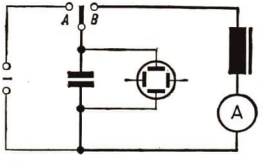
Ergebnis: Die Entladung des Kondensators führt zu keiner Schwingung im Stromkreis (Bild 60/2).



60/3

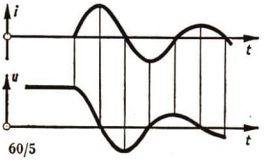
16 ▼ Ein Kondensator wird nach dem Aufladen mit einer Induktionsspule in einen Stromkreis geschaltet (Bild 60/3). Die Zeiger der Meßgeräte pendeln um ihre Ruhepunkte. Die Geräte zeigen einen Wechselstrom mit niedriger Frequenz an.

17 ▼ Schaltet man einen Oszillographen in den Stromkreis (Bild 60/4,) dann wird das Spannungs-Zeit-Diagramm auf dem Bildschirm sichtbar. Die Veränderung der elektrischen Größen Spannung und Stromstärke stellen einen Wechselstrom dar.



60/4

Die Versuche 16 und 17 bestätigen: In einem Stromkreis, bestehend aus Kondensator, Verbindungleitern und Induktionsspule, treten elektrische Schwingungen auf (Bild 60/5). Man bezeichnet solch einen Stromkreis als **Schwingkreis.**



60/5

Elektrische Vorgänge im Schwingkreis

Zu Beginn einer elektrischen Schwingung ist der Kondensator aufgeladen. In diesem Zustand ist in ihm elektrische Energie gespeichert. Diese Energie wird bei der Entladung

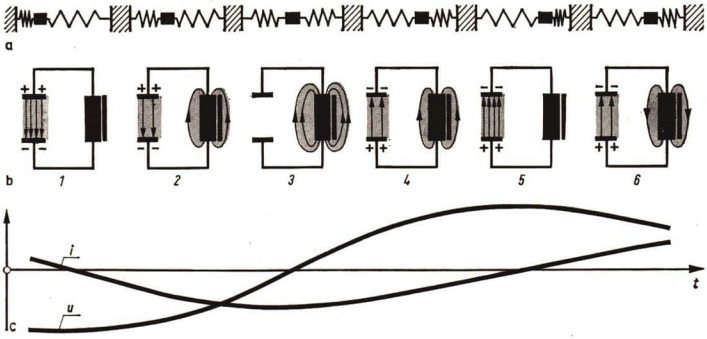
über einen Ohmschen Widerstand im wesentlichen in Wärmeenergie umgewandelt, die der Elektronenstrom in den Leitern des Stromkreises erzeugt. Bei Vorhandensein eines induktiven Widerstandes im Stromkreis jedoch wird der größte Teil der im Kondensator gespeicherten Energie mit dem Anwachsen des Entladestromes in magnetische Feldenergie der Spule umgewandelt. Die nunmehr in der Spule gespeicherte Energie wandelt sich wieder in elektrische Energie des sich neu aufladenden Kondensators um, und zwar aus folgendem Grunde:

Jede Änderung der Stromstärke verursacht in der Spule eine Spannung, die der Änderung entgegenwirkt (Lenzsche Regel). Das bedeutet, daß zu Beginn des Entladevorgangs, das heißt, wenn der Entladestrom anwächst, die Zunahme der Stromstärke verzögert wird. Das bedeutet aber ferner, daß, wenn der Kondensator fast entladen ist und die Stromstärke wieder abnimmt, nun diese Abnahme durch die Spule verzögert wird. 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.

Der Körper des Federschwingers, der in Bild 61/1a dem elektrischen Schwingkreis (Bild 61/1b) zum Vergleich gegenübergestellt ist, bewegt sich infolge seiner Trägheit durch die Null-Lage hindurch, in der er ohne Vorhandensein träger Masse zur Ruhe kommen müßte, weil sich dann in diesem Punkt die antreibenden Kräfte aufheben.

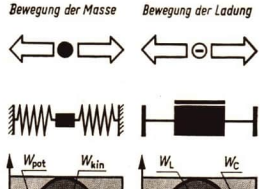
61/1



Elektrische und magnetische Feldenergie

Solange der Kondensator aufgeladen ist, herrscht zwischen dessen Platten ein elektrisches Feld; die gespeicherte Energie ist der Spannung proportional (Bild 61/1). 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 61/1) wandeln sich fortwährend kinetische Energie und potentielle Energie ineinander um. Bei der elektrischen Schwingung wandeln sich fortwährend die Energien elektrischer und magnetischer Felder ineinander um. Man spricht deshalb anstatt von elektrischen auch von *elektromagnetischen Schwingungen* in einem elektrischen Schwingkreis. Die sich periodisch auf- und abbauenden Felder nennt man *Wechselfelder.*



62/1 Federschwinger und Schwingkreis mit Energiediagramm. Der Schwingkreis ist gestreckt dargestellt

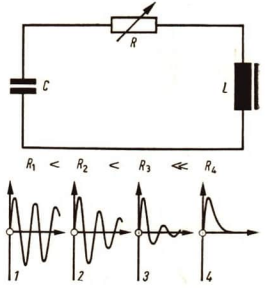
● *Stellen Sie an Hand des Bildes 62/1 die einander entsprechenden Erscheinungen und Vorgänge einer elektromagnetischen und einer mechanischen Schwingung in Form einer Tabelle gegenüber!*

Die gedämpfte elektrische Schwingung

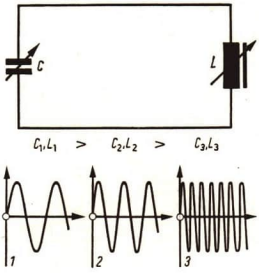
Bei der elektromagnetischen Schwingung werden die Energien des elektrischen und des magnetischen Feldes nicht vollständig ineinander umgewandelt. Ein Teil der Energie wird in Wärmeenergie verwandelt. Dies äußert sich hauptsächlich in der Erwärmung der Leiter infolge des unvermeidlichen Ohmschen Widerstandes und in der Erwärmung des Eisenkerns infolge der ständigen Ummagnetisierung und der Wirbelströme. 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. Der Betrag der Dämpfung kann so groß werden, daß die Schwingung aperiodisch verläuft (Bild 62/2).

62/2 Einfluß des Widerstandes auf die Dämpfung



● *Was ist das Wesen einer aperiodischen Schwingung? Weshalb benutzt man sie für die Bewegung des Zeigers eines Meßapparates?*



63/1 Einfluß des Betrages der Kapazität und der Induktivität auf die Frequenz

Bei der elektromagnetischen Schwingung werden Ladungsträger zwischen dem Kondensator und der Spule hin- und herbewegt. Schwingungsdauer und Frequenz hängen von der Kapazität des Kondensators und von der Induktivität der Spule ab. 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. Auf diese Abhängigkeit wird im folgenden Abschnitt noch ausführlich eingegangen.

Wodurch sind die Kapazität eines Kondensators und die Induktivität einer Spule bestimmt?

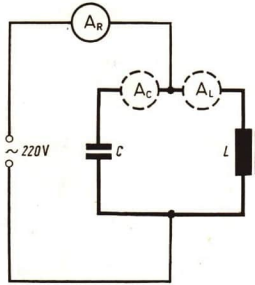
Die ungedämpfte elektrische Schwingung

Wenn man einer gedämpften mechanischen Schwingung im Rhythmus der Eigenfrequenz soviel Energie zuführt, wie durch die Dämpfung „verlorengeht", so erhält man eine ungedämpfte Schwingung.
Das Kennzeichen der ungedämpften Schwingung ist die gleichbleibende Amplitude.

Wie bezeichnet man den Sonderfall, daß die Eigenfrequenz eines Schwingers und die Frequenz beim Zuführen der Anstoßenergie gleich sind?

Im Falle einer elektromagnetischen Schwingung kann man die regelmäßigen Anstöße beispielsweise durch einen Wechselstrom herbeiführen.
Der elektrische Wechselstrom ist im Grunde auch eine elektromagnetische Schwingung, wenn er auch nicht in einem Schwingkreis als Eigenschwingung besteht, sondern durch einen Generator als erzwungene Schwingung erzeugt wird.

63/2 In einem Schwingkreis werden erzwungene Schwingungen erzeugt



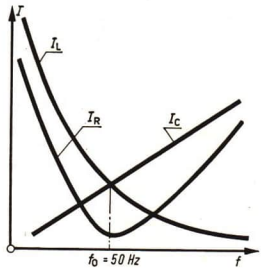
18

Ein elektrischer Schwingkreis (Bild 63/2) 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?

Von den mechanischen Schwingungen ist bekannt, daß die einem Schwinger zuzuführende Anstoßenergie im Resonanzfall am geringsten ist. Gleichzeitig wird die Amplitude des Schwingers ein Maximum.

Die Stromstärke I_R ist ein Maß für die dem Schwingkreis zugeführte elektrische Energie. Mißt man die Stromstärke in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz f_0 des Schwingkreises, so erhält man die in Bild 64/1 dargestellte Kurve für I_R. Die Stromstärke I_R weist ein Minimum auf. Gleichzeitig erreicht die Schwingungsenergie des Schwingkreises ein Maximum, was an den großen Zeigerausschlägen der in den Schwingkreis eingeschalteten Stromstärkemeßgeräte für I_C und I_L zu erkennen ist (Bild 63/2). Dieses Verhalten kennzeichnet den Resonanzfall: Die Frequenz f_0 des Schwingkreises stimmt mit der Erregerfrequenz f_E des Wechselstroms (50 Hz) überein.



64/1 Bei einer Resonanzfrequenz f_0 ist die Stromstärke I_R ein Minimum, die Stromstärken I_L und I_C sind gleich groß

Legt man die Spannung U (z. B. 220 V Wechselspannung) einmal nur an die Spule, so kennzeichnet die Kurve I_L in Bild 64/1 die Stromstärke durch die Spule in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Kurve I_C (Gerade) zeigt die Stromstärke im Kondensator, wenn man diesen herausgetrennt und an die Spannung U legt. Der Schnittpunkt beider Kurven entspricht dem Minimum der Kurve I_R und bestimmt die Resonanzfrequenz f_0.

Wenn bei gleicher angelegter Spannung durch zwei elektrische Bauelemente Ströme mit gleicher Stromstärke fließen, dann haben sie den gleichen Widerstand.

Man kann also sagen:

Ein elektrischer Schwingkreis weist die größte Schwingungsenergie bei derjenigen Frequenz auf, bei der Spule und Kondensator den gleichen Widerstand haben. Setzt man demzufolge die Wechselstromwiderstände von Kondensator und Spule gleich:

$$X_L = X_C$$

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C},$$

so läßt sich mit $\omega = 2\pi \cdot f_0$ die Eigenfrequenz f_0 eines Schwingkreises errechnen. Man erhält über

$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C} \quad \text{und}$$

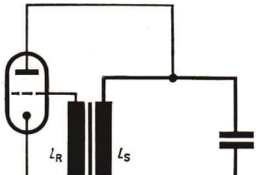
$$2\pi \cdot f_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}},$$

die Thomsonsche Schwingungsgleichung oder die

▶ **Frequenz eines elektrischen Schwingkreises**

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}.$$

● *Vergleichen Sie die Aussage dieser Gleichung mit der in Bild 63/1 dargestellten qualitativen Abhängigkeit und prüfen Sie, ob Übereinstimmung besteht!*



65/1 Rückkopplungsschaltung eines Schwingkreises mit einer Triode

Der Rückkopplungs-Röhrengenerator

Technische Bedeutung erhalten die elektromagnetischen Schwingungen erst, wenn sie ungedämpft und mit beliebiger Frequenz erzeugt werden können. Es erhebt sich so die Frage, wie man einem elektrischen Schwinger Energie zuführen kann, die die Dämpfungsverluste ersetzt. Im Prinzip ist der Vorgang der gleiche wie bei mechanischen Schwingern: Aus einer Energiequelle muß bei jeder Periode im geeigneten Augenblick Energie zugeführt werden. Das könnte über ein Relais erfolgen, das vom Schwingkreisstrom gesteuert wird und das dem Schwingkreis phasenrichtig periodisch elektrische Energie liefert. Das mechanische Relais arbeitet jedoch zu träge. Geeigneter ist ein elektrisches Relais; als solches kann man eine Triode bezeichnen, bei der die Gitterspannung den Strom im Anodenkreis steuert (Bild 65/1).

Beim Einschalten des Anodenstromes 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. Diese Ströme induzieren in der induktiv angekoppelten Spule L_R ebenfalls Ströme wechselnder Richtung. Dadurch wird das Gitter der Röhre einmal positiv, einmal negativ aufgeladen. Das Gitter verstärkt und schwächt folglich den Anodenstrom in der Frequenz des Schwingkreises, von dem diese Wirkungen ausgingen.

Die zur Deckung der Dämpfungsverluste nötige 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 63/2 gezeigten Versuchsanordnung vor. Dort kamen die Anstöße von einer fremden Spannungsquelle her. Hier aber erzeugt der Schwingkreis mit Hilfe der Triode selbst die Anstöße, die zwangsläufig immer in seiner Eigenfrequenz erfolgen.

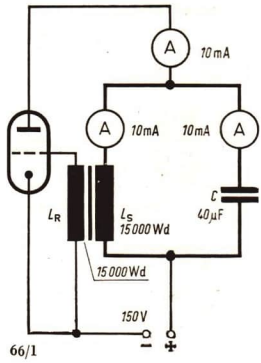
Da bei dieser von MEISSNER entwickelten Schaltung der Schwingkreis über Gitter und Anodenstromkreis auf seine eigenen Schwingungen zurückwirkt, gleichsam mit sich selbst gekoppelt ist, nennt man sie eine *Rückkopplungsschaltung* und die Spule L_R *Rückkopplungsspule.*

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.*

19

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

Durch die verschiedenen Meßgeräte wird die Phasenverschiebung angezeigt. Im Meßgerät für I_C eilt die Stromstärke der Gesamtstromstärke um 90° beziehungsweise eine Viertelperiode voraus.
Im Meßgerät für I_L eilt die Stromstärke der Gesamtstromstärke um eine Viertelperiode nach.



66/1

■ Berechnen Sie die Induktivität der Spule L_s (einschließlich der Wechselwirkung mit L_R)!

Gegeben:

$f = 1$ Hz

$C = 40\ \mu$F

Gesucht:

L_s

Lösung:

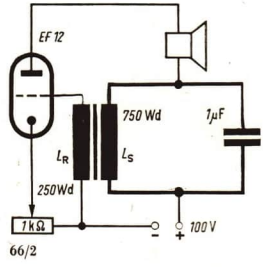
$$L_s = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C}$$

$$L_s = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 1^2\,\mathrm{s}^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{As \cdot V^{-1}}}$$

$$L_s \approx 630\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}, \qquad \underline{\underline{L_s \approx 630\ \mathrm{H}}}$$

20

Um eine höhere Frequenz zu erzielen (Hörbarkeitsbereich), sind Induktivität und Kapazität gegenüber dem Versuch 19 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 Tonhöhe, das heißt die Schwingungsfrequenz, variieren.



66/2

■ Berechnen Sie die Frequenz eines Schwingkreises mit einem Kondensator $C = 1\ \mu$F und $L_s \approx 0{,}2$ H!

Gegeben:

$C = 1\ \mu$F

$L_s \approx 0{,}2$ H

Gesucht:

f

Lösung:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s \cdot C}}$$

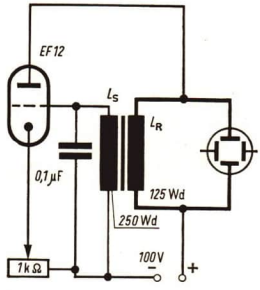
$$f \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{0{,}2\,\mathrm{Vs \cdot A^{-1}} \cdot 10^{-6}\,\mathrm{As \cdot V^{-1}}}}$$

$$f \approx \frac{1}{2\pi \cdot 0{,}45 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}}$$

$$f \approx \frac{1000}{0{,}9\,\pi}\,\mathrm{s^{-1}}$$

$$f \approx 350\ \mathrm{Hz}$$

Im Schwingkreis besteht eine tonfrequente Schwingung.



66/3

21

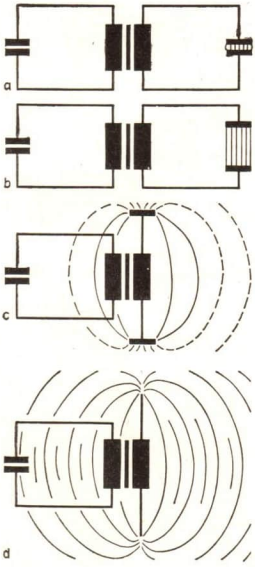
Induktivität und Kapazität werden weiter verkleinert. Die Frequenz liegt jetzt oberhalb des Hörbereichs (Grenze etwa 16 kHz). Diese hochfrequente Schwingung wird durch einen Katodenstrahloszillografen sichtbar gemacht.

● *Wie kann man die Frequenz der Schwingung bestimmen?*

Die Hertzschen Wellen

Bei der NVA werden Nachrichtenmittel eingesetzt, die leicht, transportabel und betriebssicher sind. Durch besondere schaltungstechnische Maßnahmen, wie sie im folgenden beschrieben werden, können durch hochfrequente elektromagnetische Schwingungen Wellen erzeugt werden, die sich ohne besonderen Leiter im Raum ausbreiten und eine Nachrichtenverbindung herstellen.





67/2

Das Entstehen Hertzscher Wellen

In den bisher betrachteten elektrischen Schwingkreisen ist das magnetische Wechselfeld nur auf die unmittelbare Nähe der Spulen und Leiter beschränkt. Auch das elektrische Wechselfeld ist schon in geringem Abstand vom Kondensator nicht mehr nachweisbar; es bleibt auf den Raum zwischen den Kondensatorplatten konzentriert.

Beschreiben Sie Verfahren und Meßgeräte, mit denen man ein magnetisches Feld und ein elektrisches Feld nachweisen kann!

Will man elektromagnetische Schwingungen auf eine größere Entfernung übertragen, das heißt, will man erreichen, daß sich die elektrischen und magnetischen Wechselfelder um den Schwingkreis herum ausbreiten, so muß man hierzu das elektrische Feld nutzen. Das geschieht, indem man den bisher betrachteten *geschlossenen* Schwingkreis zum **offenen Schwingkreis** umgestaltet. Diesen Übergang zeigt folgender Versuch.

22

Die Kondensatorplatten eines Schwingkreises (Bild 67/2) werden auseinandergezogen. Dadurch wird die Kapazität verkleinert und infolgedessen die Eigenfrequenz erhöht. Um wieder Resonanz zu erhalten, muß man die Generatorfrequenz ebenfalls erhöhen.
Die Feldlinien des elektrischen Feldes erfüllen den umgebenden Raum.

Der im Versuch 22 beschriebene **offene Schwingkreis** kann durch einen induktiv angekoppelten geschlossenen Schwingkreis zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.
In einem offenen Schwingkreis tritt nicht nur das elektri-

sche Wechselfeld stärker in Erscheinung, sondern durch das wechselseitige Zusammenwirken von elektrischem und magnetischem Feld sind bei hohen Frequenzen beide Anteile weit im umgebenden Raum, selbst in großen Entfernungen vom Schwingkreis, noch nachzuweisen.

Dieses Verhalten soll nun näher erläutert werden.

Bei den erzwungenen elektrischen Schwingungen im offenen Schwingkreis lassen sich ganz ähnliche Phasen unterscheiden wie im geschlossenen Schwingkreis (↗ Bild 61/1).

Auf den Strom durch die Spule folgt ein Moment der Stromlosigkeit, in dem die Ladungsträger an den Enden des offenen Schwingkreises zusammengedrängt sind und eine Spannungsdifferenz zwischen diesen besteht. Darauf folgt eine Phase umgekehrten Stromes usf. Wesentlich für diesen Vorgang ist dabei das Verhalten der Felder, wie es Bild 68/1 zeigt:

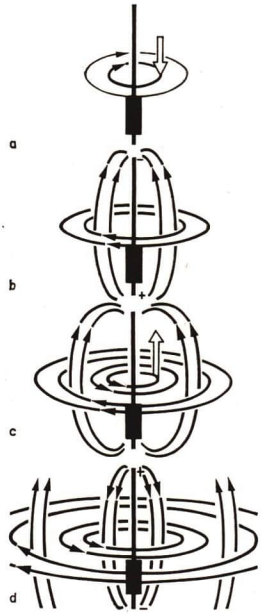
Solange der Strom fließt (Bild 68/1a), bildet sich um den offenen Schwingkreis herum ein magnetisches Feld in konzentrischen Kreisen aus. Die Stärke des Feldes ist der Stromstärke proportional und nimmt mit dieser zusammen zu bis zu einem Maximalwert. Der nach unten zeigende hohle Pfeil gibt die Stromrichtung an. Die Richtung der magnetischen Feldlinien läßt sich aus der Stromrichtung mit Hilfe der Rechte-Hand-Regel ermitteln.

Wenn der Strom aufgehört hat zu fließen (Bild 68/1b), hat sich zwischen den Enden des offenen Schwingkreises eine Spannung ausgebildet. Mit dieser Spannung ist ein von unten nach oben gerichtetes elektrisches Feld verknüpft. Es hat im Moment der Stromlosigkeit sein Maximum erreicht. Bemerkenswert ist, daß das magnetische Feld jetzt nach dem Aufhören des Stromflusses nicht verschwunden ist, sondern sich als Folge der Wechselwirkung mit dem danach entstandenen elektrischen Feld vom Leiter weiter entfernt, das heißt sich ausbreitet.

Der offene Schwingkreis nimmt die Schwingungsenergie vom Erregerschwingkreis auf. Deshalb bleibt das magnetische Feld bestehen, es breitet sich im Raum aus. Das gleiche gilt für das elektrische Feld. Beide Felder breiten sich entsprechend der Frequenz des Schwingkreises aus, ohne zu verschwinden (Bild 68/1c und 68/1d). Sie transportieren Energie.

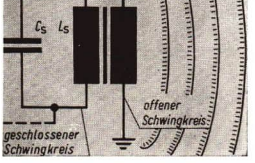
Im Bild 68/2 ist ein solcher Fall dargestellt. Die von einem Schwingkreis auf eine Antenne übertragene Energie wird als Welle ausgestrahlt.

▶ **Ein von einem offenen Schwingkreis ausgestrahltes System von untrennbar verknüpften, periodisch wechselnden elektrischen und magnetischen Feldern nennt man ein elektromagnetisches Wechselfeld oder eine elektromagnetische Welle.**



68/1 Elektrisches und magnetisches Feld um einen offenen Schwingkreis

68/2 Schwingkreis und Antenne als Sender



Eine Ausbildung elektromagnetischer Wellen im Raum beginnt erst bei Frequenzen über etwa 15 kHz. Die elektromagnetische Welle besteht in der örtlich und zeitlich periodischen Änderung physikalischer Größen zweier Felder. Sie bedarf zur Ausbreitung keines stofflichen Trägers, wie es beim Medium der mechanischen Wellen der Fall ist. Sie ist eine für die Nachrichtentechnik sehr wichtige Art der nichtstofflichen Strukturformen der Materie.

Die elektromagnetischen Wellen wurden 1888 von HEINRICH HERTZ erstmalig experimentell nachgewiesen, aber schon 1868 von dem englischen Physiker JAMES CLERK MAXWELL auf Grund seiner Theorien vorausgesagt (↗ S. 82).

Empfang Hertzscher Wellen

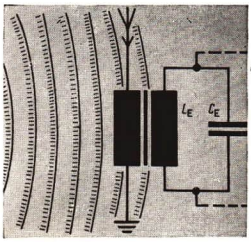
Trifft die sich ausbreitende elektromagnetische Welle auf einen Leiter, so lösen sowohl das elektrische als auch das magnetische Wechselfeld Vorgänge in diesem aus, die im Physikunterricht schon behandelt wurden.

Erklären Sie den Vorgang der Influenz!

Der elektrische Feldanteil verursacht im Leiter eine Ladungstrennung. Diese Ladungstrennung als Folge der Einwirkung einer anderen Ladung, genauer gesagt des elektrischen Feldes dieser Ladung, wird (↗ Kl. 9) als Influenz bezeichnet. Zwischen den Leiterenden entsteht eine Spannung, wenn das elektrische Feld den Leiter überstreicht. Die im Leiter influenzierten Spannungen kann man auf einen angekoppelten geschlossenen Schwingkreis übertragen und dann verstärken.

Im *Sender* wird eine ungedämpfte elektromagnetische Schwingung mit einer von L_S und C_S abhängigen Frequenz erzeugt. Diese Schwingung wird auf einen angekoppelten offenen Schwingkreis, die *Sendeantenne*, übertragen. Die Antenne wird im allgemeinen geerdet.

69/1 Antenne und Schwingkreis als Empfänger



Die ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen, von denen hier nur der elektrische Feldanteil gezeichnet ist, treffen auf einen Leiter, der einen offenen Schwingkreis darstellt und, da er die elektromagnetische Welle gleichsam auffängt, als *Empfangsantenne* bezeichnet wird.

Im Bild 69/1 ist dargestellt, wie eine von einem Sender (Bild 68/2) ausgestrahlte elektromagnetische Welle auf eine Empfangsantenne trifft.

Die in der Empfangsantenne durch den elektrischen Feldanteil influenzierte Spannung wird auf einen angekoppelten geschlossenen Schwingkreis übertragen, dessen Induktivi-

tät L_E und Kapazität C_E so gewählt werden, daß er in der gleichen Frequenz wie der Sender schwingt, also mit der elektromagnetischen Welle in Resonanz ist.

● *Erklären Sie den Vorgang der Induktion!*

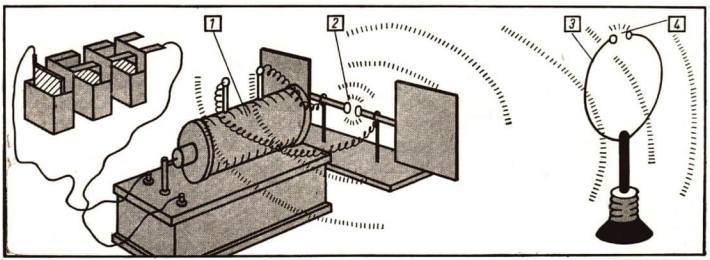
Betrachtet man den magnetischen Feldanteil der elektromagnetischen Welle, so beruht der Empfang darin, daß in der Antenne beim Durchwandern des magnetischen Wechselfeldes, das heißt infolge der Feldänderungen, eine Wechselspannung induziert wird. Die Antenne hat in diesem Falle am günstigsten die Form einer Schleife oder eines rechteckigen Rahmens.

Auf die Schaltung von Sendern und Empfängern wird im folgenden noch näher eingegangen. Hier sei nur soviel gesagt, daß es auch ganz einfache Empfänger gibt, die die aufgefangene Welle ohne jegliche Verstärkung durch Meßgeräte oder Kopfhörer nachzuweisen gestatten. Da diese Geräte zum Betrieb Energie benötigen, muß die Energie von der elektromagnetischen Welle übertragen worden sein. In der unmittelbaren Nähe starker Sender ist diese Energie sogar so groß, daß man Glühlampen damit betreiben könnte.

▷ **Die elektromagnetische Welle überträgt Energie.**

Da die elektromagnetische Welle nichtstofflicher Natur ist und auch keinen stofflichen Träger benötigt, überträgt sie die Energie auch durch ein Vakuum, z. B. durch den Weltraum.

Senden und Empfangen elektromagnetischer Wellen gelang zuerst im Jahre 1888 dem Physiker Heinrich Hertz. Er verwendete Schwingkreise besonders einfacher Art, nämlich Drahtbügel, die als Spule mit nur einer Windung aufzufassen sind und deren gegen-



70/1 Hertzscher Sender und Empfänger

überstehende Enden gleichsam die Kondensatorflächen darstellen. HERTZ benutzte einen Funkeninduktor (1) mit angeschlossener Funkenstrecke (2) als Erreger für elektromagnetische Schwingungen sehr hoher Frequenz. Als Empfangsantenne diente ein kreisförmiger Drahtbügel (3) mit einer winzigen Funkenstrecke (4) an den Enden (Bild 70/1).

Sein Ziel, die Ausbreitung von Wellen im Raum nachzuweisen, erreichte er, als er den Raum vor einer Metallwand absuchte. Es zeigten sich bei mikroskopischer Betrachtung winzige Funken in der Funkenstrecke der Empfangsantenne. Damit war nachgewiesen, daß von der Funkenstrecke des Induktors elektromagnetische Wellen ausgesandt, von der Metallwand reflektiert und von der Empfangsantenne aufgefangen wurden.

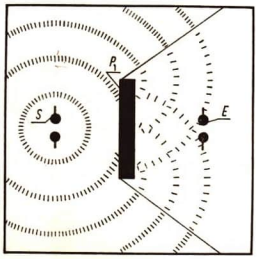
Der Physiker ALEXANDER POPOW baute 1895 einen Empfänger für elektrische Entladungen in der Atmosphäre und erfand die Antenne. Bei jedem Blitz im Umkreis von mehreren Kilometern breiten sich elektromagnetische Wellen durch den Raum aus. Sie wurden von der Antenne aufgefangen und ließen am Empfangsort eine Glocke ertönen.

ALEXANDER POPOW führte mit einem Hertzschen Sender und dem von ihm erfundenen Empfänger die erste Nachrichtenübermittlung mit elektromagnetischen Wellen durch, und zwar vom Land aus zu einem 250 m entfernten Schiff. Seine Veröffentlichungen setzten MARCONI in die Lage, 1897 eine Strecke von 6 km zwischen zwei Inseln im Ärmelkanal drahtlos zu überbrücken.

Eigenschaften und Ausbreitung Hertzscher Wellen

Abschirmung. Bringt man zwischen Sende- und Empfangsantenne eine Platte aus einem elektrisch isolierenden Material wie Glas, Holz oder Pappe, so wird die Stärke der elektromagnetischen Welle kaum vermindert. Diese Wellen treten also auch innerhalb eines Gebäudes auf, das heißt, die ausgestrahlte Energie kann mit einer Zimmerantenne aufgenommen werden.

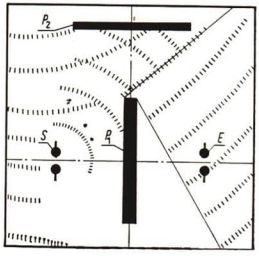
71/1 Abschirmung Hertzscher Wellen



Elektrisch gut leitende Platten (P_1) zwischen Sender (S) und Empfänger (E) halten die elektromagnetischen Wellen fast vollständig auf (Bild 71/1). Deshalb setzt man Sender oder Leitungen, die hochfrequente elektrische Schwingungen führen, in metallische Gehäuse oder Umhüllungen, wenn man die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen verhindern will. Man spricht dann von **Abschirmung.** Eine ähnliche Abschirmung erhält man, wenn ein Drahtgitter zwischen Sende- und Empfangsantenne gebracht wird. Die Drähte müssen parallel zur Sendeantenne gerichtet sein.

Inwiefern kann man damit die Schwingungsrichtung des elektrischen Feldes ermitteln?

Reflexion. Bringt man eine Metallplatte P_1 zwischen Sende- und Empfangsantenne, die die direkte Verbindung unterbricht, und ordnet seitlich eine Metallplatte P_2 an, so zeigt sich bei der in Bild 72/1 angegebenen Stellung der Platte P_2 eine Verstärkung der vom Empfänger aufgefangenen Welle gegenüber der Anordnung nach Bild 71/1. Daraus muß man schließen, daß die elektromagnetischen Wellen von Metallflächen nach dem Reflexionsgesetz reflektiert werden.

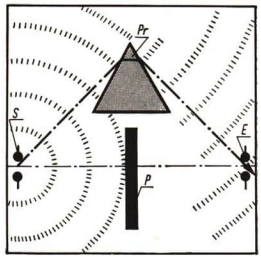


72/1 Reflexion Hertzscher Wellen

● *Stellen Sie in Bild 72/1 Einfalls- und Reflexionswinkel fest!*

Auch Metallstäbe geeigneter Länge und Richtung reflektieren die elektromagnetischen Wellen.

Brechung. Mit einem Paraffinprisma (Bild 72/2) kann man nachweisen, daß elektromagnetische Wellen in nichtmetallischen Stoffen gebrochen werden. Befindet sich seitlich der Platte P ein großes Paraffinprisma Pr, so ist bei E eine kräftige Welle zu empfangen, ohne das Prisma nicht. Die Wellennormale deutet den Weg der Welle an, der auf eine Brechung im Prisma schließen läßt.



72/2 Brechung Hertzscher Wellen

Ausbreitungsgeschwindigkeit. Für alle Wellen, also auch für elektromagnetische Wellen gilt

$$c = \lambda \cdot f.$$

Als Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen bestimmte man aus Messungen und aus theoretischen Überlegungen die Lichtgeschwindigkeit

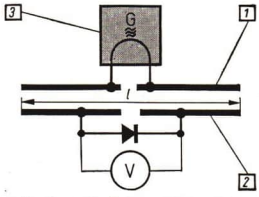
$$c \approx 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Der Wert für Vakuum beträgt $c = 2{,}998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Frequenz f der elektromagnetischen Welle läßt sich aus den Werten von L und C des Senderschwingkreises berechnen. Der so ermittelten Frequenz entspricht eine Wellenlänge λ der elektromagnetischen Welle, die sich mit Hilfe der obengenannten Wellengleichung nach $\lambda = c/f$ berechnen läßt.

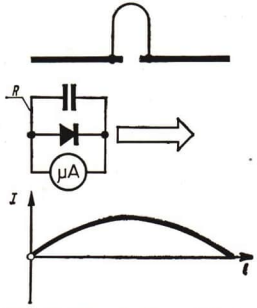
In der Deutschen Demokratischen Republik gibt es eine Verordnung des Ministeriums für Post- und Fernmeldewesen, wonach für Unterrichtszwecke bei Sende- und Empfangsversuchen von Hertzschen Wellen eine Frequenz von 300 MHz zugelassen ist.

● *Wie groß ist die Wellenlänge bei $f = 300$ MHz?*

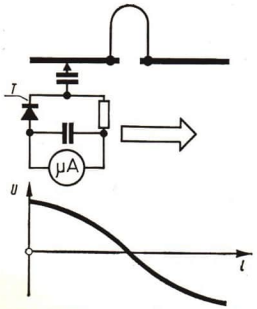
Diese zugelassene Wellenlänge gestattet die Untersuchung der Eigenschaften Hertzscher Wellen in Klassenräumen, wobei ein Ausstrahlen von Funksignalen nach außerhalb durch Abschirmwirkung der Gebäudeteile gemindert wird. Der für diese Versuche benötigte Generator ist ein Höchstfrequenzgenerator.



73/1 Sendedipol (1) und Empfangsdipol (2), Höchstfrequenzgenerator (3)



73/2 Verteilung der Stromstärke des höchstfrequenten Wechselstroms über die Dipollänge



73/3 Verteilung der Spannung des höchstfrequenten Wechselstroms über die Dipollänge

Der Höchstfrequenzgenerator

Um die hohe Frequenz von 300 MHz zu erzeugen, müssen L und C sehr klein gewählt werden. Der geschlossene Schwingkreis besteht deshalb aus einem einfachen Drahtbügel und der offene aus zwei geraden Leiterstücken, die sowohl eine (sehr geringe) Induktivität als auch eine (sehr geringe) Kapazität aufweisen. Den so für hohe Frequenzen sehr vereinfachten offenen Schwingkreis nennt man einen **Dipol** (Bild 73/1).

Vergleichen Sie den Versuchsaufbau von HEINRICH HERTZ *mit dem Versuchsaufbau nach Bild 73/1!*

Die im Empfangsdipol (Empfangsantenne) induzierte bzw. influenzierte Spannung läßt sich auf einfache Weise messen, wie Bild 73/2 angibt. Man beobachtet die größten Ausschläge, wenn die Gesamtlänge l des Dipols gleich der halben Wellenlänge der empfangenen Welle ist:

$$l = \frac{\lambda}{2}.$$

Die gleiche Bedingung gilt auch für die Stärke der vom Sender ausgestrahlten Welle. Stimmt die Frequenz f_E der im Sender erzeugten Welle mit der Eigenfrequenz f_0 des Sendedipols, der ja ein offener Schwingkreis ist, überein, so herrscht *Resonanz*; die ausgestrahlte Welle ist besonders energiereich.

Man kann also bei hochfrequenten Wellen die Wellenlänge λ mit Hilfe obiger Gleichung bestimmen, und zwar dadurch, daß man das Maximum der ausgestrahlten oder empfangenen Welle durch Verlängern oder Verkürzen der Dipolstäbe ermittelt. Dabei bildet sich im Dipol eine stehende Welle in der Weise aus, daß die Mitte die größte Stromstärke (nachgewiesen durch Entlangfahren mit dem Resonanzkreis R, Bild 73/2) und die Enden des Dipols die größte Spannung (nachgewiesen durch Entlanggleiten mit dem Tastkopf T, Bild 73/3) aufweisen.

Die in einem abgestimmten Empfangsdipol influenzierte Spannung ist dann am größten, wenn der Empfangsdipol zum Sendedipol parallel steht, das heißt, wenn der Empfangsdipol den elektrischen Feldlinien der elektromagnetischen Welle parallel gerichtet ist. Die influenzierte Spannung ist null, wenn der Empfangsdipol auf den Sendedipol weist. Beim Drehen des Empfangsdipols kann man also aus der Lautstärke auf die Richtung schließen, in der der Sender steht, falls die Welle vorher nicht von einem Hinder-

nis reflektiert wurde. Man nennt diesen Vorgang *Peilen* oder *Richtempfang*; man wendet ihn vor allem in der Navigation an. In den längeren Wellenbereichen benutzt man zum Peilen geschlossene, rahmenförmige Antennen, deren Richtwirkung auf der Induktion beruht.

Die Wellenbereiche

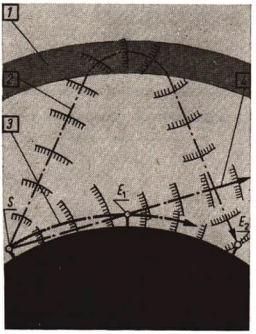
Die Ausbreitungsverhältnisse der elektromagnetischen Wellen hängen stark von ihrer Wellenlänge bzw. Frequenz ab. Im wesentlichen liegen die Unterschiede darin begründet, welche der im Bild 74/1 dargestellten Ausbreitungsmöglichkeiten vorliegen. Die *direkte Welle* (4) breitet sich etwa gradlinig aus, wird also durch Bodenerhebungen und die Erdkrümmung begrenzt. Die *Bodenwelle* (3) schmiegt sich gleichsam der Erdoberfläche an, reicht also weiter. Die *Raumwelle* (2) wird von einer elektrisch leitenden Schicht (1) in über 200 km Höhe zum Boden zurück reflektiert.
Nach den Ausbreitungsverhältnissen unterscheidet man bei den Hertzschen Wellen die folgenden Wellenlängenbereiche (Bild 74/2):

Lang- und Mittelwelle (LW, MW): Ausbreitung vorwiegend durch Bodenwelle, in der Dunkelheit auch Raumwelle; dadurch abends Erhöhung der Reichweite, jedoch kann es durch Überlagerung beider Wellen zu einem starken Schwund der Lautstärke kommen; starke Senderleistung nötig; Empfang störanfällig.

Kurzwelle (KW): Ausbreitung durch Bodenwelle bis höchstens 100 km; Fernempfang nur durch Raumwelle möglich; unter günstigen Umständen große Reichweite bei kleiner Senderleistung; große Unterschiede zwischen Tag und Nacht.

Ultrakurzwelle (UKW): Ausbreitung durch direkte Wellen; Reichweite theoretisch wie optische Sicht, praktisch weit über Sichtweite hinausgehend; wenig Schwankungen des Empfangs; durch Auftreten von Raumwellen, Beugung und Brechung (Bild 74/1) können gelegentlich Überreichweiten erzielt werden; kleine Senderleistungen.

Dezi- und Zentimeterwellen: Sie lassen sich durch scheinwerferartige Antennen (Richtstrahlantennen) bündeln; kleinste Senderleistungen genügen.



74/1 Wellenausbreitung

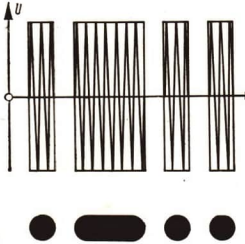
74/2

Wellenlänge λ in m	Internat. Wellenbereiche	Rundfunk-Wellenbereiche	Frequenz f in MHz
			0,1
1000	Lang- und Mittelwellen	LW	
		MW	1
100	Kurzwellen		
		KW	10
10			
	Ultrakurzwellen	UKW FS	100
1,0			
	Dezimeterwellen		1000
0,1			
	Zentimeterwellen		10 000
0,01			

Die drahtlose Nachrichtenübermittlung

Die elektromagnetischen Wellen erlauben einen ständigen Nachrichtenaustausch zwischen Land und Schiff und von Schiff zu Schiff. Vollautomatische Alarmzeichenempfänger wie hier auf dem Fährschiff „Saßnitz" überwachen die internationale Seenotfrequenz (500 kHz) und lösen bei Empfang eines Notzeichens selbsttätig Alarm aus.





75/2 Unterbrochener Wellenzug und zugehöriges Signal – Zeichen F – der rechte Punkt kommt zuerst beim Empfänger an

Die Modulation

Will man mit Hilfe Hertzscher Wellen ein Signal übertragen, so besteht das einfachste Verfahren darin, den Sender im Rhythmus vereinbarter Zeichen ein- und auszuschalten. Das Signal besteht dann aus einer Reihe von einzelnen Wellenzügen, die einander in bestimmten Zeitabständen folgen. Aus der Dauer der einzelnen Wellenzüge und ihren Abständen voneinander kann man entsprechende, vorher vereinbarte Informationen entnehmen. Solche Nachrichtenverbindungen bezeichnet man als drahtlosen *Telegrafie*verkehr; er bedient sich des Morsealphabets und wird im Schiffsverkehr, im Flugwesen und für militärische Zwecke angewendet.

Die menschliche Sprache oder Tonfolgen (Musik) können nicht ohne weiteres durch Hertzsche Wellen übertragen werden, weil die dabei auftretenden Schwingungen eine zu niedrige Frequenz (20 Hz bis 15 kHz) haben. Die niedrigsten Frequenzen der Hertzschen Wellen liegen aber bei 15 kHz. Will man die Hertzschen Wellen für die Nachrichtenübermittlung ausnutzen, ergeben sich zwei grundsätzliche Schwierigkeiten:

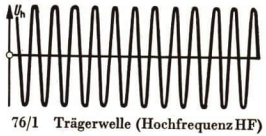
1. Die hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen können sowohl als Hertzsche Wellen gesendet und empfangen werden, aber man kann sie nicht ohne weiteres hörbar machen, da die Membran eines Lautsprechers diesen schnellen Schwingungen nicht folgen kann und das menschliche Ohr derartig hohe Frequenzen auch nicht wahrnimmt.

2. Niederfrequente mechanische Schwingungen der Sprache und der Musik können in entsprechende elektromagnetische Schwingungen umgewandelt werden. Diese erzeugen jedoch wegen der niedrigen Frequenz keine Hertzschen Wellen und können folglich nicht gesendet werden.

Drahtloser *Telefonie*verkehr wird mit Hilfe einer ständig ausgesendeten hochfrequenten Welle durchgeführt. Dieser hochfrequenten Welle (Bild 76/1) werden Signale in Form einer tonfrequenten Welle (Bild 76/2) überlagert. Vom Sender wird eine entsprechend den zu übertragenden Signalen veränderte Welle ausgestrahlt (Bild 76/3). Dieser Vorgang der Wellenüberlagerung wird als **Modulation** bezeichnet.

Im vorliegenden Beispiel nach Bild 76/3 wird die Amplitude der Trägerwelle moduliert; man bezeichnet dies als *Amplitudenmodulation* (AM). Die Frequenz der Hertzschen Welle, die die tonfrequenten Schwingungen gleichsam trägt, nennt man auch *Trägerfrequenz*.

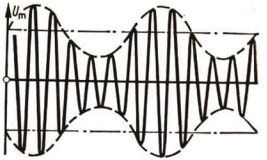
Im Bild 76/4 wird eine Anordnung gezeigt, mit der einer hochfrequenten Schwingung eine niederfrequente Schwingung aufgeprägt werden kann. Die von der Schallquelle erzeugten Schwingungen werden auf dem Bildschirm als modulierte Welle sichtbar gemacht.



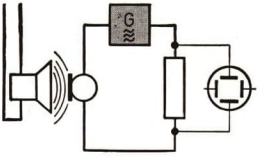
76/1 Trägerwelle (Hochfrequenz HF)



76/2 Tonwelle (Niederfrequenz NF)



76/3 Modulierte Welle



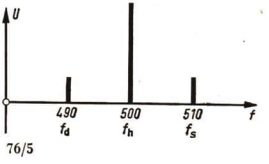
76/4

Es gibt noch andere Möglichkeiten der Modulation. Eine davon ist die *Frequenzmodulation* (FM), bei der nicht die Amplitude, sondern die Frequenz der Trägerwelle im Rhythmus der Tonfrequenz moduliert wird.

Mißt man eine mit der Tonfrequenz f_n modulierte elektrische Schwingung mit einem Frequenzmesser, so zeigt dieser beiderseits neben der Trägerfrequenz f_h je eine weitere Frequenz an, die sich als

$$f_s = f_h + f_n \quad \text{und} \quad f_d = f_h - f_n$$

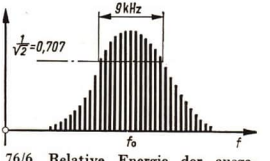
berechnen lassen (Bild 76/5).



76/5

Diese Frequenzen nennt man auch *Seitenfrequenzen*, im einzelnen Summen- oder obere *Seitenfrequenz* f_s bzw. *Differenz-* oder *untere Seitenfrequenz* f_d.

Wird eine Trägerwelle (z. B. $f_h = 500$ kHz) mit tonfrequenten Schwingungen einer Musikdarbietung moduliert, bei der alle Frequenzen f_n zwischen etwa 20 Hz und 10 kHz vorkommen, so finden sich in der abgestrahlten Welle alle Frequenzen zwischen $f_h + f_n$ und $f_h - f_n$ (z. B. zwischen 510 kHz und 490 kHz). In diesem Frequenzbereich darf kein anderer Sender Wellen ausstrahlen, sonst würde die Übertragung gestört. Durch internationale Übereinkommen ist im Mittelwellenbereich beiderseits der Trägerfrequenz ein *Seitenband* von 4,5 kHz, insgesamt also eine Sender-*Bandbreite* von 9 kHz festgelegt worden (Bild 76/6).



76/6 Relative Energie der ausgestrahlten Welle

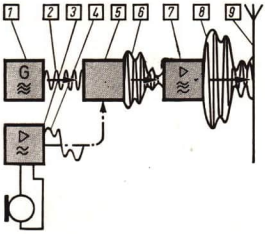
Aufbau eines Senders

Im Grunde ist jede Anordnung zur Erzeugung ungedämpfter hochfrequenter elektrischer Schwingungen (wie etwa die Meißner-Schaltung nach Bild 65/1) ein Sender; denn eine angekoppelte Antenne strahlt eine elektromagnetische Welle ab. Eine solche Schaltung darf deshalb auch nur mit Genehmigung des Ministeriums für Post- und Fernmeldewesen betrieben werden, auch wenn keine Modulation vorgesehen ist.

Für Unterrichtszwecke werden Sendegenehmigungen für Sender mit Leistungen bis 1 W und einer Frequenz von 300 MHz ausgestellt. Modulation ist nicht erlaubt. Sendegenehmigungen für modulierbare Sender werden für Funkamateure im Rahmen der Gesellschaft für Sport und Technik erteilt (↗ S. 80).

Ein Sender muß folgende technischen Anforderungen erfüllen:

1. Es muß eine konstante Trägerfrequenz erzeugt werden, damit im Empfänger diese Frequenz eingestellt werden kann.
2. Die Trägerwelle muß durch eine geeignete Schaltung mit der Tonfrequenz moduliert werden.
3. Die mit dem Mikrofon erzeugte tonfrequente Schwingung muß verstärkt werden. Das gleiche gilt für die modulierte hochfrequente Schwingung, damit sie als Hertzsche Welle eine große Reichweite hat.



77/1 Blockschema eines Telefoniesenders

1 Steuerstufe
2 Trägerfrequenz
3 NF-Stufe
4 Tonfrequenz
5 Modulationsstufe
6 Modulierte HF
7 Verstärkerstufe
8 Verstärkte, modulierte HF
9 Antenne

Sender bestehen im Prinzip aus folgenden Teilen (Bild 77/1):
In der *Steuerstufe* (Oszillator) wird eine HF-Schwingung erzeugt.
In der *NF-Stufe* wird die im Mikrofon erzeugte tonfrequente elektrische Schwingung verstärkt.
In der *Modulationsstufe* wird die HF mit der NF moduliert.
In weiteren Verstärkerstufen wird die modulierte Trägerschwingung so verstärkt, daß die gewünschte Ausgangsleistung an der Antenne erreicht wird.

Die Demodulation

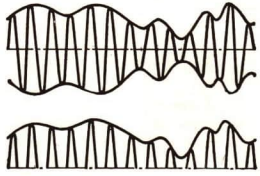
Auf die Antenne eines Empfängers wirken die Funkwellen vieler Sender ein. Führte man diese Vielzahl von Wellen einem Lautsprecher zu, dann würde man die Programme aller Sender, die an dem betreffenden Ort empfangen werden können, gleichzeitig hören, ohne sie voneinander unterscheiden und verstehen zu können. Daraus ergibt sich

Fragen und Aufträge
91 bis 110, S. 114

die Aufgabe, aus der großen Anzahl der einfallenden Funkwellen die gewünschte Welle herauszusondern.
Dies geschieht mit Hilfe der Resonanz. Man führt das Gemisch der empfangenen Antennenwechselströme einem Schwingkreis zu, dessen Eigenfrequenz auf die Frequenz des gewählten Senders abstimmbar ist. Dieser Resonanz- oder Empfangskreis schwingt dann im Rhythmus der modulierten Trägerfrequenz des betreffenden Senders und unterdrückt zum größten Teil alle anderen Frequenzen.
Um viele Sender getrennt empfangen zu können, muß die Eigenfrequenz des Empfangskreises in einem großen Bereich veränderbar sein – man muß den Schwingkreis abstimmen können. Dies geschieht mit Hilfe eines Drehkondensators oder auch mit Spulen veränderbarer Induktivität.
Die so ausgewählten modulierten hochfrequenten Schwingungen können jedoch immer noch nicht im Lautsprecher hörbar gemacht werden. Dafür gibt es zwei Gründe:

1. Die von der Antenne aufgenommenen Wechselspannungen betragen meist nur einige Millivolt.
2. Die modulierte Trägerfrequenz erzeugt keine dem gesendeten Programm entsprechende tonfrequente Schwingung im Lautsprecher.

Daraus ergibt sich die Aufgabe, die Tonfrequenz, die im Sender der hochfrequenten Trägerwelle aufmoduliert wurde, wiederzugewinnen und anschließend zu verstärken.
Den Vorgang der Abtrennung der Tonfrequenz von der Trägerfrequenz nennt man **Demodulation.**
Bei hochfrequentem Wechselstrom bleibt eine Lautsprechermembran in Ruhe wegen der nach beiden Seiten gerichteten Auslenkungskraft bei hoher Frequenz.
Das Prinzip der Demodulation von amplitudenmodulierten Schwingungen besteht darin, daß man den hochfrequenten Wechselstrom (Bild 78/1) durch einen Einweggleichrichter in pulsierenden Gleichstrom verwandelt. Obwohl der erhaltene Gleichstrom noch im Rhythmus der Hochfrequenz pulsiert, spricht die Membran eines Lautsprechers auf die Amplitudenveränderung des pulsierenden Gleichstroms an (Bild 78/2).
Bei hochfrequentem Gleichstrom verändert die Membran wie die demodulierte Stromstärkeamplitude ihre Amplitude. Diese Amplitude der Membran entspricht dem Mittelwert der Amplitude der Hertzschen Welle.
Die vom Mikrofon dem Sender übertragenen Schwingungen entsprechen den demodulierten Schwingungen im Empfänger; die Lautsprechermembran erzeugt die gleichen Schwingungen, wie sie am Sendeort vom Mikrofon aufgenommen werden.



78/1 Prinzip der Demodulation von amplitudenmodulierten Schwingungen



78/2 Amplituden der Lautsprechermembran

Aufbau eines Empfängers

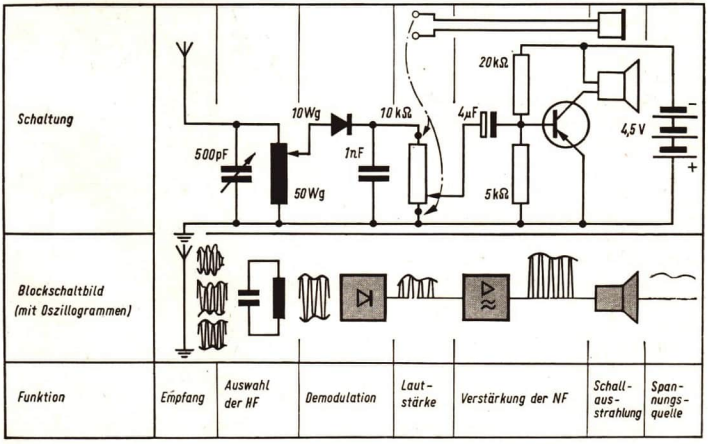
Ein Empfänger muß folgende technischen Anforderungen erfüllen:

1. „Heraussieben" der gewünschten Welle durch Abstimmen eines Schwingkreises auf die Senderfrequenz.
2. Trennung der tonfrequenten Schwingung von der Trägerschwingung.
3. Verstärkung der mit geringer Energie von der Empfangsantenne aufgefangenen Welle.
4. Umwandlung der tonfrequenten elektrischen Schwingung in Schallwellen.

Diese Aufgaben sollen an Hand einer ganz einfachen Empfangsschaltung näher erläutert werden (Bild 79/1).

1. Zum „Heraussieben" der gewünschten Senderfrequenz werden die Kapazität eines Drehkondensators oder (selten) die Induktivität einer Spule verändert. Der Empfänger wird dadurch auf den Sender „abgestimmt", so daß dieser mit maximaler Lautstärke empfangen wird. Der Empfängerschwingkreis ist auf Resonanz mit der vom Sender ausgesandten Welle eingestellt.
2. Die Trennung der tonfrequenten Schwingung von der hochfrequenten Schwingung, die Demodulation, erfolgt in unserem Beispiel durch Gleichrichtung mittels einer Germaniumdiode.

79/1 Blockschema und Schaltbild eines Rundfunkempfängers



3. Die Verstärkung der Schwingungen kann vor oder nach der Demodulation erfolgen.
   Im einfachsten Empfänger, dem *Detektor*empfänger, verwendet man keine Verstärkung, benötigt also auch keine Spannungsquelle. Man ersetzt das Potentiometer von 10 kΩ durch einen Kopfhörer (vgl. Bild 79/1) und empfängt einen starken Ortssender mit ausreichender Lautstärke. Zum Betrieb von Lautsprechern muß man einige Verstärkerstufen mit Transistoren oder Elektronenröhren verwenden. Die Lautstärke wird an einem Potentiometer geregelt.
4. Im Lautsprecher werden die elektrischen Schwingungen in Schwingungen einer Membran umgewandelt. Diese strahlt die Schallwellen in gleicher Frequenz und relativer Stärke aus, wie sie dem Mikrofon des Senders zugeführt wurden. Die Größe des Lautsprechers und damit die Lautstärke des Empfängers richten sich nach der Leistung der letzten Verstärkerstufe.

Die in Bild 79/1 gezeigte einfache Schaltung ist für Anfänger zum Selbstbau geeignet.

Amateurfunk

Auszug aus den Bestimmungen über den Amateurfunk:

„Die organisatorische Zusammenfassung und Betreuung der Funkamateure obliegt allein der *Gesellschaft für Sport und Technik.*
Die Befugnis zum Besitz von Funksendern oder wesentlichen Teilen davon sowie zum Errichten und zum Betrieb einer Amateurfunkstelle bedarf einer Genehmigung.
Anträge auf Erteilung von Genehmigungen sind bei der *Gesellschaft für Sport und Technik* einzureichen."



Jeder junge Mensch, der Interesse am Funkwesen hat, kann in einer Kollektivstation die ersten Kenntnisse erwerben, um dann als Mitbenutzer der Klubstation oder als Sendeamateur mit eigener Station die Verbindung zu Amateuren in aller Welt aufzunehmen. Mit geringer Sendeleistung, oft nur 10 W, überbrücken die Funkamateure im 20-m-, 40-m- und 80-m-Band große Entfernungen, die zehntausend Kilometer und mehr betragen können. Sie treten mit Amateuren anderer Länder in Verbindung und fördern so den Gedanken der Völkerfreundschaft. Viele GST-Nachrichtensportler können später ihren Ehrendienst in der Nationalen Volksarmee als Funker leisten.

Anwendungsbeispiele zur Nachrichtenübermittlung

Sprechfunk. 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.

Funkortung. Von Sendern ausgestrahlte Hertzsche Wellen ermöglichen die Standortbestimmung für Schiffe und Flugzeuge. Diese Funkortung gewährleistet die Orientierung für die Besatzung solcher Fahrzeuge.

Richtfunk. Die drahtlose Übertragung von Nachrichten über größere Entfernungen erfolgt über Richtfunkstrecken mit Relaisstationen, in denen die ankommenden Signale verstärkt und weitergeleitet werden. Über Relaisstationen, die im Schwerefeld der Erde schweben, werden Nachrichtensendungen um den Erdball gesendet.

Meßfunk. Radarverfahren werden als Funkmeßverfahren eingesetzt, um bewegliche Objekte zu beobachten. Der Einsatz erfolgt in der Industrie, beim Transport, im Straßenverkehr und bei der Landesverteidigung.










Maxwell, Hertz und Popow als Wissenschaftler

Bis zu MAXWELLs bahnbrechenden Erkenntnissen (↗ S. 69) war das Weltbild der meisten Naturforscher von den Grundsätzen der Newtonschen Mechanik bestimmt. Man war bestrebt, alle physikalischen Erscheinungen und Prozesse auf die Gesetze der mechanischen Bewegung zurückzuführen.

MAXWELL beschrieb das Zusammenwirken der elektrischen und magnetischen Felder unter Benutzung der höheren Mathematik durch Gleichungen, die durch ihre Einfachheit berühmt wurden und mit denen die Ausbildung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum mathematisch geschlossen wird. Das war das bedeutendste Ereignis in der physikalischen Wissenschaft nach NEWTON. Das elektromagnetische Feld trat als eine spezielle stoffliche Form der Materie gleichberechtigt neben die Masse und ihre Bewegungsformen.

JAMES CLERK MAXWELL wurde am 13. 6. 1831 als Sohn eines Gutsbesitzers in Edinburgh (Schottland) geboren. Er fiel schon als Kind durch seine besondere mathematische Begabung auf. Nach dem Studium wirkte er als Professor für Physik in Aberdeen und London, anschließend als Privatgelehrter auf dem Lande. 1871 nahm er eine Berufung an die Universität Cambridge an. Neben seinen Vorlesungen baute er entgegen den bestehenden Vorurteilen über den Experimentalunterricht vor allem ein Labor für die Ausbildung der Studenten auf; denn er war der Meinung, daß „das vertraute Werkzeug, Feder, Tinte und Papier, nicht mehr ausreichte". MAXWELL war selbst ein ausgezeichneter Experimentator.
Merkwürdigerweise hat MAXWELL nicht versucht, die von ihm theoretisch vorausgesagten elektromagnetischen Wellen experimentell nachzuweisen. Sicherlich erschien ihm die mathematische Beweisführung so zwingend, daß er eine experimentelle Bestätigung für überflüssig hielt.
Der große Gelehrte, dessen Arbeiten den engen Rahmen der klassischen Physik zu sprengen begannen, starb am 5. 11. 1879 im Alter von 49 Jahren.

Zehn Jahre nach dem Tode MAXWELLs bestätigte HEINRICH HERTZ dessen theoretische Voraussagen durch Experimente.

HEINRICH HERTZ wurde am 22. 2. 1857 in Hamburg als Sohn eines Rechtsanwaltes geboren. Neben seinen guten geistigen Fähigkeiten fiel von frühauf seine Vorliebe für praktische und technische Arbeiten auf. So erlernte er in der Schulzeit aus Interesse bei einem Tischler das Drechseln. Er war auch sehr begabt und interessiert an Sprachen und erlernte neben der italienischen, französischen und englischen beispielsweise auch die arabische Sprache so schnell, daß er auf Anraten seines Lehrers Orientalistik studieren sollte.
Er begann zunächst ein Ingenieurstudium, fand dann aber in der Experimentalphysik das Interessengebiet, dem seine Lebensaufgabe gewidmet sein sollte und das er 1878 an der Universität Berlin bei dem berühmten Physiker HELMHOLTZ zu studieren be-

gann. Nach der Promotion, in der er seine experimentellen und theoretischen Fähigkeiten und seine sicheren und umfassenden Kenntnisse nachwies, stellte ihn HELMHOLTZ als Assistent an.
Der Arbeitsstil des jungen Wissenschaftlers zeichnete sich dadurch aus, daß er an alle Versuchsergebnisse und daraus abgeleitete Folgerungen eine sehr strenge Kritik anlegte. Besonders hervorzuheben ist auch, daß er imstande war, alle mechanischen Arbeiten einschließlich des Glasblasens in vollkommener Weise selbst auszuführen, was seinen Versuchsanordnungen natürlich sehr zugute kam.
HELMHOLTZ kennzeichnete seine Fähigkeiten als eine „höchst seltene Vereinigung von eindringender theoretischer Einsicht und praktischem Geschick".
Während seiner anschließenden Dozententätigkeit in Kiel, bei der er nur wenige Studenten hatte, befaßte er sich mit den Problemen der Elektrodynamik. Aber erst Jahre später, im Herbst 1886, stieß er bei seiner Tätigkeit als ordentlicher Professor der Physik in Karlsruhe auf die Lösung der Fragen, die ihn lange bewegten.
Beim Experimentieren mit elektrischen Ladungen bemerkte er elektromagnetische Erscheinungen zwischen den Windungen zweier benachbarter Drähte. Er griff diese Beobachtung auf und entwickelte systematisch Versuchsanordnungen, über die er am 2. 12. 1886 in sein Tagebuch eintragen konnte: „Gelungen, Resonanzerscheinungen zwischen zwei elektrischen Schwingungen herzustellen". Damit war der erste Schritt getan. Bis zum Jahre 1888 gelang es ihm, noch weitere Eigenschaften der elektrischen Schwingungen und elektromagnetischen Wellen experimentell nachzuweisen.

Eine technische Auswertung seiner Entdeckung hat HERTZ offenbar nicht beabsichtigt. Darin gelang im Jahre 1896 dem russischen Wissenschaftler ALEXANDER STEPANOWITSCH POPOW, ab 1901 Professor am Petersburger Elektrotechnischen Institut, ein erster Erfolg.
Nachdem POPOW jahrelang die Ausbreitung der Hertzschen Wellen untersucht und den Empfang dieser Wellen durch Ausbildung einer Antenne und Verbesserung des damals üblichen Gleichrichters, des aus Metallflittern in einem Glasröhrchen bestehenden „Kohärers", verbessert hatte, gelang ihm der Empfang der von einem Sender ausgestrahlten Morsezeichen für die Worte „Heinrich Hertz".
Die Entfernung, die ursprünglich nur 250 m betrug, konnte er bis zum Jahre 1901 auf 112 km steigern.



Strahlen- und Wellenoptik
Brechung und Reflexion

Beim Abschätzen der Wassertiefe eines klaren Gewässers täuscht man sich häufig. Der auf dem Bild deutlich sichtbare und scheinbar kaum mehr als einen Meter tief unter dem Wasserspiegel liegende Meeresgrund befindet sich in Wirklichkeit mehrere Meter tief unter der Wasseroberfläche. Ursache dieser Erscheinung ist die Brechung des Lichtes.

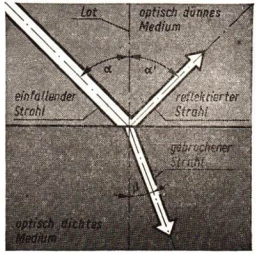
Die Brechung des Lichtes

Aus dem Physikunterricht in der Klasse 6 sind schon folgende Gesetzmäßigkeiten der Optik bekannt:

1. In einem optisch einheitlichen Medium breitet sich das Licht allseitig und geradlinig aus.
2. Lichtstrahlen können sich ungestört kreuzen.
3. Der Lichtweg ist umkehrbar.
4. Trifft Licht auf eine glatte Oberfläche, erfolgt Reflexion nach dem Reflexionsgesetz.
5. Geht ein Lichtstrahl in ein anderes lichtdurchlässiges Medium über, wird er dabei gebrochen.

Bekannt sind folgende optische Erscheinungen:
Ein ins Wasser gehaltener gerader Stock erscheint bei bestimmten Blickrichtungen an der Wasseroberfläche geknickt; ein klares Gewässer erscheint flacher, als es in Wirklichkeit ist.
Wie diese Erscheinung zustande kommt, zeigt ein Experiment. Das Wesen des Vorgangs läßt sich am besten erkennen, wenn vereinfachende Beobachtungsbedingungen geschaffen werden (↗ Brechung einer Welle, S. 29).

84/2 Brechung eines Lichtstrahls



23
Ein schmales Lichtbündel tritt schräg durch die Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Medien (z. B. Luft/Wasser). Das Lichtbündel wird an der Grenzfläche aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt, es wird gebrochen. Das wahrgenommene Bild kann auch fotografisch festgehalten werden. Von dem kleinen Anteil des Lichts, das an der Oberfläche des Wassers reflektiert wird, sehen wir ab.

Diese physikalische Erscheinung heißt „Brechung des Lichts". Der Lichtstrahl im ersten Medium wird **einfallender Strahl,** der im zweiten Medium **gebrochener Strahl** genannt.

In vielen Fällen ist ein Experiment allein noch nicht aussagekräftig genug. Erst wenn man ein zweites Experiment mit einer gegenüber dem ersten Experiment veränderten Bedingung durchführt, kann man erkennen, wie die Veränderung einer Bedingung das Ergebnis beeinflußt.

Durch Verändern des Einfallswinkels oder durch Auswechseln der durchstrahlten Medien findet man:

Die Richtung des gebrochenen Strahls ändert sich in Abhängigkeit von der Richtungsänderung des einfallenden Strahls und bei Veränderung der durchstrahlten Medien.

Die Frage ist berechtigt, ob es einen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen den beobachteten Richtungen der Lichtstrahlen gibt. Bisher ist nur bekannt, daß ein Lichtstrahl beim Übergang in einen anderen Stoff entweder zum Einfallslot hin oder vom Einfallslot weg gebrochen wird.

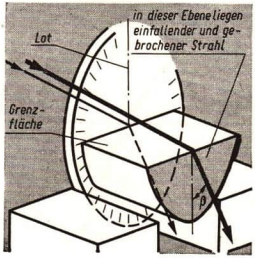
Das Brechungsgesetz

Zum Aufdecken der Gesetzmäßigkeit muß eine Versuchsanordnung verwendet werden, die Winkelmessungen ermöglicht.

24

An einer optischen Scheibe wird ein halbzylindrischer, lichtdurchlässiger Körper angebracht. Ein schmales Lichtbündel wird in einem Winkel von etwa 45° auf den Mittelpunkt M der Scheibe gerichtet. Der Lichtstrahl verläßt unter einem anderen Winkel den lichtdurchlässigen Körper (siehe auch Tabelle 86/1).

85/1 Optische Scheibe



Welche zusammengehörigen Größen sind jeweils zu messen?

Bestimmen Sie die Lage des Winkels α in Bild 85/1!

Beim Justieren der Versuchsanordnung ist schon ein qualitatives Merkmal des gesuchten Gesetzes festzustellen (Bild 85/1):

Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.

Qualitativ ist weiterhin festzustellen:

Der gebrochene Strahl liegt bezüglich des Lots auf der dem einfallenden Strahl entgegengesetzten Seite. Die Winkel α und β verändern sich gleichsinnig.

Zum Registrieren und Auswerten der Meßergebnisse ist die Tabelle 86/1 geeignet:

Das Verhältnis der Winkel. Um eine quantitative Aussage zu erhalten, muß man eine mathematische Beziehung zwischen zusammengehörigen Größen des einfallenden und des ausfallenden Lichtstrahles suchen.

1. Hypothese: Einfalls- und Brechungswinkel verändern sich im gleichen Sinne. Es liegt nahe, jeweils den Quotienten aus den beiden Winkeln zu bilden. Bei Proportionalität müßte der Quotient konstant sein. Das Ergebnis zeigt (Spalte 3 der Tabelle), daß sich hiermit eine einfache allgemeine Beziehung nicht finden läßt. Diese Hypothese muß verworfen werden.
2. Hypothese: Statt der Gradzahlen werden die Sinuswerte der Winkel ins Verhältnis gesetzt. Damit erhält man besser vergleichbare Quotienten (Spalte 4). Also müßte das Verhältnis der Sinuswerte von Einfalls- und Brechungswinkel die gesuchte Gesetzmäßigkeit ausdrücken.

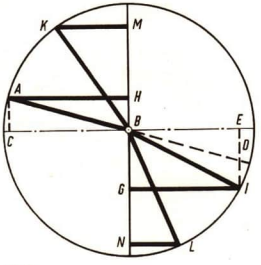
α (in Luft)	β (in Glas)	$\alpha : \beta$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
0°	0°	—	—
10°	6,5°	1,53	1,53
20°	13°	1,53	1,52
30°	19,5°	1,53	1,50
40°	25°	1,60	1,52
50°	31°	1,61	1,50
60°	35°	1,71	1,50
70°	39°	1,78	1,50
80°	41°	1,97	1,50
90°	42°	2,14	—

86/1

Die Abweichungen von dem konstanten Wert sind auf Meßungenauigkeiten in den Grenzbereichen (fast senkrechtes oder streifendes Einfallen des Lichtes) zurückzuführen.

Alle Wiederholungen und Interpolationen ergeben für je ein Stoffpaar immer dieselbe (konstante) Verhältniszahl. Sie ist unabhängig von der Länge der vom Licht zurückgelegten Wege, also unabhängig von der Größe der verwendeten Versuchskörper. Sie ist eine **Wechselwirkungsgröße von Stoffen** und wird bezeichnet als

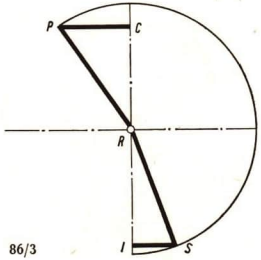
▶ **Brechungszahl** $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$.



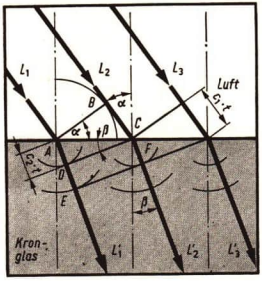
86/2

Das Brechungsgesetz wurde schon 1618 von SNELL VAN ROYEN und etwas verbessert 1638 von DESCARTES formuliert. „Wenn seine Strahlen schräg aus einem durchscheinenden Körper in einen anderen fallen, der sie mehr oder weniger leicht als der erste aufnimmt, werden sie dort abgelenkt ... Es muß nur Obacht gegeben werden, daß die Neigung der Strahlen zu messen ist durch die Menge der Geraden wie CB oder AH und EB oder IG und ähnliche, die jeweils gleich sind; und nicht durch die Winkel wie da sind ABH oder CBI und noch weniger durch solche wie BDI; weil das Verhältnis oder die Proportion zwischen diesen Winkeln bei allen verschiedenen Neigungen der Strahlen variiert, während das, welches zwischen den Geraden AH und IG oder ähnlichen besteht, bei allen vom gleichen Körper verursachten Brechungen das gleiche bleibt."

DESCARTES, La Dioptrique, 1638 (Bilder 86/2, 86/3).



86/3



87/1

Die Brechung eines Lichtstrahles ist auch noch anders als mit geometrischen Größen wie Winkeln und Längen erklärbar, zum Beispiel durch die schon bekannte Modellvorstellung der Huygensschen Elementarwellen (↗ S. 27).

Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten. Messungen ergeben, daß sich Licht in optisch dichteren Medien mit geringerer Geschwindigkeit ausbreitet als in optisch dünneren Medien.

Die Lichtgeschwindigkeit beträgt zum Beispiel:

$$c_{\text{Luft}} = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$
$$c_{\text{Wasser}} = 225\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$
$$c_{\text{Glas}} = 200\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Betrachet werden drei parallele Lichtstrahlen L_1, L_2 und L_3 (Bild 87/1). Während L_2 in Luft die Strecke $\overline{BC} = c_1 \cdot t$ zurückgelegt hat, überwindet L_1 im Glas nur $\overline{AD} = c_2 \cdot t$.

Die von A im Glas sich ausbreitende Elementarwelle hat einen kleineren Radius als die in der Luft. Derselbe Vorgang ist in der folgenden Zeiteinheit für die Lichtstrahlen L_2 und L_1 zu beschreiben. Währenddessen ist L_1 von D nach E gelangt und L_2 von C nach F.

L_1', L_2' und L_3' sind die gebrochenen Strahlen des von Luft in Glas übergetretenen Lichts.

Im Dreieck ALB gilt: $\sin\alpha = \dfrac{c_1 \cdot t}{\overline{AC}}$

Im Dreieck ALD gilt: $\sin\beta = \dfrac{c_2 \cdot t}{\overline{AC}}$.

Wir bilden denselben Quotienten wie bei der Herleitung nach den Winkeln und erhalten

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1 \cdot t \cdot \overline{AC}}{\overline{AC} \cdot c_2 \cdot t} \text{ das heißt } \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Beide Quotienten sind für gleiche Bedingungen gleich groß und gleich der Brechungszahl n.

Vergleichen Sie nach beiden Methoden die Brechungszahl für den Übergang von Licht aus Luft in Glas unter einem Einfallswinkel von 40°!

Gegeben:

$\sin\alpha = 0{,}6428$
$\sin\beta = 0{,}4226$
$c_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
$c_2 = 2 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

Gesucht:

n

Lösung:

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \qquad n = \frac{c_1}{c_2}$$

$$n = \frac{0{,}6428}{0{,}4226} \qquad n = \frac{3 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$n = 1{,}5 \qquad n = 1{,}5$$

Die Brechungszahl n ist bei der Berechnung nach den Winkeln und nach den Lichtgeschwindigkeiten gleich.

Schülerexperiment O 5, S. 128

Diskussion des Brechungsgesetzes. Es ist sehr bemerkenswert, daß die Brechungszahl n eine vom Winkel unabhängige Konstante ist. Zu ihrer Bestimmung sind die Idealisierungen der Strahlenoptik (eindimensionaler Lichtstrahl) eigentlich nicht nötig und auch nicht das Wellenbild von HUYGENS, wenn nur die Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichts in den betreffenden Stoffen bekannt sind.
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist keine typische Wellengröße. Hier liegt also ein Beispiel dafür vor, wie sich **eine** physikalische Erscheinung durch **mehrere** Verfahren beschreiben und erklären läßt.

Es wäre falsch, daraus einseitig schließen zu wollen, das Licht breite sich entweder geradlinig oder wellenlinig aus. Eine Modellvorstellung hat für bestimmte Operationen, zum Beispiel das Erklären eines Sachverhalts, einen Sinn, wenn sie diesen Sachverhalt der objektiven Realität richtig widerspiegelt. Hier trifft es für das Strahlenmodell **und** das wellenoptische Modell zu. Objektiv real ist die Lichtbrechung an der Grenzfläche zweier Medien.

Ansatz zu einer Schlußfolgerung. Wenn man feststellt, daß das Licht gleiche Eigenschaften hat wie die sogenannten Hertzschen Wellen und daß diese sich durch gleiche Verfahren beschreiben lassen, könnte man eine Wesensgleichheit beider Erscheinungen vermuten. Alle weiteren optischen Vorgänge werden bezüglich dieser Vermutung untersucht, um diese anschließend zu bestätigen oder zu verwerfen.
Für den Übergang von Licht aus dem Medium Luft in ein anderes Medium gelten spezielle Brechungszahlen. Diese sind in der nebenstehenden Tabelle 88/1 für einige Medien aufgeführt. Mit Hilfe dieser Brechungszahlen kann der Brechungswinkel errechnet werden.
Die absolute Brechungszahl (gegenüber Vakuum) unterscheidet sich von der gegenüber Luft nur durch den Faktor 1,0003. Man kann also beide mit hinreichender Genauigkeit gleichsetzen.
Im Bild 88/2 wird nun mit dem erarbeiteten Gesetz das zu Beginn des Kapitels aufgeworfene Problem der scheinbaren Untiefe eines Sees erklärt.

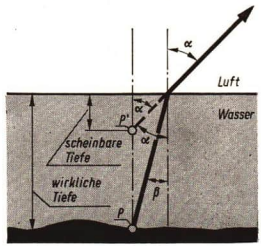
● *Formulieren Sie das vollständige Brechungsgesetz durch Synthese der Einzelaussagen auf den Seiten 85 bis 88!*

Tritt Licht aus einem zweiten in ein drittes Medium über, so gilt an der neuen Grenzfläche wieder das Brechungsgesetz. Durch Wahl der Stoffe und Lage der Grenzflächen kann der Mensch den Verlauf des Lichtbündels beeinflussen. Es sollen hier zwei Sonderfälle besprochen werden. Der Einfachheit halber verfolgen wir den Verlauf von nur einem Lichtstrahl.

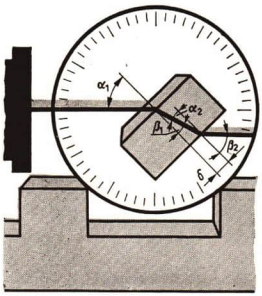
Medium	Brechungszahl
Wasser	1,33
Spiritus	1,36
Kronglas, leicht	1,5
Steinsalz	1,54
Quarz	1,54
Kohlendisulfid	1,63
Flintglas, schwer	1,8
Diamant	2,42

88/1 Brechungszahlen für den Übergang des Lichts aus Luft in ein bestimmtes Medium

88/2 Der von einem Punkt P des Grundes ausgehende Lichtstrahl scheint für den Beobachter von Punkt P′ herzukommen



Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte



89/1 Planparallele optische Platte

25

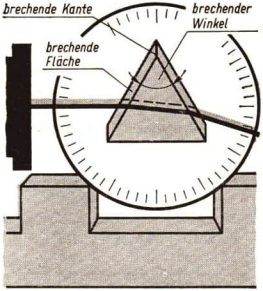
Ein planparalleler, lichtdurchlässiger Körper wird auf einer optischen Scheibe befestigt. Der Lichtstrahl wird bei jedem Durchgang durch eine Grenzfläche gebrochen.

Erklären Sie nach Versuch 25 die verschiedenen Winkel zwischen Lichtstrahl und Lot!

Fällt ein Lichtstrahl schräg durch eine planparallele Platte, so wird er parallel zum ursprünglichen Verlauf verschoben.

Der Betrag der Parallelverschiebung ist von der Glassorte, vom Einfallswinkel und von der Dicke der Platte abhängig. Er ist also eine Eigenschaft des Körpers.

Lichtdurchgang durch ein optisches Prisma



89/2 Optisches Prisma

Bei einem Prisma stehen die Grenzflächen in einem Winkel (sog. brechender Winkel) zueinander, die Schnittlinie der brechenden Flächen wird brechende Kante genannt. Es erfolgt Brechung an jeder Grenzfläche.

26

Ein prismatischer, lichtdurchlässiger Körper wird auf einer optischen Scheibe befestigt. Der Lichtstrahl wird bei jedem Durchgang durch eine Grenzfläche gebrochen.

Erklären Sie die Ablenkung des Lichtstrahls durch Brechung!

Beim Durchgang durch ein optisches Prisma wird das Licht von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Die Gesamtablenkung ist von der Größe des brechenden Winkels und vom Einfallswinkel abhängig.

89/3 Totalreflexion



Die Totalreflexion

Blickt man beim Baden schräg von unten gegen die Wasseroberfläche, so gelingt es nicht, durch die an sich durchsichtige Grenzfläche hindurch Gegenstände zu erkennen, die sich über dieser Fläche befinden (Bild 89/3). Der Sachverhalt dieser Beobachtung läßt sich mit Hilfe des Brechungsgesetzes erklären. Dabei geht man vom allgemein gültigen Brechungsgesetz aus und gewinnt aus ihm ein spezielles Gesetz. Ein derartiges Verfahren nennt man **Deduktion.**

Voraussetzung: Bei der Brechung eines Lichtstrahls kann der Einfallswinkel α praktisch den ganzen Wertevorrat von 0° bis 90° überstreichen. Der Brechungswinkel β ist in

diesem Fall stets kleiner als der Einfallswinkel und erreicht eine obere Grenze β_g.

Es folgt aus $\dfrac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$

für $\alpha = 90°$ $\quad \sin \beta_g = \dfrac{1}{n}$.

■ Bestimmen Sie den Zahlenwert des Grenzwinkels beim Übergang von Luft in Wasser!

Gegeben: $n \approx \dfrac{4}{3}$

Gesucht: β_g

Lösung:

$\sin \beta_g = \dfrac{1}{n}$

$\sin \beta_g \approx \dfrac{3}{4}$

$\beta_g \approx 48{,}6°$.

Erkenntnis:

▷ **Das Licht kann unter allen Einfallswinkeln von einem optisch dünneren in einen optisch dichteren Stoff übertreten.**

Alle Strahlen, die aus dem optisch dünneren Stoff in einen Punkt der Grenzfläche einfallen können, bilden als gebrochene Strahlen im optisch dichteren Stoff einen Lichtkegel um das Lot als Achse und mit dem Winkel $2\beta_g$ an der Spitze (Bild 90/2).

Aus der Umkehrbarkeit des Lichtweges ergibt sich:

▷ **Ist der Winkel des einfallenden Lichtstrahls in einem optisch dichteren Stoff größer als der Grenzwinkel, kann keine Brechung mehr stattfinden. Das Licht wird total reflektiert.**

Die Bezeichnung verweist schon darauf, daß in den anderen Fällen, in denen die Strahlen gebrochen zum anderen Medium übertreten, auch eine Reflexion stattfindet. Der reflektierte Anteil ist bei kleinen Winkeln gering, er wird immer größer und erfaßt schließlich den gesamten Lichtstrahl.

Hier liegt ein Sonderfall der Reflexion vor. Die Grenzfläche der Stoffe verhält sich wie ein vollkommen reflektierender Spiegel. Man bezeichnet diese Erscheinung als **Totalreflexion.**

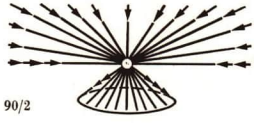
Im Bild 90/3 ist dargestellt: Bereich der total reflektierten Strahlen (1), Bereich der Strahlen, die die Grenzfläche durchdringen (2), Bereich der gebrochenen Strahlen (3), Bereich der total reflektierten Strahlen (4).

● *Beschreiben Sie mit Bild 90/3, was mit dem Licht geschehen kann, wenn es auf die Grenzfläche zweier Stoffe trifft!*

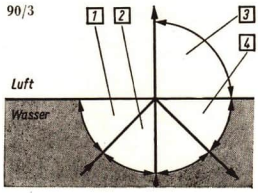
Fragen und Aufträge
111 bis 116, S. 114
Versuche 24 bis 27, S. 118

90/1 Grenzwinkel gegenüber Luft

Medium	Grenzwinkel
Wasser	48,6°
Kronglas	41,1°
schwerstes Flintglas	31,8°
Diamant	24,4°



90/2



90/3

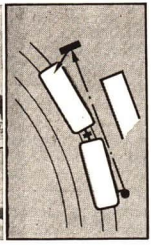
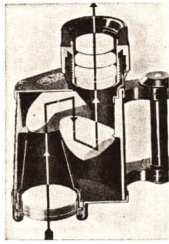
Anwendungsbeispiele zur Reflexion und Brechung

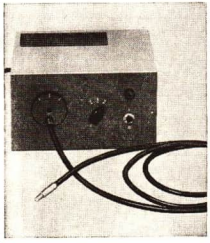
Rückspiegel. Normalerweise unübersichtliche Stellen werden durch Spiegel ins Blickfeld gebracht. Der Strahlengang vom Beobachtungsgegenstand zum Beobachter wird mit Hilfe der Reflexion gelenkt.

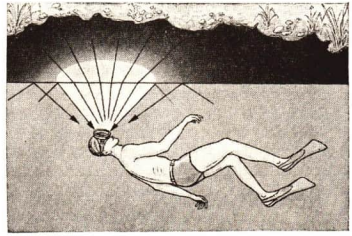
Prismenfernrohr. Die Baulänge eines Fernrohres wird verkürzt, wenn der zwischen den zwei Linsensystemen erforderliche Abstand durch mehrfache Knickung des Strahlenganges auf einer kürzeren Strecke hergestellt werden kann. Die beiden totalreflektierenden Prismen erzeugen außerdem ein seitenrichtiges, aufrechtes Bild.

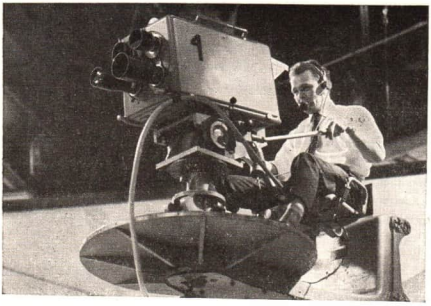
Glasfaser-Optik. Durch ein biegsames Bündel von Glasfasern kann Licht in Längsrichtung der Fasern fortgeleitet werden. Infolge Totalreflexion an der Faseroberfläche folgt das Licht allen Richtungsänderungen des Faserbündels.

Blickfeld durch die Wasseroberfläche. Ein Taucher sieht über sich an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft eine kreisrunde, lichtdurchlässige Fläche. Nur durch diese Fläche hindurch kann er Gegenstände über der Wasseroberfläche sehen. Der übrige Teil der Wasseroberfläche erscheint dem Taucher dunkel, da an ihr nur Licht aus dem Wasser total reflektiert wird.







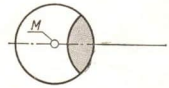
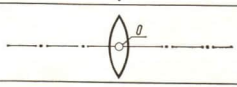
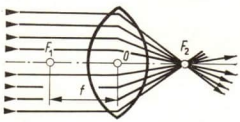
Lichtbrechung an optischen Linsen

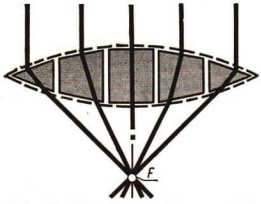
Mit dem Fernsehen sind wir Zeuge bei vielen Veranstaltungen, bei Sportwettkämpfen, Theatervorstellungen, in fremden Ländern, im Weltall und in der nur mikroskopisch erkennbaren Welt.

Zu den wichtigsten Teilen der Kamera gehört das Objektiv, das meist aus einer Kombination mehrerer optischer Linsen besteht.

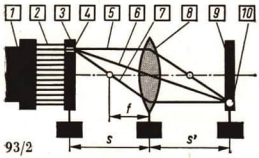
Kenngrößen optischer Linsen

Aus dem Physikunterricht sind bereits die zwei Linsenarten bekannt: Sammellinse (konvex), Zerstreuungslinse (konkav). Bedingung hierfür ist $n > 1$.
Die folgenden Betrachtungen beschränken sich nur auf Sammellinsen.

Bezeichnung	Zeichen	Merkmal	Darstellung
Krümmungsmittelpunkt	M	Mittelpunkt einer Kugel, aus der die Linse herausgeschnitten ist	
Optische Achse		Gerade durch die Krümmungsmittelpunkte M_1 und M_2	
Optischer Mittelpunkt	O	Schnittpunkt der optischen Achse mit der Mittelebene	
Brennpunkt	F	Konvergenzpunkt des durch die Linse fallenden parallelen Lichts	
Brennweite	f	Abstand zwischen O und F	



93/1 Strahlengang am Linsenmodell



93/2

1 Lichtquelle
2 paralleles Lichtbündel
3 Blende
4 Abbildungsgegenstand (Körper)
5 Parallelstrahl
6 Mittelpunktstrahl
7 Brennpunktstrahl
8 Linse
9 Schirm
10 Bild (Lichtpunkt)

Die Bildentstehung

Eine optische Linse kann man sich aus optischen Prismen zusammengesetzt denken (Bild 93/1). Parallel auf die Linse treffende Strahlen kreuzen sich im Brennpunkt.
Um die Bildentstehung beschreiben zu können, müssen einige zweckmäßige Vereinfachungen getroffen werden:

1. Es werden nur dünne Linsen betrachtet.
2. Aus dem vom abzubildenden Körper ausgehenden Licht wählt man drei Strahlen aus, den Parallel-, den Mittelpunkt- und den Brennpunktstrahl.
3. Es wird vorausgesetzt, daß der Stoff der Linse optisch dichter gegenüber der Umgebung ist.

Diskutieren Sie die Umkehrbarkeit des Lichtweges am Beispiel der 3 verwendeten Strahlen und demonstrieren Sie diese Tatsache!

27

Ein Körper, von dem Licht nach allen Seiten ausgestrahlt wird, steht als Abbildungsgegenstand vor einer Linse. Auf einem Schirm wird das Bild des Körpers aufgefangen. Durch Verstellen des Schirmabstandes s' wird das Bild scharf eingestellt.
Durch Verändern der Gegenstandsweite s werden die vier Möglichkeiten (siehe Tabelle) untersucht und jeweils festgestellt, wie sich dabei Ort, Art, Lage und Abbildungsmaßstab des Bildes verändern.

Aus dem Versuch 27 erhält man folgende Ergebnisse:

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite $s > 2f$	auf der anderen Seite der Linse zwischen einfacher und doppelter Brennweite $f < s' < 2f$	reell	umgekehrt	verkleinert $y' < y$
in der doppelten Brennweite $s = 2f$	auf der anderen Seite der Linse ebenfalls in der doppelten Brennweite $s' = 2f$	reell	umgekehrt	ebenso groß wie der Gegenstand $y' = y$
zwischen der doppelten und einfachen Brennweite $2f > s > f$	auf der anderen Seite der Linse außerhalb der doppelten Brennweite $s' > 2f$	reell	umgekehrt	vergrößert $y' > y$
innerhalb der einfachen Brennweite $s < f$	auf derselben Seite der Linse $s' > s$	virtuell	aufrecht	vergrößert $y' > y$

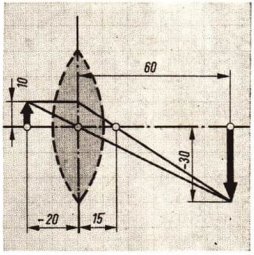
Grafische Darstellung. Das Abbild jedes der oben erfaßten realen Vorgänge läßt sich mit geometrischen Hilfsmitteln konstruieren. Bekannt sein müssen die Brennweite f der Linse, die Gegenstandsgröße y und die Gegenstandsweite s.

Es ist sinnvoll, die Abbildung nur eines Punktes des Gegenstandes zu konstruieren, man nimmt meistens den oberen Begrenzungspunkt. Die Fußpunkte des Gegenstandes und des Bildes sind durch die optische Achse gegeben. Die Brechung des Lichtstrahls wird zeichnerisch vereinfacht an einer Ebene, die man als Linsenhauptebene bezeichnet, vorgenommen. Man benutzt möglichst Millimeterpapier.

Der geometrische Ort eines Punktes ist bekanntlich durch den Schnitt zweier Geraden gegeben. Deshalb benötigt man zur Konstruktion nur zwei Strahlen.

Konstruktion einer Linsenabbildung

Gegeben:	*Lösung:*
$f = 15$ mm	$s' = 60$ mm
$s = -20$ mm	$y' = -30$ mm
$y = 10$ mm	Bild ist umgekehrt
Gesucht:	und reell
s', y'	



94/1 Konstruktion einer Linsenabbildung

Die Abbildungsgleichung für dünne Linsen

Der analytische Ausdruck für den Zusammenhang von Brennweite, Gegenstands- und Bildweite wird aus dem geometrischen Bild des Vorgangs gewonnen.

Voraussetzung: Durch die Linse ist ein zweidimensionales Koordinatensystem (Bild 94/2) gelegt. Die Abszissenachse geht durch den optischen Mittelpunkt, die Ordinatenachse liegt in der Hauptebene.

Ansatz: Wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke BAO und DCO (Bild 94/2) ist

$$(-y') : y = s' : (-s)$$

und wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke FEO und FDC, da EO = BA = y, ist

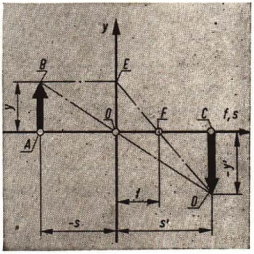
$$(-y') : y = (s' - f) : f.$$

Lösung: Aus beiden Gleichungen folgt

$$s' : (-s) = (s' - f) : f$$
$$s' \cdot f = (-s)(s' - f)$$
$$s' \cdot f = (-s) \cdot s' + s' \cdot f$$
$$(-s) \cdot s' = s' \cdot f - s \cdot f \qquad : (-s) \cdot s' \cdot f.$$

▶ **Abbildungsgleichung für dünne Linsen** $\dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{s'} - \dfrac{1}{s}$

94/2 Zur Linsengleichung
$(-y')$ und $(-s)$ sind die für diesen Ansatz nötigen Beträge der negativen Größen



Durch Umstellen erhält man die Gleichungen für die

Bildweite $s' = \frac{s \cdot f}{s + f}$

Gegenstandsweite $s = \frac{s' \cdot f}{f - s'}$

Brennweite $f = \frac{s \cdot s'}{s - s'}$

Bildgröße $y' = \frac{y \cdot s'}{s}$

Gegenstandsgröße $y = \frac{y' \cdot s}{s'}$

Vergrößerungsmaßstab $A = \frac{y'}{y}$ **bzw.** $A = \frac{s'}{s}$

Es ist zu beachten, daß die Zahlenwerte der verwendeten Größen ein Vorzeichen haben.

Gültigkeitsbereich der Linsengleichung. Sie ist eine Näherungsgleichung für symmetrische Konvex- und Konkavlinsen und gilt nur für dünne Linsen mit relativ großer Brennweite bei achsennahen Strahlen einfarbigen Lichts. (Bei Konkavlinsen ist die Brennweite negativ.)

Wie groß ist die Brennweite einer Linse, die von einem Gegenstand, der 20 cm vom optischen Mittelpunkt entfernt steht, ein virtuelles Bild mit der Bildweite von 60 cm erzeugt? Berechnen Sie den Abbildungsmaßstab!

Gegeben:

$s = -20\ \text{cm}$

$s' = -60\ \text{cm}$

das Bild ist virtuell

Gesucht:

f

A

Lösung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}$$

$$f = \frac{s' \cdot s}{s - s'}$$

$$f = \frac{(-60\ \text{cm}) \cdot (-20\ \text{cm})}{(-20\ \text{cm}) - (-60\ \text{cm})}$$

$$\underline{\underline{f = +30\ \text{cm}}}$$

$$A = \frac{s'}{s}$$

$$A = \frac{-60\ \text{cm}}{-20\ \text{cm}}$$

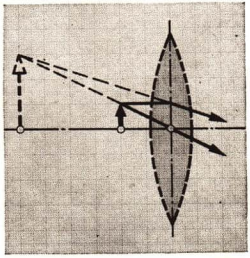
$$\underline{\underline{A = +3}}$$

Ergebnis: Es ist eine Sammellinse, deren Brennweite 30 cm beträgt. Das Bild ist dreimal so groß wie der Gegenstand und aufrecht (Minus drei würde umgekehrt bedeuten!)

Zeichnerische Bestätigung des Ergebnisses (Bild 95/1).

Schülerexperiment O 6, S. 130

95/1



Optische Geräte

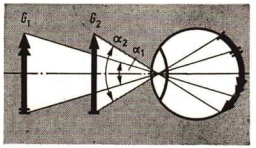
Optische Linsen sind die wichtigsten Bestandteile optischer Geräte. Die Produktionstechnik optischer Geräte und die wissenschaftliche Durchdringung der Lehre vom Licht entwickelten sich wechselwirkend in Abhängigkeit von der wirtschaftlichen Notwendigkeit. Mehrere Jahrhunderte lang boten optische Geräte den Wissenschaftlern die einzige Möglichkeit zur Beobachtung des sehr Fernen und des sehr Kleinen. Obwohl es heute Elektronenmikroskope, Radarstationen und Laserapparate gibt, ist die Bedeutung der lichtoptischen Geräte nicht geringer geworden, und in unserer Republik wird bei der prognostischen Planung diesem Industriezweig eine große Beachtung gewidmet (↗ S. 108).

Fragen und Aufträge
117 bis 129, S. 114

Fotoapparate, Bildwerfer und Mikroskope sind Gebrauchsgegenstände in der Schule, im Betrieb und im Haushalt. Ihre richtige Handhabung setzt die Kenntnis der wichtigsten wissenschaftlichen Grundlagen voraus.

Beispielhaft für die Anwendung optischer Linsen sei hier die Analyse zweier Geräte nach den wesentlichen Merkmalen vorgenommen.

Allgemeine Merkmale für optische Geräte. Zweck ist das Aufnehmen und Festhalten von Bildern (zum Beispiel mit einem Fotoapparat) und das Vergrößern des Sehwinkels. Am Gerät müssen sich die richtige Belichtung und die gewünschte Schärfentiefe einstellen lassen. Charakteristisch ist auch das erforderliche Auflösungsvermögen, d. h. daß bei einer bestimmten Vergrößerung zwei benachbarte Punkte getrennt voneinander erkannt werden können.



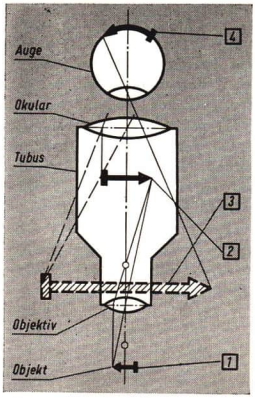
96/1 Sehwinkel und Abstand eines Gegenstandes vom Auge

● *Definieren Sie den Sehwinkel anhand Bild 96/1!*

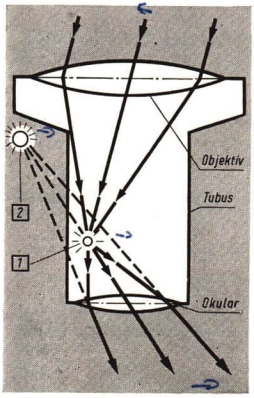
Die Abstände und Größenverhältnisse von Gegenstand und Bild hängen ab von den physikalischen Gesetzen. Die Abbildungsgleichung und damit das Brechungsgesetz erfahren hier eine bewußte Anwendung. Andere Vorgänge, die gleichzeitig gesetzmäßig wirksam, aber nicht erwünscht sind, werden bewußt unterdrückt. Das gilt zum Beispiel für die Reflexion auf der Oberfläche des Objektivs eines Fotoapparates. Ein blau schimmernder transparenter Belag verhindert diese Reflexion.

Die Abmessungen eines optischen Gerätes sind abhängig von der Art des Bildes, das erzeugt werden soll; sie lassen sich nicht beliebig verändern. Die Form der Linse, ob kreisrund, elliptisch oder eckig, hat auf die optischen Eigenschaften keinen wesentlichen Einfluß. Der Wandel in der äußeren Gestalt der Augengläser zum Beispiel ist eine Frage der Mode, nicht der Wissenschaft.

Schülerexperiment O 7, S. 132



97/1 Prinzip eines Mikroskops
1 Bildgegenstand
2 reelles Zwischenbild
3 virtuelles Zwischenbild
4 Netzhautbild



97/2 Prinzip eines Fernrohrs
1 reelles Zwischenbild
2 virtuelles Hauptbild

Spezielle Merkmale des Mikroskops. Zweck des Mikroskops ist es, von einem sehr kleinen Gegenstand, der greifbar nahe ist, ein möglichst großes Bild zu erzeugen. Das wird mit zwei konvergenten Linsensystemen erreicht (Bild 97/1):

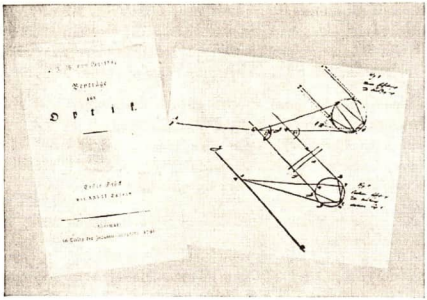
1. Das Objektiv (Brennweite einige Millimeter) gibt ein reelles, stark vergrößertes Bild.
2. Das Okular (Brennweite einige Zentimeter) dient als Lupe und liefert ein nochmals vergrößertes virtuelles Bild der vom Objektiv erzeugten reellen Abbildung.

Erklären Sie mit Ihren physikalischen Kenntnissen aus Klasse 6 die Wirkungsweise der Lupe!

Das Mikroskop ist für individuelle Beobachtung eingerichtet. Sollen reelle Endabbildungen geschaffen werden (Mikrofotografie und Mikroprojektion), muß die Stellung des „Okulars" verändert werden.
Der Abstand zwischen Objektiv und Okular bestimmt die Länge des Tubus. Die Scharfeinstellung erfolgt durch Verschiebung des Tubus gegenüber dem Gegenstand. Der Tubus muß einen solchen Durchmesser haben, daß darin das reelle Zwischenbild des Objektivs Platz hat.
Spezielle Merkmale des astronomischen Fernrohres. Das astronomische Fernrohr (1611 von KEPLER erfunden) wird auch Keplersches Fernrohr genannt.
Seine Aufgabe ist es, den Sehwinkel zu vergrößern, mit dem das Auge einen sehr entfernten Gegenstand erfaßt. Es erzeugt damit dieselbe Wirkung, als wenn der Gegenstand entweder größer oder näher an das Auge gerückt würde.
Das wird mit zwei konvergent wirkenden Linsensystemen erreicht:

1. Das Objektiv (Brennweite einige Meter) bildet einen sehr fernen Gegenstand, von dem die Strahlen parallel einfallen, in der Brennebene reell umgekehrt ab.
2. Das Okular (Brennweite einige Zentimeter) dient als Lupe. Seine Brennebene fällt mit der des Objektivs zusammen. Also erzeugt das Okular ein virtuelles Bild, das, streng genommen, im Unendlichen liegt.

Der Abbildungsmaßstab eines Fernrohres ist gleich dem Quotienten der Brennweiten von Objektiv und Okular. Der größere Sehwinkel vergrößert den scheinbaren Abstand zwischen zwei Punkten.
Das Keplersche Fernrohr kann auch zur Beobachtung von nicht scheinbar im Unendlichen liegenden Gegenständen benutzt werden. Zum Zwecke einer scharfen Abbildung muß dazu jedoch der Abstand von Objektiv und Okular verändert werden.



Die Dispersion des Lichtes

Die Zerlegung des Lichtes regte schon immer die Menschen zur Verwunderung und Freude an. J. W. von GOETHE beschäftigte sich längere Zeit mit diesem Sachverhalt. Heute empfinden wir auch noch Freude an der Schönheit zum Beispiel des Regenbogens, wir sind aber durch Einsicht in die physikalischen Ursachen außerdem in der Lage, diese Erscheinung vielseitig zu nutzen.

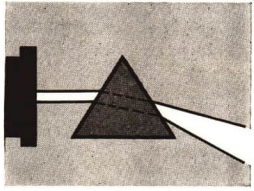
Die Spektralfarben

Die Brechung (Refraktion) beim Übergang von einem Stoff in einen anderen ändert die Ausbreitungsrichtung des Lichtes. Durch die Form des durchstrahlten Körpers ist die Richtung beeinflußbar. 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 schon aufgetreten ist, aber möglichst unterdrückt wurde, soll nun besonders untersucht werden. Es ist das **Auftreten von Farben.** Dazu ist eine Versuchsanordnung nötig, die diese Erscheinung extrem begünstigt.

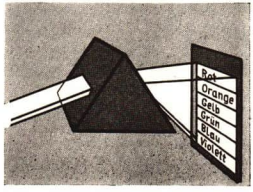
28 ▼ Ein durch das Prisma geschicktes Lichtbündel ist hinter dem Prisma nicht nur abgelenkt, sondern auch breiter als vorher. Es taucht die Frage auf, ob diese Beobachtung dem Brechungsgesetz widerspricht (Bild 98/2).

29 ▼ Ein schmales paralleles Strahlenbündel (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.
Beobachtungsergebnis: Der auf dem Schirm abgebildete Spalt ist nicht nur abgelenkt und breiter als vorher, er ist auch nicht mehr weiß, sondern er glänzt in prächtigen Farben, wie sie vom Regenbogen bekannt sind. NEWTON nannte den erhaltenen farbigen Fleck **Spektrum** (Bild 98/3).

98/2 Ablenkung und Verbreiterung eines Lichtstrahlenbündels durch ein optisches Prisma



98/3 Entstehung eines Spektrums



Schülerexperiment O 8, S. 133

Die im Versuch 29 sichtbar gemachten verschiedenen Farben gehen allmählich ineinander über, so daß man die Zahl der Farbtöne nicht genau angeben kann.

Die Hauptfarben des Spektrums sind Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett. ◁

Die vom Prisma hervorgerufene Ablenkung ist abhängig vom brechenden Winkel, vom Einfallswinkel und von der Brechungszahl der beteiligten Stoffe. Die einzige für jeden Farbanteil spezifische Größe ist die Brechungszahl. Dieser Schluß zwingt zur Aufgabe einer bisher getroffenen vereinfachten Feststellung, als habe ein Stoff bezüglich eines anderen nur eine einzige Brechungszahl.

NEWTON stellte zur Erklärung des Sachverhalts folgende **Hypothesen** auf (wörtliche Übersetzung):

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

2. Ein gegebener durchscheinender Stoff besitzt für jedes farbige Licht eine spezielle Brechungszahl.

Diese Hypothesen sind durch alle weiteren Erfahrungen bestätigt worden. Ihre Aussagen sind Bestandteil einer gesicherten Theorie der Optik. Die Werte der Brechungszahlen für die Hauptfarben des Spektrums beim Übergang von Luft in Kronglas enthält Tabelle 99/1.

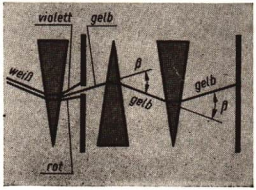
Die kleine Differenz von 0,019 entspricht nur ungefähr einem Prozent des Mittelwertes 1,52. Es ist nicht überraschend, daß bei manchen Experimenten die Abweichung gar nicht beobachtet wird. Deshalb kann man in guter Übereinstimmung mit der Praxis oft **einen** Wert der Brechungszahl des Glases für **alle** Farben benutzen.

Deuten Sie aus Bild 99/2 den Begriff Grundfarbe! ●

99/1 Brechungszahlen der Spektralfarben beim Übergang von Luft in Kronglas

Farbe	Brechungszahl
Rot	1,513
Orange	1,514
Gelb	1,517
Grün	1,519
Blau	1,528
Violett	1,532

99/2 Nachweis einer Grundfarbe



Kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum

(Einteilung der Spektren nach der Form)

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

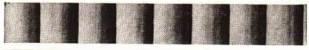
Eine Natriumdampflampe – oder einfach eine durch Kochsalz gefärbte Gasflamme – liefert zum Beispiel in der Versuchsanordnung nach Bild 99/2 nur ein gelbes Spaltbild auf dem Schirm. Bei genügender Vergrößerung des gelben Striches erkennt man sonst verborgene Einzelheiten, nämlich daß es sich hier um zwei getrennte breite gelbe Linien handelt. 30 ▼

Andere Stoffe lassen hinter dem Prisma andersfarbige Linien auf dem Schirm erscheinen.

● *Sind auch diese Linien Spektren?*

▶ **Ein lückenlos zusammenhängendes Farbband der Spektralfarben nennt man kontinuierliches Spektrum. Die diskontinuierlichen Spektralbilder heißen Linienspektren.**

Ein kontinuierliches Spektrum kann auch unvollständig sein, zum Beispiel fehlt in dem Spektrum der Kerzenflamme der blaue Anteil.
Nach der Art des untersuchten Stoffes unterscheidet man:

Stoff	Bezeichnung des Spektrums	Beispiel
1. atomares Gas	Linienspektrum	
2. molekulares Gas	Bandenspektrum	
3. Festkörper	kontinuierliches Spektrum	

Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum

(Einteilung der Spektren nach der Entstehung)

31

▼ Wird bei einer Geräteanordnung von Spalt, Prisma und Schirm der Spalt mit einer Natriumflamme beleuchtet, sieht man bekanntlich 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 Kontinuum an bestimmter Stelle die gelbe Linie.

Im ersten Fall hat der Stoff der Lichtquelle das Spektrum durch „Ausssenden" von Licht erzeugt, deshalb die Bezeichnung **Emissionsspektrum** (emittere [lat.]: aussenden). Im zweiten Fall hat der Stoff der Lichtquelle (Natrium) aus dem Licht einer anderen Lichtquelle (Glühlampe) einen Teil „verschluckt", nicht hindurchgelassen, man spricht von **Absorptionsspektrum** (absorbere [lat]: verschlucken).
Als Beispiele für Emissionsspektren seien die Spektren leuchtender Gase genannt, die zum Beispiel mit den sogenannten Spektralröhren erzeugt werden können. Das be-

Ort des Stoffes	Stoff ist Lichtquelle
Bezeichnung des Spektrums	Emissionsspektrum
Merkmal	helle farbige Linien auf dunklem Grund

Ort des Stoffes	Stoff zwischen Lichtquelle und Spalt
Bezeichnung des Spektrums	Absorptionsspektrum
Merkmal	dunkle Linien im kontinuierlichen Spektrum (vgl. Farbtafel)

101/1

101/2 Spektralanalyse



kannteste Absorptionsspektrum ist das der Fraunhoferschen Absorptionslinien im Sonnenspektrum (siehe Farbtafel).

Joseph von Fraunhofer entdeckte 1814 diese dunklen Linien im scheinbar kontinuierlichen Sonnenspektrum. Es sind einige Tausend, die wichtigsten hat man mit Buchstaben bezeichnet. Die von der Sonnenoberfläche, der Photosphäre, kommende Strahlung durchdringt die äußere Gashülle der Sonne und wird dort zum Teil absorbiert. Dadurch entstehen die dunklen Linien.

Nach dem Ort des untersuchten Stoffes in der Versuchsanordnung unterscheidet man (Tabelle 101/1):

Die Spektralanalyse

Die Spektren geben Informationen über die stoffliche Beschaffenheit eines Körpers. 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 untersucht. Das Verfahren heißt Spektralanalyse und das dazu verwendete Gerät Spektralapparat.

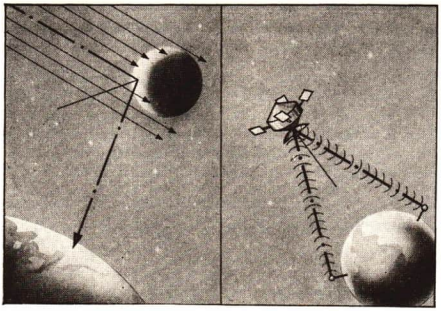
Obwohl man nur von Spektralanalyse spricht, sind in diesem Verfahren **analysierende** und **synthetisierende** Schritte vereint, um einen Stoff zu bestimmen.

Die Spektralanalyse ist ein optisches Verfahren wie das Arbeiten mit Mikroskop und Fernrohr.

Welche Eigenschaften eines materiellen Objekts können a) mit dem Fernrohr, b) mit dem Mikroskop und c) mit dem Spektralapparat bestimmt werden?

Für diese Methode der Materialprüfung ist nur eine sehr geringe Masse des Stoffes notwendig (Größenordnung 10^{-7} mg, das heißt zehnmilliardstel Gramm!). 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 Stoffe untersucht werden, sondern auch kosmische Objekte sind durch das von ihnen ausgesandte Licht erfaßbar. Neuerdings werden die astrophysikalischen Forschungen durch die sowjetischen und amerikanischen Weltraumflugkörper erweitert. Die Ergebnisse zeigen, daß in allen Bereichen des Kosmos der gleiche stoffliche Aufbau aus den gleichen Elementen zu finden ist. Sie bestätigen die materielle Einheit der Welt.



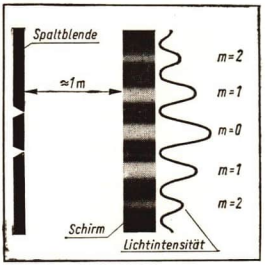
Das Licht als elektromagnetische Welle

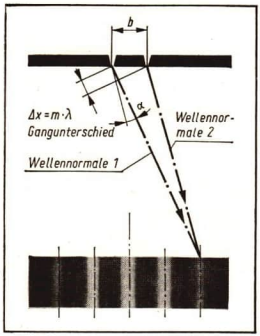
Ein Funksignal wird von einem Sender ausgestrahlt. Es breitet sich aus und kann an anderer Stelle wieder empfangen werden. An einem Reflektor wird es reflektiert.
Ein Lichtsignal wird von einer Lichtquelle ausgestrahlt. Es breitet sich aus und kann an anderer Stelle wieder empfangen werden. Am Reflektor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

Die für Funksignal und Lichtsignal angeführten Sachverhalte unterliegen gleichen Gesetzmäßigkeiten bei der Ausbreitung. Sind sie in ihrem physikalischen Wesen auch gleich?
Eine farbige Zerlegung des Lichtes in Spektren erhält man nicht nur durch Prismen, sondern auch durch Gitter. Ein optisches Gitter ist eine Kombination vieler schmaler Spalte mit lichtundurchlässigen Zwischenräumen, regelmäßig auf engem Raum angeordnet.
Die Brechung, den Vorgang im Prisma, kann man mit Hilfe des Strahlenganges erklären, so als ob sich *Teilchen des Lichts* längs der Strahlen geradlinig ausbreiten. Es sei aber daran erinnert, daß die Erklärung der Brechung des Lichts beim Übergang von einem Medium in ein anderes auch mit dem Huygensschen Wellenbild möglich ist.
Wie ist nun der Vorgang an den Spalten des Gitters zu beschreiben?

Der beobachtete Sachverhalt. Schickt man ein Lichtbündel durch ein spaltförmiges Hindernis, so zeigt sich auf einem dahinter befindlichen Schirm 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 Helligkeitsmaxima verschieden weit auseinander, bei Verwendung von weißem Glühlicht entstehen aufeinanderfolgende kontinuierliche Spektren.
Die Erklärung des Sachverhalts. Das Verfahren der Beschreibung mit Hilfe von Licht**strahlen** versagt hier. Mög-

102/2 Beugung am Doppelspalt





103/1 Ordnungszahl $m = 0; 1; 2; 3 \ldots$ gilt für Helligkeitsmaxima

lich ist aber die Verwendung des **Wellen**bildes. Das Gitter ist danach Hindernis für eine einfallende Wellenfront. Jeder Spalt ist Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle. Die (in der Fläche gesehen) sich kreisförmig ausbreitenden neuen Wellenfronten überlagern sich. Nach dem Superpositionsprinzip erfolgt dabei eine maximale Verstärkung bei Wellenfronten gleicher Phase (Gangunterschied $x = m \cdot \lambda$), bei Wellenfronten entgegengesetzter Phase $\left(\text{Gangunterschied } x = m \cdot \frac{\lambda}{2}\right)$ erfolgt totale Auslöschung $(m = 1, 2, 3 \ldots)$.

Die beobachtete Wirkung (das Spektrum) hat seine Ursache in der Überlagerung (Interferenz) von Wellen. Die Ursache für das Entstehen solcher Wellenfronten, die sich überlagern können, nennt man **Beugung** am Spalt.

Das Abweichen des Lichts von der geradlinigen Ausbreitung im selben Medium heißt Beugung.

Zeichnerische Erläuterung (Bild 103/1): Spaltabstand b (Gitterkonstante) und Winkel α sind nicht maßstabgerecht

$$\sin\alpha = \frac{\Delta x}{b}, \quad \sin\alpha = \frac{m \cdot \lambda}{b}$$

Wo liegt das Helligkeitsmaximum nullter Ordnung?

Bedingungen für ein gutes Gitterspektrum:

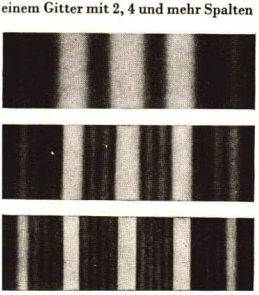
Spaltbreite $\leqq$ Wellenlänge, Schirmabstand > 1 m

je größer die Anzahl der Spalte, desto ausgeprägter die Helligkeitsmaxima.

Unterschiede zwischen Gitter- und Prismenspektren

1. Die Farbfolge ist umgekehrt, rotes Licht wird am wenigsten gebrochen, aber am stärksten gebeugt.
2. Der Beugungswinkel ist annähernd der Wellenlänge proportional, der Brechungswinkel dagegen nicht.

103/2 Beugungserscheinung hinter einem Gitter mit 2, 4 und mehr Spalten



Die Beugung wird oft wenig beobachtet.

Die Wellenlänge des Lichtes ist sehr klein ($\approx 500 \cdot 10^{-9}$ m), das für die Beugung notwendige Hindernis muß in dieser Größenordnung sein. Diese Bedingungen sind normalerweise selten erfüllt. Außerdem bedarf es einer sehr genauen Beobachtung, um das Beugungsbild zu erkennen.

Der Schall unterliegt der gleichen, leicht beobachtbaren Beugungserscheinung. Wenn der Lärm von der Hauptverkehrsstraße auch in den Seitenstraßen zu hören ist, dann ist das neben der Reflexion eine Folge der Beugung; denn der Schall hat eine relativ große Wellenlänge gegenüber der „Spaltbreite" einer Querstraße.

Die Welleneigenschaften des Lichts

Manche optischen Vorgänge lassen sich mit Hilfe von Strahlen beschreiben und erklären (die Reflexion, die Bildentstehung mit Linsen). Es gibt aber auch optische Vorgänge, die nur mit Hilfe von Wellen zu beschreiben und erklären sind (z. B. die Beugung).

Der Schluß aus diesem scheinbaren Widerspruch kann nicht in der Alternativfrage bestehen: Ist das Licht eine Welle oder besteht es aus Strahlen?

Licht und Schall sind physikalische Erscheinungen, und beide sind objektiv real. Dagegen sind Strahl und Welle abstrakte Bilder, **Modellvorstellungen,** die uns eine Beschreibung des natürlichen Vorgangs gestatten. Diese Modellvorstellungen spiegeln bestimmte Eigenschaften des objektiv realen Sachverhalts wider.

Nicht jede Modellvorstellung ist zur Erklärung jeder Erscheinung geeignet, aber das Bild der wellenförmigen Ausbreitung ist für das Licht umfassender anwendbar als das der strahlenförmigen Ausbreitung.

Bei tieferem Eindringen in die Physik erweist sich die **Strahlenoptik** (oft auch geometrische Optik genannt) als **ein Sonderfall der Wellenoptik,** nämlich wenn die Ausmaße der optischen Geräte sehr groß gegenüber der Wellenlänge sind, so daß Interferenzeffekte bei ihnen gewöhnlich nicht auffallen. Es stimmt also mit den experimentellen Beobachtungen überein, wenn man von einer wellenförmigen Ausbreitung des Lichts spricht. Eine Welle hat bekanntlich zwei wesentliche Bestimmungsstücke: die Frequenz beziehungsweise die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Wellenlänge läßt sich sehr gut aus den Beugungsspektren bestimmen. Sie ist viel kleiner als die Wellenlänge des Schalls. Bei der Suche nach dem Wesen der Sache haben die Physiker gefunden, daß das Licht mit dem Schall allerdings nur die Ausbreitungsform gemeinsam hat. Bei den „Schallwellen" handelt es sich um eine wellenförmige Übertragung mechanischer Energie, die an einen stofflichen Träger gebunden ist.

Bei den „Lichtwellen" handelt es sich um eine wellenförmige Übertragung von elektromagnetischer Energie, die keines stofflichen Trägers bedarf. Ein Lichtsignal breitet sich mit derselben Geschwindigkeit aus wie ein Funksignal und zeigt auch in seiner Entstehung Wesensgleichheit mit diesem.

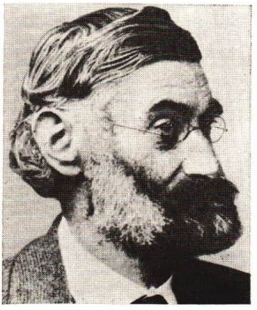
Es hat sich erwiesen:

▶ **Licht ist ein elektromagnetischer Sachverhalt.**



104/1 Carl Zeiss (1816 bis 1888) Handwerksmeister in Jena, stellte in Kleinbetrieb Mikroskope für Universitäten her, entwickelte optische Geräte durch Probieren, arbeitete ab 1866 mit Wissenschaftler Abbe zusammen, erzielte dadurch bessere Qualität der Geräte, führte Serienfertigung ein, der Zeiss-Betrieb wurde zum Großbetrieb, heute größter optischer Betrieb.

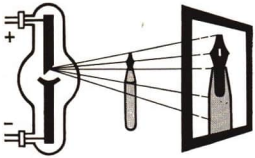
104/2 Ernst Abbe (1840 bis 1905) Physiker in Jena, entwickelte eine Theorie des Mikroskops, führte optisch-feinmechanische Meß- und Prüfverfahren ein, stellte den Mikroskopbau auf wissenschaftliche Grundlage, leitete später den Großbetrieb Carl Zeiss Jena.



Die Röntgenwellen



Wilhelm Conrad Röntgen (1845 bis 1923) entdeckte 1895 eine nach ihm benannte Strahlungsart. Er erhielt dafür 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Die Entdeckung erfolgte bei der Untersuchung der damals noch nicht lange bekannten Katodenstrahlen.

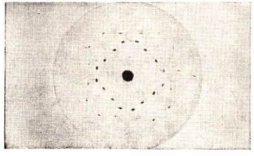


105/2 Röntgen-Durchleuchtung

105/3 Röntgenschirmbild



105/4 Laue-Diagramm



Das Erscheinungsbild der Röntgenwellen

Die von Röntgen entdeckte Strahlung hat ähnliche Eigenschaften wie das Licht. Sie ist zwar selbst unsichtbar, bringt aber bestimmte Stoffe beim Auftreffen zum Leuchten. Ihre sichtbaren Wirkungen lassen auf den gleichen Ausbreitungsvorgang wie beim Licht schließen.

32 ▼

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 Röntgenstrahlung verursacht auf dem Schirm ein sichtbares Licht. In den Strahlengang gehaltene metallene Gegenstände, auch Knochen, heben sich als Schatten ab (Bild 105/2).

Die stofflichen Körper sind für Röntgenstrahlung unterschiedlich durchlässig. Von relativ großen Körpern (z. B. den Knochen einer Hand) zeichnet diese Strahlung deutliche Schattenbilder auf dafür geeignete Leuchtschirme. Bei Wechselwirkungen von Röntgenwellen mit Mikroobjekten (z. B. den Kristallgittern eines Metalls) treten dagegen Beugungseffekte auf, die zu Interferenzen führen. Zur Beschreibung der von dieser Strahlung verursachten Wirkungen sind also offensichtlich die gleichen Methoden wie beim sichtbaren Licht anwendbar. In den Bildern 105/3 und 105/4 wird an zwei Beispielen gezeigt, wie die Abbildungen bei verschiedenen Durchstrahlungsformen lichtundurchlässiger Körper aussehen.

Das Entstehen der Röntgenwellen

Die vermutete Wesensgleichheit von Licht und Röntgenstrahlung ist aus der Art der Erzeugung dieses neuen „Lichts" zunächst nicht erkennbar. In Abhängigkeit von den geschaffenen Bedingungen können zwei Arten von Röntgenstrahlung entstehen.

Die eine, die sogenannte *Bremsstrahlung*, hat ihre Ursache im schnellen Abbremsen des von einer Wolfram-Glühkatode emittierten Elektronenstroms auf der Oberfläche der Anode. Wie an einem Dipol wird von dem sich ständig ändernden Strom ein elektromagnetisches Feld ausgestrahlt. Die Erzeugung wird technisch in einer Röhre bewältigt. Die andere Art, die sogenannte *charakteristische Strahlung*, tritt bei sehr hohen Spannungen auf, wenn die auftreffenden Elektronen aus den Atomen der Katode innere Elektronen herausschlagen. Dabei fällt ein äußeres Elektron schnell in den frei gewordenen niederen Energiezustand herab, und das Atom sendet elektromagnetische Wellen aus.



106/1 Vereinfachte bildliche Darstellung der Entstehung von charakteristischer Röntgenstrahlung

Das Wesen der Röntgenwellen

Wie die experimentellen Ergebnisse zeigen auch die Untersuchungen des Entstehens eine Ähnlichkeit von Licht und Röntgenwellen. Ihrem Wesen nach sind beide elektromagnetische Sachverhalte. Gleich ist für beide die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Ihre spezifischen Unterschiede zeigen sich in den Merkmalen Frequenz und Wellenlänge. Nach der Planckschen Gleichung $W = h \cdot \nu$ ist mit der Frequenz eine Aussage über die Energie verbunden. Die Energie des „Röntgen-Photons" ist hier gleich einer Energiedifferenz im ausstrahlenden Atom. Die Anregungsenergie muß durch die angelegte Spannung mindestens gleich der Energie der emittierten Röntgenwellen sein.

$U \cdot e \geqq \Delta W = W_{\text{Rö}}$; $U \cdot e$ ... Beschleunigungsenergie

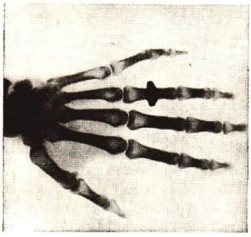
ΔW ... Energiedifferenz des springenden Elektrons

$W_{\text{Rö}}$ ... Energie der Röntgenstrahlung

Wir können uns die Energie der Röntgenstrahlung $W_{\text{Rö}}$ als Energie des ausstrahlenden elektromagnetischen Feldes vorstellen (dann benutzen wir das Wellenbild der Ausbrei-



107/1 Von den Ausgaben des Staatshaushaltes der DDR entfielen im Jahre 1965 etwa 27% auf das Gesundheits- und Sozialwesen
Große Aufmerksamkeit wird der Bekämpfung der Tbk gewidmet. Allein für den Gesundheitsschutz und die Gesundheitskontrolle sowie für Röntgen- und Strahleninstitute wurden im Jahre 1965 rund 380 Millionen Mark ausgegeben.



107/2

tung) oder als kinetische Energie eines „Röntgenphotons" (dann benutzen wir das Strahlenbild der Ausbreitung).
Der Charakter der elektromagnetischen Strahlung im einzelnen ist immer abhängig von der Art der Anregung. In der Röntgenröhre werden sehr hohe Energien aufgewendet (bis zu 300 000 Elektronenvolt), darum hat die Röntgenwelle auch eine größere Durchdringungsfähigkeit als zum Beispiel das sichtbare Licht.
Anwendung der Röntgenwellen. Nachweisen lassen sich Röntgenwellen durch die von ihnen verursachte Fluoreszenz in bestimmten Stoffen (z. B. Zinksulfid). Derartige fluoreszierende Stoffe werden zur Herstellung von Leuchtschirmen verwendet. Eine andere Nachweismethode benutzt fotografische Schichten, die von Röntgenwellen geschwärzt werden. Das Durchdringungsvermögen dieser Wellen wird schon seit längerer Zeit im Gesundheitswesen genutzt. Durchleuchtungen werden mit relativ weichen, das heißt niederfrequenten Röntgenwellen am menschlichen Körper durchgeführt. Mit den relativ harten, das heißt hochfrequenten Röntgenwellen ist auch das Durchleuchten metallener Gegenstände möglich. So können zum Beispiel Schweißnähte oder Gußstücke auf ihre Homogenität röntgenologisch untersucht werden.
Röntgenwellen sind auch in der Lage, Gase zu ionisieren. Von großer Bedeutung, aber auch Gefahr, ist die Eigenschaft der Röntgenwellen, lebendes Gewebe zu zerstören oder im Wachstum zu beeinflussen.

Vergleichen Sie das Röntgenbild einer Hand (Bild 107/2) mit dem, was Sie an Ihrer über eine leuchtende Taschenlampe gelegten Hand erkennen können!

Das elektromagnetische Spektrum

In diesem Abschnitt sollen keine neuen Kenntnisse vermittelt, sondern bekannte Erscheinungen nach bestimmten Gesichtspunkten geordnet werden. Es handelt sich um die einzelnen Arten elektromagnetischer Strahlung, die – nach einer Idee LEBEDEWS (um 1900) klassifiziert – eine kontinuierliche metrische Skale belegen. Dies ist eine wichtige neue Erkenntnis. Ein sehr kleiner, aber zentraler Bereich dieser Skale gehört dem sichtbaren Licht. Da sein Spektrum nach den Merkmalen Frequenz und Wellenlänge über beide Enden extrapoliert worden ist, nennt man die ganze Skale elektromagnetisches **Spektrum.**
Alle in der Skale zusammengefaßten Sachverhalte sind physikalisch **im Wesen gleich:**

Sie entstehen durch die beschleunigte Bewegung elektrischer Ladungsträger. Durch Zuführen von Energie, das heißt durch das Verrichten von Arbeit, müssen Ladungsträger in Schwingungen versetzt werden. Bei diesem Vorgang lösen sich elektromagnetische Felder vom Generator. Das Feld ist Träger der umgewandelten Energie und breitet sich mit einer Geschwindigkeit von $c = 3 \cdot 10^8\ m \cdot s^{-1}$ aus. Die Ausbreitung erfolgt (weil eine Schwingung die Ursache ist) wellenförmig. Die Frequenz des elektromagnetischen Feldes ist gleich der Frequenz des Generators (Senders).

Unterschiedlich sind die einzelnen elektromagnetischen Sachverhalte in der besonderen Form ihrer Erzeugung und ihrer dadurch bestimmten Frequenz und Wellenlänge. Vergleiche Frequenz und Wellenlänge in Tabelle 109/1!

1. Elektromagnetische Wellen sehr kleiner Frequenz (bis 10^3 Hertz) haben keine praktische Bedeutung, sie werden deshalb auch nicht bewußt erzeugt. Dennoch findet eine Ausstrahlung solcher Felder von den Hochspannungsleitungen für Wechselspannung statt. Sie ist aber nicht erwünscht, weil sie einen Energieverlust darstellt.

2. Der Frequenzbereich von 10^3 bis 10^{12} Hz hat große Bedeutung für die Nachrichtenübertragung. Er ist geteilt in die Intervalle für Langwellen (um 10^5 Hz), Mittelwellen (um 10^6 Hz), Kurzwellen (um 10^7 Hz), Ultrakurzwellen (um 10^8 Hz) und Mikrowellen (10^9 bis 10^{12} Hz). Schwingungen dieser Frequenz werden in elektronischen Generatoren (Schwingkreise mit Elektronenröhren oder Transistoren) erzeugt.

3. Die elektromagnetische Strahlung mit Frequenzen von 10^{12} bis 10^{17} Hz nennt man Licht. Jedoch nur ein kleiner Teil davon ist sichtbar ($4{,}3 \cdot 10^{14}$ bis $7 \cdot 10^{14}$ Hz), davor liegt die infrarote oder Wärmestrahlung, dahinter die ultraviolette Strahlung. Die Entstehung der Schwingungen des infraroten Bereichs ist auf Stöße von Molekülen sehr heißer Gase oder Festkörper zurückzuführen. Man spricht von Molekulargeneratoren.
   Bei Infrarot beginnt auch schon die Emission von elektromagnetischer Strahlung aus angeregten Atomen (atomare Generatoren).

4. Die Röntgenstrahlung hat in der sehr starken negativen Beschleunigung von Elektronen und in Elektronensprüngen zwischen Energieniveaus der Atomhülle ihren Ursprung. Sie belegt das Intervall von 10^{16} Hz bis etwa 10^{19} Hz.



Die optische Industrie der DDR

Ein wichtiger Zweig unserer Produktion befaßt sich mit der Herstellung von optisch-mechanischen Meßgeräten. Im Maschinenbau, in der Medizin, in Wissenschaft und Volksbildung werden diese Geräte benötigt. Die Erzeugnisse aus dem VEB Carl Zeiss Jena und den anderen optischen Werken gehen in mehr als 80 Länder und ermöglichen einen umfangreichen Handelsaustausch. Trotz aller Störversuche kapitalistischer Staaten arbeiten die Wissenschaftler, Ingenieure und Facharbeiter im VEB Carl Zeiss Jena als dem größten feinmechanisch-optischen Betrieb der Welt ständig an der Verbesserung ihrer Erzeugnisse. Im Zuge der wissenschaftlich-technischen Revolution wurde die Entwicklungsarbeit verstärkt auf dem Gebiet der Wellenoptik betrieben.
Andere Produktionsstätten unserer optischen Industrie sind der VEB Rathenower Optische Werke (ROW), der VEB Feinoptisches Werk Görlitz und der VEB Pentacon Dresden.

Fragen und Aufträge
130 bis 140, S. 115

Versuch 28, S. 118

5. Es schließt sich die Gammastrahlung an. Sie entsteht spontan bei radioaktiven Zerfallsprozessen. Bei Frequenzen über 10^{22} Hz benutzt man die Bezeichnung kosmische oder Höhenstrahlung. Sie ist sehr energiereich, entstammt stellaren Prozessen, gelangt aber selten durch die Atmosphäre bis zur Erdoberfläche.

Die beiden Enden des elektromagnetischen Spektrums sind nicht willkürlich gezogen. Das untere Ende bei den kleinen Frequenzen und sehr großen Wellenlängen ergibt sich aus praktischen Gründen (technisch nicht verwertbar), das obere Ende bei den hohen Frequenzen und sehr kleinen Wellenlängen ist sowohl von der Natur als auch von den technischen Errungenschaften des Menschen abhängig. Die kosmischen Strahlungsobjekte unterliegen Wechselwirkungen, ehe sie zur Erde gelangen, sie können aber neuerdings erfolgreicher durch Meßgeräte in kosmischen Flugkörpern registriert werden.

109/1 Elektromagnetisches Spektrum

Frequenz f in Hz	Wellenlänge l in m	Bezeichnung der Strahlung	Anwendung der Strahlung
$3 \cdot 10^{2}$	10^{6}		
$3 \cdot 10^{4}$	10^{4}	Langwellen	Rundfunk
$3 \cdot 10^{6}$	10^{2}	Mittelwellen Kurzwellen	Rundfunk
$3 \cdot 10^{8}$	1	Ultrakurzwellen Dezimeterwellen	Fernsehen
$3 \cdot 10^{10}$	10^{-2}	Mikrowellen	Radar
$3 \cdot 10^{12}$	10^{-4}	infrarotes Licht	Wärmestrahler
$3 \cdot 10^{14}$	10^{-6}	sichtbares Licht	natürliches Sehen
$3 \cdot 10^{16}$	10^{-8}	ultraviolettes Licht weiche ...	medizinische Behandlung
$3 \cdot 10^{18}$	10^{-10}	Röntgenstrahlung harte ...	Materialprüfung
$3 \cdot 10^{20}$	10^{-12}	γ-Strahlung	Materialprüfung
$3 \cdot 10^{22}$	10^{-14}	kosmische Strahlung	Grundlagenforschung (z. B. Physik der Elementarteilchen)
$3 \cdot 10^{24}$	10^{-16}	kosmische Strahlung	Grundlagenforschung (z. B. Physik der Elementarteilchen)

Aufgaben

Fragen und Aufträge

1. Nennen Sie an verschiedenen Beispielen alle Ihnen bekannten physikalischen Größen, die sich bei einer mechanischen Schwingung zeitlich periodisch ändern!
2. Beschreiben Sie mechanische Schwingungen unter Verwendung des von dem Sandpendel (↗ Übung 1) aufgezeichneten Weg-Zeit-Diagramms!
3. Erklären Sie den Vorgang einer mechanischen Schwingung unter Beachtung des Trägheitsgesetzes und des Wechselwirkungsgesetzes!
4. Vergleichen Sie einen Pendelschwinger mit einem Federschwinger!
5. Beschreiben Sie die Energieumwandlungen am Federschwinger!
6. Beschreiben Sie den Schall als mechanische Schwingung!
7. Eine Stimmgabel hat die Frequenz 440 Hz. Wie lange dauert eine Schwingung?
8. Beschreiben Sie die Schwingung eines Federschwingers, dessen Energiespeicher aus einem Gummiband besteht!
9. Was versteht man unter einer harmonischen Schwingung?
10. Nennen Sie Beispiele für harmonische Schwingungen!
11. Welche Periode hat eine Schwingung mit einer Frequenz von 7,3 Hz?
12. Wie ändert sich der Anteil der potentiellen und der kinetischen Energie an einem vertikalen Federschwinger während der Schwingung?
13. Beschreiben Sie die Bewegung einer Haustür, die mit einem mechanischen Türschließer versehen ist!
14. Warum werden die Wände in Sende- und Zuschauerräumen bzw. in Arbeitsräumen mit starker Geräuschbildung mit dickem Stoff oder Platten aus Schaumplast ausgekleidet?
15. Beschreiben Sie eine gedämpfte Schwingung unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes!
16. Zeichnen Sie nach dem in Bild 13/1 beschriebenen Verfahren den zeitlichen Verlauf einer harmonischen Schwingung mit $y_{max} = 2{,}5$ cm! Teilen Sie den Kreis mit dem Zirkel in 12 gleiche Teile ein!
17. 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!
18. Welche Elongation besitzt ein Pendelschwinger zu den Zeitpunkten $^1/_2$, 1, $^3/_2$, 2 s, wenn die Periode $T = 1$ s und die Amplitude 20 cm betragen?
    Zum Zeitpunkt Null sei die Elongation Null!
19. Welche Länge muß ein Fadenpendel haben, das die Schwingungsdauer $T = 4$ s aufweisen soll? Kontrollieren Sie Ihre Berechnung durch einen Versuch!
20. Welchen Einfluß haben die Temperaturänderungen auf den Gang einer Pendeluhr und wie könnte man sie ausgleichen?
21. 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?
22. 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!
23. Berechnen Sie die Länge eines sogenannten „Sekundenpendels“ ($T = 2$ s) für einen Ort auf 50° geografischer Breite ($g = 9{,}8092\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$)!

24. Eine Schraubenfeder ist mit 21 kp belastet. Bei einer weiteren Belastung von 7 kp wird die Feder um 120 mm gedehnt. Errechnen Sie die Schwingungsdauer und die Frequenz!

25. Ein Baukran trägt die Last an einem 23 m langen Seil. Wie groß ist die Schwingungsdauer dieses Pendelschwingers?

26. Ein Körper mit einem Gewicht von 100 p wird an einer Feder aufgehängt. Die Dehnung der Feder durch den Körper beträgt 40 mm. Errechnen Sie die Schwingungsdauer und die Frequenz!

27. Stellen Sie die Schwingung nach Aufgabe 26 mit einer Amplitude von 20 mm grafisch dar!

28. Wie groß ist der Phasenwinkel φ nach Aufgabe 26 nach 5,5 s?

29. Welches Gewicht hat ein schwingender Körper, wenn er an einer Feder mit einer Federkonstante von $150\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$ bei einer Schwingungsdauer von $T = 0{,}5$ s schwingt?

30. Setzen Sie das Hinterrad eines herumgedrehten Fahrrades in sehr schnelle Drehungen! Welche Beobachtung machen Sie? Warum werden vor allem Rennräder zentriert? Wie geschieht das?

31. 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!

32. Warum sollen Marschabteilungen über Brücken, vor allem über Hängebrücken, nicht im Gleichschritt marschieren?

33. Einer Stimmgabel mit der Frequenz $f = 440$ Hz wird eine Stimmgabel mit der Frequenz $f = 280$ Hz gegenübergestellt und angeschlagen. Erfolgt ein Mitschwingen? Begründen Sie Ihre Antwort!

34. Auf welche Weise dämpft man die Schwingungsübertragung vom Kraftwagenmotor auf den Fahrzeugrahmen?

35. Untersuchen Sie in Ihrem Ausbildungsbetrieb, auf welche Weise die Ausbreitung störender Schwingungen auf die Gebäudeteile vermindert wird!

36. Warum müssen Kraftfahrzeugräder sorgfältig ausgewuchtet sein? (↗ Bild 18/4)?
Welche Gefahrenquellen ergeben sich durch nicht ausgewuchtete Räder?

37. Warum sitzt das Orchester im Konzertsaal auf einem Holzpodium?

38. Erklären Sie die Begriffe Oszillator, Kopplung, Transversalwelle, Longitudinalwelle!

39. Wodurch unterscheiden sich die mechanischen Wellenarten voneinander?

40. Stellen Sie eine Schwingung und eine Transversalwelle grafisch dar! Worin besteht der Unterschied?

41. Welches Merkmal einer Welle fehlt bei einem windbewegten Ährenfeld? Vergleichen Sie mit Versuch 14, S. 117!

42. 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?

43. Wie sind a) die Ausbreitungsgeschwindigkeit, b) die Wellenlänge, c) die Frequenz einer Welle zu bestimmen?
In welchem gesetzmäßigen Zusammenhang stehen diese Kenngrößen zueinander?

44. Wie groß ist die Wellenlänge einer Oberflächenwelle, deren Frequenz 13,5 Hz beträgt und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit zu $23\ \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$ bestimmt ist?

45. Welche Frequenz hat eine Schallwelle, deren Wellenlänge in Luft 77 cm beträgt?
($c_{\mathrm{Luft}} \approx 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$).

46. Durch ein Erdbeben in Chile wurde 1922 im Pazifik eine Flutwelle erzeugt, bei der $c = 750\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ und $T = 30$ min betrugen. Welche Wellenlänge hatte diese Flutwelle?

47. Das Echolotgerät eines Schiffes registriert eine Gesamtlaufzeit des Ultraschallimpulses von 0,04 s. Wie groß ist die Wassertiefe? (Die Breite des Schiffes wird vernachlässigt, die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt $1460\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.)

48. Erklären Sie die Werkstoffprüfung mit Hilfe des Ultraschallverfahrens!

49. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Sprachrohres!

50. Wie lautet das Huygenssche Prinzip? Erklären Sie, wie Elementarwellen entstehen!

51. Stellen Sie die Reflexion und die Brechung einer Welle mit Hilfe des Huygensschen Prinzipes dar!

52. Welcher Zusammenhang besteht zwischen einer Wellenfront und den durch diese hervorgerufenen Elementarwellen?

53. Welcher Unterschied besteht zwischen den Elementarwellen und der Wellenfront?

54. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Brechung und Reflexion einer Welle?

55. Warum müssen international anzuerkennende Schwimmrekorde bei vorgeschriebener gleichmäßiger Wassertiefe geschwommen werden?

56. 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}?

57. Warum ändern Wasserwellen an den Ufern von Teichen und Flüssen ihre Richtung?

58. Wie groß ist das Brechungsverhältnis beim Übergang von Schallwellen aus der Luft in Kohlendioxid?
($c_{\text{Luft}} = 340$ m · s^{-1}, $c_{CO_2} = 258$ m · s^{-1}).

59. Warum ist der Übertritt einer Welle ins wellenmäßig dichtere Medium mit einer Verkürzung der Wellenlänge verbunden?

60. Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Elementarwellen und der Beugung?

61. Zeichnen Sie einen Kreis mit dem Radius 50 mm als Momentbild einer Kreiswelle! Legen Sie um eine größere Anzahl von Punkten auf der Peripherie kleine Kreise mit dem Radius 10 mm als Bilder der Elementarwellen! Zeichnen Sie ohne Hilfsmittel die Frontwelle!

62. Untersuchen Sie an Schallwellen die Beugung hinter einem Hindernis (Hausecke, Türspalt und Heuschober)!

63. 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!

64. Die Amplitude eines sinusförmigen Wechselstroms von 50 Hz beträgt 2 A. Wie groß sind die Momentanstromstärken zur Zeit
$t_1 = 0{,}25\ T$; $t_2 = 0{,}33\ T$; $t_3 = 0{,}50\ T$;
$t_4 = 0{,}75\ T$; $t_5 = 0{,}90\ T$; $t_6 = 1{,}25\ T$;
$t_7 = 2{,}75\ T$; $t_8 = 3{,}75\ T$?

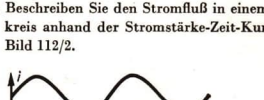
65. Konstruieren Sie mit Hilfe des Leitkreises eine Spannungs-Zeit-Kurve! Wählen Sie auf der Abszissenachse für eine volle Schwingung 12 cm ($T \triangleq 12$ cm)! Wiederholen Sie die Konstruktion für denselben Schwingungsvorgang und wählen Sie jetzt als Periodeneinheit $2\pi \cdot r$ ($T \triangleq 2\pi \cdot r$), wobei r der Radius des Leitkreises ist! Sind beide Kurven gleichwertig?

66. Diskutieren Sie die grafische Darstellung nach Bild 112/1 in bezug auf ihren physikalischen Sachverhalt!



112/1

67. Beschreiben Sie den Stromfluß in einem Stromkreis anhand der Stromstärke-Zeit-Kurve nach Bild 112/2.



112/2

68. Vergleichen Sie Wechselstrommaschinen und Gleichstrommaschinen im Hinblick auf ihre Wirkungsweise!

69. 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!

70. Mit einem Wechselspannungsmeßgerät werden 380 V gemessen. Wie groß ist die Scheitelspannung?

71. Wie groß ist der Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung, wenn die Spannungsspitze 220 V beträgt?

72. Begründen Sie, warum für die Messung von Wechselspannung und Wechselstromstärke besonders konstruierte Wechselstrommeßgeräte notwendig sind!

73. In einem 50-Hz-Wechselstromkreis wird eine Effektivstromstärke von 2 A gemessen. Zeichnen Sie die Stromstärke-Zeit-Kurve maßstabgerecht, wobei auf der Ordinatenachse für 1 A jeweils 2 cm und auf der Abszissenachse für 0,01 s jeweils 5 cm abgetragen werden!

74. Welchen induktiven Widerstand besitzt eine

Spule mit der Induktivität von 0,1 H in einem 50-Hz-Wechselstromkreis?

75. Welchen kapazitiven Widerstand hat ein 10-μF-Kondensator bei einer Netzfrequenz von 50 Hz?

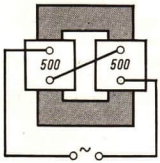
76. Wie groß ist die Stromstärke, wenn 20 V einer 50-Hz-Wechselspannung jeweils an einen Kondensator von 4 μF, an einen Ohmschen Widerstand von 4 Ω und an eine Spule von 4 H gelegt werden?

77. Eine Spule mit Eisenkern besitzt eine Induktivität von 0,32 H. Welche 50-Hz-Wechselspannung darf man maximal anlegen, damit die effektive Stromstärke 2 A nicht übersteigt? (Vom Ohmschen Widerstand der Spule soll abgesehen werden.)

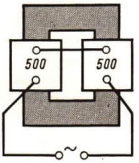
78. Erläutern Sie an selbstgewählten Beispielen den Unterschied von Wirkwiderstand, Blindwiderstand und Scheinwiderstand!

79. Die Widerstandsgleichung $X_C = 1/\omega \cdot C$ als eine physikalische Aussage ist der formelmäßige Ausdruck des Begriffs *kapazitiver Widerstand.* Welcher physikalisch-objektive Sachverhalt wird durch die Gleichung widergespiegelt?

80. Bestimmen Sie den induktiven Widerstand des Spulenpaares in Bild 113/1 und Bild 113/2. Erklären Sie die Erscheinung!



113/1



113/2

81. In einem Wechselstromkreis wird bei der üblichen Netzspannung $U = 220$ V eine effektive Stromstärke von 4,5 A und eine effektive Wirkleistung von 495 W gemessen.
Wie groß ist die Scheinleistung?
Wie groß ist der Leistungsfaktor cos φ?
Wie groß ist die Phasenverschiebung φ zwischen Spannung und Stromstärke?

82. Ein 7,6-kW-Wechselstrommotor für 380-V-Netzanschluß hat einen Leistungsfaktor von 0,82. Wie groß ist die Stromstärke?

83. Durch die Primärspule eines Experimentiertransformators mit 1500 Windungen fließt ein Strom mit einer Stromstärke von 0,9 A. Wie groß wäre im Falle einer verlustlosen Energieübertragung die Stromstärke in einer Sekundärspule mit 10 Windungen?

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 $U = 10$ V und eine Stromstärke $I = 5$ A gemessen. Konstruieren Sie maßstabgerecht die Spannungs-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. Erklären Sie den Begriff *wattloser Strom*! Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, um einen wattlosen Strom zu erzeugen?

87. Vervollständigen Sie die Tabelle anhand der eingetragenen Mustergleichungen!

	-widerstand	-stromstärke	-leistung
Schein-	$Z =$	$I_S =$	$P_Z = U \cdot I$
Wirk-	$R = \dfrac{U}{I \cdot \cos\varphi}$	$I_W =$	$P_W =$
Blind-	$X_L =$ $X_C =$	$I_B = I \cdot \sin\varphi$	$P_B =$

88. Zählen Sie Beispiele auf, wo in der Volkswirtschaft Transformatoren verwendet werden! Berücksichtigen Sie vor allem Ihre eigenen Erfahrungen in der sozialistischen Produktion!

89. Untersuchen Sie anhand der Fachliteratur die geschichtliche Entwicklung der Wechselstromtechnik und berichten Sie in einem Vortrag darüber!

90. 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!

91. Aus welchen Bauelementen besteht ein elektrischer Schwingkreis?

92. Welchen Einfluß hat der Ohmsche Widerstand eines elektrischen Schwingkreises?

93. Wovon hängt die Periode einer elektrischen Schwingung ab und in welcher Weise?

94. Welche Induktivität hat die Spule eines Schwingkreises, der einen Kondensator von 200 pF enthält und eine Schwingung mit einer Frequenz von 8 kHz erzeugt?

95. Wie ändert sich die Frequenz im Beispiel Aufgabe 94, wenn zwei Kondensatoren von 200 pF

95.1. parallel geschaltet werden,

95.2. in Reihe geschaltet werden?

96. Was versteht man unter Rückkopplung?

97. Zeichnen Sie aus dem Gedächtnis eine Meißner-Schaltung und erklären Sie deren Wirkungsweise!

98. Wie kann man gedanklich eine Beziehung zwischen geschlossenem und offenem Schwingkreis herstellen?

99. Welche Phasen kann man beim Abstrahlen einer elektromagnetischen Welle von einer Sendeantenne (Dipol, offener Schwingkreis) unterscheiden?

100. Wie erklärt man das Ausbilden einer elektrischen Schwingung in einer Empfangsantenne, wenn eine Hertzsche Welle sie überstreicht?

101. Was für Ausbreitungseigenschaften zeigen Hertzsche Wellen und wie weist man die Eigenschaften nach?

102. Skizzieren Sie die historische Versuchsanordnung von HEINRICH HERTZ!

103. Kennzeichnen Sie die Ausbreitungsverhältnisse für die einzelnen Wellenlängenbereiche der Hertzschen Wellen!

104. Berechnen Sie die Wellenlänge einer Hertzschen Welle, die eine Frequenz von 6,1 MHz aufweist!

105. Was versteht man unter der Modulation einer elektromagnetischen Welle und weshalb wird sie angewandt?

106. Weshalb macht sich eine Senderbandbreite nötig?

107. Skizzieren Sie das Blockschaltbild eines Senders!

108. Welche Aufgaben hat ein Empfänger zu erfüllen, um modulierte Hertzsche Wellen in Schallwellen umzuwandeln?

109. Skizzieren Sie die Schaltung eines Detektorempfängers. Führen Sie die Schaltung praktisch aus (Kopfhörer)!

110. Erläutern Sie die wichtigsten technischen Anwendungen der Hertzschen Wellen!

111. Warum ist die Brechung eines in Wasser gehaltenen Stockes am besten zu sehen, wenn man schräg auf die Wasseroberfläche blickt?

112. Diskutieren Sie die Grenzbereiche der Geltung des Brechungsgesetzes!

113. Berechnen Sie den Grenzwinkel der Totalreflexion für den Übergang des Lichts von Glas in Luft!

114. Ist ein Prismenfernrohr auch für Unterwasserbeobachtungen brauchbar?

115. Es sind die Brechungszahlen für je zwei Stoffe von A, B, C und D gegeben.

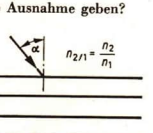
$n_{A/B} = 1{,}5; \quad n_{B/C} = 0{,}8; \quad n_{C/D} = 1{,}7$

Kann ein Strahl aus D immer in A, B oder C übertreten?

116. Es liegen eine Reihe von parallelbegrenzten Schichten verschiedener Stoffe vor (Bild 114/1).

116.1. Zeigen Sie, daß der eingezeichnete einfallende Strahl parallel zu seiner ursprünglichen Richtung in die Luft austritt!

116.2. Kann es hier eine Ausnahme geben?



114/1

117. Eine punktförmige Lichtquelle befindet sich im Brennpunkt einer Linse. Wo wird die Lichtquelle abgebildet?

118. Ein Lichtstrahl fällt auf eine ebene Glasplatte in einem Winkel von 60°. Unter welchem Winkel verläßt der Strahl die Platte auf der anderen Seite, wenn die Brechungszahl $n = 1{,}5$ beträgt? Die Oberflächen der Platte sind parallel.

119. Warum kann man einen Glasstab in Luft oder Wasser sehen, obwohl Glas lichtdurchlässig ist?

120. Zeichnen Sie den Strahlengang bei dem trapezförmigen Prisma (Bild 115/1) für drei parallel zu den parallelen Seiten des Trapezes einfallende Strahlen und erklären Sie die für diesen optischen Körper übliche Bezeichnung Wendeprisma!

115/1



121. Tritt bei der Totalreflexion ein Teil des Lichts in das optisch dünnere Medium über?

122. Ist die Totalreflexion auf Licht beschränkt?

123. Wie kann man mit Hilfe des virtuellen Bildes schnell feststellen, ob es durch eine Konvex- oder eine Konkavlinse erzeugt wurde?

124. Ein Gegenstand soll durch eine Sammellinse 3fach (n-fach) vergrößert abgebildet werden. Wie groß muß die Gegenstandsweite sein? Wo liegt das Bild? Rechnen und konstruieren Sie!

125. Konstruieren Sie den Strahlenverlauf in einem Mikroskop!

Brennweite f_1 des Objektivs $= 1$ cm
Brennweite f_2 des Okulars $= 3$ cm
Linsenabstand $s = 8$ cm

126. Beschreiben Sie das Mikroskop nach den wesentlichsten Gesichtspunkten wie:
Zweck, physikalische Grundlagen, Bauelemente, Vergrößerungsmaßstab.

127. Was muß man tun, um das astronomische Fernrohr für Erdbeobachtungen anwenden zu können?

128. Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede bestehen beim Mikroskop und astronomischem Fernrohr in physikalischer und technischer Hinsicht?

129. Welche Unterschiede bestehen zwischen einem astronomischen Fernrohr, einem „Opernglas" und einem Prismenfernrohr?

130. Warum gibt es bei Bildern, die von Hohlspiegeln erzeugt werden, keine farbigen Ränder?

131. Die intensivste Linie im Spektrum des Natriumlichts ist die Linie D. Ihr entspricht eine Wellenlänge $\lambda = 5{,}89 \cdot 10^{-7}$ m. In welchem Beugungswinkel ist das Maximum erster Ordnung ($m = 1$) der D-Linie des Natriums hinter einem Gitter mit 10^4 Spalten je Zentimeter zu sehen?

132. Warum erhält man kein deutliches Spektrum, wenn der Spalt zwischen Lichtquelle und Prisma sehr breit ist? Begründen Sie den weißen Mittelteil des Bildes!

133. Informieren Sie sich, wo die Spektralanalyse angewendet wird! Bemühen Sie sich darum, selbst einmal durch einen Spektralapparat sehen zu dürfen!

134. Welche Eigenschaften eines materiellen Objekts können bestimmt werden mit dem:

1. Fernrohr
2. Mikroskop
3. Spektralapparat?

135. Die niedrigsten und höchsten Frequenzen, die vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden, betragen 20 Hertz und 15 000 Hertz. Wie groß sind die entsprechenden Wellenlängen in der Luft?

136. Strahlt eine bewegte Ladung immer elektromagnetische Felder aus?

137. Welche von den Bestimmungsgrößen Wellenlänge, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die für das Licht charakteristische? Begründen Sie die Aussage!

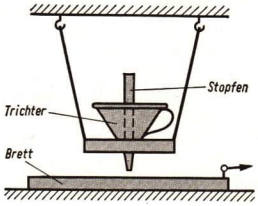
138. Wie ist es zu erklären, daß sich Bereiche des elektromagnetischen Spektrums überlappen?

139. Warum tritt die Röntgenstrahlung nicht auch in Elektronenröhren auf?

140. Wie schützt sich medizinisches Personal vor den schädlichen Wirkungen der Röntgenstrahlung?

Versuche

1. Bauen Sie nach Bild 116/1 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?



116/1

2. 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?

3. 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!

4. Bauen Sie in Federschwinger und Pendelschwinger eine Vorrichtung (Luftdämpfung) ein, um eine aperiodische Schwingung zu erzeugen!

5. Bauen Sie einen Schwinger mit einer Dämpfung, durch die der aperiodische Grenzfall erreicht wird!

6. Bestimmen Sie die Schwingungsdauer eines Pendelschwingers von 50 cm Länge, indem Sie die Zeit für 20 Schwingungen messen,
   6.1. für eine Auslenkung um etwa 5° gegenüber der Vertikalen,
   6.2. für eine Auslenkung um etwa 20°!
   6.3. Warum treten Abweichungen von der errechneten Schwingungsdauer auf?

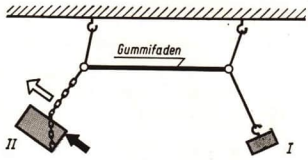
7. Ermitteln Sie die Schwerebeschleunigung g mit Hilfe eines Fadenpendels!

8. An einer vertikal hängenden Schraubenfeder wird ein Körper befestigt und in Schwingung versetzt. Wie ändert sich die Schwingungsdauer, wenn ein zweiter Körper mit gleicher Masse hinzugefügt wird? Überprüfen Sie das theoretisch gefundene Ergebnis experimentell!

9. Berechnen Sie für verschiedene Pendelschwinger die Schwingungsdauer aus der Pendellänge und prüfen Sie das Ergebnis durch Zeitmessung für 100 Schwingungen bei kleinen Amplituden!

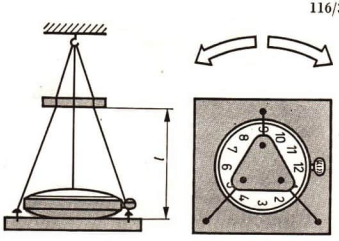
10. Stellen Sie nach Bild 116/2 eine Versuchsanordnung zusammen! In welcher Höhe muß das Wägestück II befestigt werden, damit Resonanz herrscht?

116/2



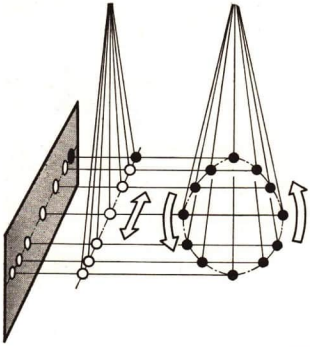
11. Bauen Sie ein Drehpendel mit Dreipunktaufhängung nach Bild 116/3! Die Schwingung der Unruhe einer Taschenuhr (Drehschwingung) wird als Erregerschwingung benutzt. Durch Ver-

116/3



stellen der Strecke l am Drehpendel ist Resonanz herbeizuführen. Beobachten Sie die Amplitude!

12. Hängen Sie vor einer hell beleuchteten Fläche einen Körper an einem etwa 1,5 m langen Faden auf (Bild 117/1). 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!



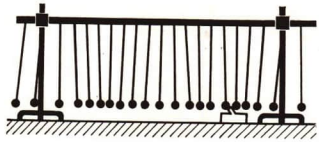
117/1

13. Bauen Sie ein bifilares Pendel nach Bild 117/2! 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 wieviel Schwingungen ist die Amplitude auf 0,5 y_{max}; 0,25 y_{max} zurückgegangen?



117/2

14. Mit dem dargestellten Modellversuch (Bild 117/3) sollen die Bewegungsvorgänge bei einer Longitudinalwelle veranschaulicht werden.
Welche wichtige Voraussetzung fehlt dieser Anordnung für die Entstehung und Ausbreitung einer Welle? Vergleichen Sie mit Aufgabe 41!



117/3

15. Erzeugen Sie mit Hilfe eines gespannten Seiles stehende Transversalwellen!

16. Es ist die resultierende Welle zweier Wellen 1 und 2 mit gleicher Wellenlänge zu zeichnen. (Wellenlänge 1 und 2: 7 cm; Amplitude 1: 2 cm, Amplitude 2: 1 cm; Verschiebung des Anfangspunktes der Welle 1 gegenüber der Welle 2 um 1 cm nach rechts.)

17. Es ist die resultierende Welle zweier Wellen 1 und 2 mit unterschiedlicher Wellenlänge zu zeichnen. (Wellenlänge 1: 4 cm, Wellenlänge 2: 4 cm; Amplitude 1: 1,5 cm, Amplitude 2: 1 cm, gleiche Anfangspunkte.)

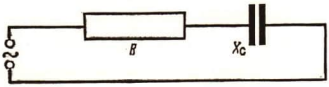
18. Von zwei Konservendosen werden Deckel und Boden entfernt. Die Büchsen werden einseitig durch gespanntes Pergamentpapier verschlossen. Führen Sie damit einen Versuch nach Bild 117/4 durch! Erklären Sie Ihre Beobachtungen!

117/4



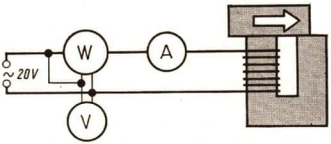
19. Entwickeln Sie Versuchsanordnungen, um den sinusförmigen Spannungs- oder Stromverlauf des elektrischen Wechselstroms experimentell nachzuweisen!

20. Es wird hypothetisch angenommen, daß in einem Wechselstromkreis $R^2 + X_C^2 = Z^2$ ist (Bild 118/1). Überprüfen Sie experimentell die aufgestellte Behauptung!



118/1

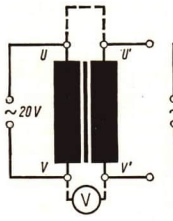
21. Bauen Sie die Versuchsanordnung nach Bild 118/2 auf! Dazu wird eine Spule mit 125 Windungen auf einen Schenkel des geblätterten U-Kerns gesetzt; die freien Schenkelenden werden mit einem I-Kern als Joch verbunden. Verschieben Sie das Joch so lange nach der Seite, bis eine Stromstärke von 4 A auftritt! Bestimmen Sie die Scheinleistung, die Wirkleistung, den Leistungsfaktor und die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und angelegter Klemmenspannung!



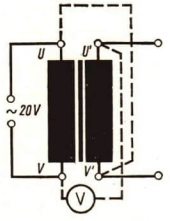
118/2

22. Entwickeln Sie eine Versuchsanordnung, mit deren Hilfe man den Wirkungsgrad einer Fernleitung (Modellversuch) ermitteln kann!

23. Bauen Sie einen unbelasteten Transformator aus zwei Spulen mit je 500 Windungen, einem geblätterten U-Kern und einem I-Kern als Joch zusammen. Legen Sie primärseitig eine Wechselspannung von 20 V an! Verbinden Sie (Bild 118/3) die Punkte U und U′ durch einen Verbindungsleiter und messen Sie die Spannung zwischen V und V′! Verbinden Sie (Bild 118/4) die Punkte U und V′ durch einen Verbindungsleiter und messen Sie die Spannung zwischen V und U′! Deuten Sie beide Versuchsergebnisse!



118/3



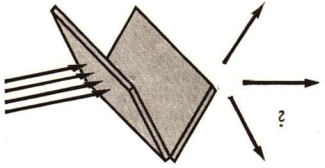
118/4

24. Beschreiben Sie ein einfaches Verfahren, mit dem die Brechungszahl für Glas an einem Glasblock bestimmt werden kann und überprüfen Sie ihren Vorschlag in der Praxis.

25. Halten Sie einen Gegenstand schräg zur Oberfläche ins Wasser!
Beobachten Sie die optische Erscheinung und fertigen Sie eine Skizze über den Sachverhalt an!

26. Halten Sie ein Schriftstück vor einen Glasspiegel und beobachten Sie das Bild schräg von der Seite! Erklären Sie das Auftreten mehrerer Bilder.

27. Halten Sie zwei Glasplatten so zueinander in einen Lichtstrahl, daß beide wie ein Prisma zusammen erscheinen!
Warum ergibt diese Anordnung kein Spektrum?



28. Für Fotoamateure! Fertigen Sie sich die Zeichnung eines optischen Gitters an, indem Sie mit Tusche parallele Linien möglichst eng nebeneinander ziehen. Fotografieren Sie dieses Liniennetz und benutzen Sie das Negativ als Dia wie ein optisches Gitter!
Beschreiben Sie Ihre Experimente!



Schülerexperimente

Die physikalische Theorie mit ihren mathematischen Hilfsmitteln und modernen Modellvorstellungen und das physikalische Experiment sind bestimmend für den Physikunterricht.

Bei den Schülerexperimenten werden Methoden kennengelernt und Fertigkeiten erworben, mit denen Gesetzmäßigkeiten in der Natur aufgefunden oder bestätigt werden können. Dabei wird im Verlaufe des Physik-Kurses eine gewisse Selbständigkeit erworben, die jeden Schüler befähigt, während seiner weiteren Ausbildung und beruflichen Entwicklung Aufgaben experimentell zu lösen oder theoretisch gefundene Lösungen experimentell zu überprüfen.

Besonders zu beachten sind die Hinweise mit der Bezeichnung ACHTUNG! Hier wird auf Gefahren und Unfallquellen aufmerksam gemacht. Bei Nichtbeachtung können Menschen gefährdet werden oder sie können eventuell sogar körperliche Schäden davontragen. Wenn die Anweisungen nicht ordnungsgemäß oder nachlässig ausgeführt werden, können Geräte oder Hilfsmittel beschädigt werden. Diese Hinweise zum Arbeits- und Unfallschutz sind ein wichtiger Teil der Anleitung.

Schwingungsdauer eines Federschwingers — M1

Aufgabe

Für einen vertikalen Federschwinger ist die Abhängigkeit der Schwingungsdauer T von anderen Größen des Schwingers zu ermitteln.

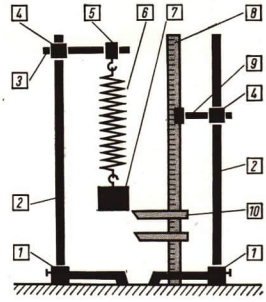
Vorbetrachtungen

Erläutern Sie die für einen Federschwinger charakteristischen Größen Masse und Federkonstante und erörtern Sie ihre Einflußmöglichkeit auf die Schwingungsdauer!
Arbeitsprinzip bei einer experimentellen Untersuchung ist, daß immer nur eine Größe in einer Meßreihe zu verändern ist; alle anderen Größen dürfen in der betreffenden Meßreihe nicht verändert werden. Für jede zu untersuchende Größe muß eine besondere Meßreihe aufgestellt und tabellarisch festgehalten werden.

Geräte und Hilfsmittel

1 Zwei V-Füße
2 Zwei Stativstäbe 50 cm
3 Stabstück 10 cm
4 Zwei Universalmuffen
5 Ring mit Haken
6 Zylindrische Zugfedern (mit verschiedener Federkonstante)
7 Hakenkörper
8 Lineal
9 Klemmhalter
10 Zwei Zeiger
11 Uhr mit Sekundenzeiger

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

Vorbereitung

1. Aufbau des Versuchs nach Skizze
2. Vorspannen der Feder mit Hakenkörper 100 p
3. Einstellen des Zeigers auf Ruhelage des Hakenkörpers
4. Aufstellen von Wertetabellen entsprechend der zu untersuchenden Größen

Messungen

5. Jeder Meßwert ist als Mittel aus mindestens 5 Messungen in das Protokoll einzutragen. Dabei ist die unabhängig veränderliche Größe sinnvoll in ihrem Betrag zu verändern und einschließlich der abhängig veränderlichen Größe mit einem geeigneten Verfahren zu messen.

Fehlerhinweise

Die Feder wird beim Vorspannen so stark gedehnt, daß ihre Federwirkung verschwindet	Feder ist zu „weich". Vorspannung verringern oder „härtere" Feder verwenden
Zwischen Masse m des Federschwingers und der Schwingungsdauer T wird keine Proportionalität erkannt	Masse wurde direkt ins Verhältnis gesetzt $T \sim m$ anstatt $T \sim \sqrt{m}$
Zwischen Federkonstante k und Schwingungsdauer T wird keine Proportionalität erkannt	Die ermittelte Federkonstante gilt nicht mehr für den gewählten Meßbereich Federkonstante wurde direkt ins Verhältnis gesetzt $T \sim k$ bzw. $T \sim \sqrt{k}$ anstatt $T \sim \sqrt{\frac{1}{k}}$

Formeln

$$T = x \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Meßprotokoll

Es sind hier Zahlenwerttabellen für die Abhängigkeit der Schwingungsdauer T von den beiden in der Formel genannten Größen aufzustellen.

Auswertung

Der Proportionalitätsfaktor x der Formel $T = x \sqrt{\frac{m}{k}}$ hat den Wert $x = 2\pi$.
Überprüfen Sie rechnerisch die in den Meßreihen ermittelten Werte auf ihre Richtigkeit durch Einsetzen in die Formel für die Schwingungsdauer eines Federschwingers!

Schwingungsdauer eines Pendelschwingers — M2

Aufgabe

Für einen Pendelschwinger (Fadenpendel) ist die Abhängigkeit der Schwingungsdauer T von anderen Kenngrößen der harmonischen Schwingung zu ermitteln. Es ist zu prüfen, ob die Größen Pendellänge, Masse und Auslenkwinkel die Schwingungsdauer beeinflussen.

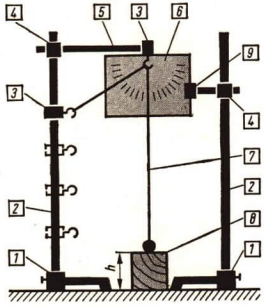
Vorbetrachtungen

Für einen Pendelschwinger gelten die Gesetzmäßigkeiten nur für Auslenkwinkel kleiner als 5°.
Die jeweilige Schwingungsdauer errechnet man aus der Zeit für 20 Schwingungen.

Geräte und Hilfsmittel

1 Zwei V-Füße
2 Zwei Stativstäbe 50 cm
3 Zwei Ringe mit Haken
4 Zwei Universalmuffen
5 Stabstück 10 cm
6 Platte mit Winkelteilung
7 Faden mit Pendelkörper
8 Fünf Meßklötze mit den Höhen h_1 bis h_5
9 Klemmhalter
10 Meßstab
11 Uhr mit Sekundenzeiger

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

Vorbereitung

1. Aufbau des Versuchs nach Skizze
2. Einstellen des Pendels auf die Höhe h_1 des Meßklotzes und einmaliges Messen der Pendellänge (bis Körperschwerpunkt)
3. Aufstellen der Wertetabellen entsprechend der zu untersuchenden Größen

Messungen

4. Jeder Meßwert ist als Mittel aus mindestens 5 Messungen der abhängig veränderlichen Größe in das Protokoll einzutragen. Dabei ist die unabhängig veränderliche Größe sinnvoll in ihrem Betrag zu verändern und einschließlich der abhängig veränderlichen Größe mit einem geeigneten Meßverfahren zu messen.
5. Nach jeder Messung der Schwingungsdauer ist nochmals die Pendellänge zu prüfen (Meßklotz).

Fehlerhinweise

Pendel läßt keine genauen Ablesungen und Messungen zu	Pendelaufhängung nicht starr genug Pendel wurde zu sehr angestoßen, Auslenkwinkel zu groß
Zwischen Pendellänge l und Schwingungsdauer T wird keine Proportionalität erkannt	Pendellänge wurde direkt ins Verhältnis gesetzt: $T \sim l$ anstatt $T \sim \sqrt{l}$

Formeln

$$T = x\sqrt{l}$$

Meßprotokoll

Es sind hier Zahlenwerttabellen und eine grafische Darstellung für die Abhängigkeit der Schwingungsdauer T von den in der Aufgabenstellung genannten Größen aufzustellen.

Auswertung

Der Proportionalitätsfaktor k der Formel $T = x \cdot \sqrt{l}$ hat den Wert $x = \dfrac{2\pi}{\sqrt{g}}$. Überprüfen Sie rechnerisch die in den Meßreihen ermittelten Werte auf ihre Richtigkeit durch Einsetzen in die Formel für die Schwingungsdauer eines Pendelschwingers!
Schlußfolgern Sie aus der Meßreihe über den Auslenkwinkel über die Verwendungsfähigkeit der von Ihnen ermittelten Meßwerte aller anderen Meßreihen!

Spule im Wechselstromkreis — E3

Aufgabe

Bestimmen Sie den Scheinwiderstand einer Spule in Abhängigkeit von ihrem Eisenkern und in Abhängigkeit von ihrer Windungszahl!

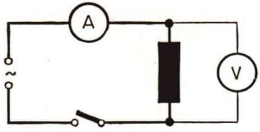
Vorbetrachtung

Die Induktivität einer Spule ist durch Form und Material des Eisenkerns und durch die Windungszahl und Wicklungsart der Spule gegeben.

Geräte und Hilfsmittel

1 Wechselspannungsquelle (Stromversorgungsgerät)
2 Stromstärkemeßgerät (Meßbereich nach eigener Wahl)
3 Spannungsmeßgerät (Meßbereich nach eigener Wahl)
4 Spule mit 125 Windungen
5 Spule mit 1500 Windungen
6 geblätterter I-Kern aus Eisen
7 geblätterter U-Kern aus Eisen
8 Schalter
9 Verbindungsleiter

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

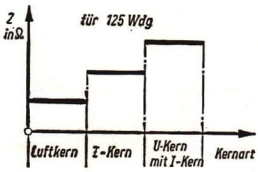
1. Bauen Sie die Versuchsanordnung nach Skizze auf!
   Setzen Sie in der ersten Versuchsreihe die Spule mit 125 Windungen nacheinander auf folgende Kerne:
   1. Luftkern
   2. geblätterter I-Kern
   3. geblätterter U-Kern mit I-Kern als Joch!
   Lassen Sie den Versuchsaufbau vom Lehrer überprüfen!
2. Die am Stromversorgungsgerät abgegriffene Wechselspannung kann beliebig gewählt werden, nur muß sie dem Meßbereich des Spannungsmeßgerätes und des Stromstärkemeßgerätes angepaßt sein. Beginnen Sie die Einstellung mit der niedrigsten Spannung und erhöhen Sie die Spannung vorsichtig bis auf den gewünschten Wert! Das Stromstärkemeßgerät muß daher auf den größten Meßbereich eingestellt sein. Tragen Sie die jeweiligen Werte für die Spannung und die Stromstärke in die Tabelle 1 ein und errechnen Sie den Scheinwiderstand nach der Formel $Z = \frac{U}{I}$!
3. In der zweiten Versuchsreihe wird die Spule mit 125 Windungen gegen eine Spule mit 1500 Windungen ausgetauscht. Es wird der Scheinwiderstand für die Spule mit Luftkern, für die Spule mit I-Kern und für die Spule mit geschlossenem Eisenkern (U-Kern und I-Kern als Joch) jeweils aus der gemessenen Spannung und Stromstärke errechnet (Tabelle 2).

Tabelle 1 für Spule mit 125 Wdg.

Kern	U in V	I in A	$Z = \frac{U}{I}$ in Ω
Luftkern			
I-Kern			
U-Kern u. I-Kern			

Tabelle 2 für Spule mit 1500 Wdg.

Kern	U in V	I in A	$Z = \frac{U}{I}$ in Ω
Luftkern			
I-Kern			
U-Kern u. I-Kern			



4. Tragen Sie die Scheinwiderstände für beide Spulen stufenförmig in ein Widerstandsniveauschema gemäß Bild ein und diskutieren Sie das Ergebnis!

Kondensator im Wechselstromkreis — E4

Aufgabe

Bestimmen Sie in einem Wechselstromkreis die Stromstärke und den Scheinwiderstand mehrerer Kondensatoren in Abhängigkeit von ihrer Kapazität!

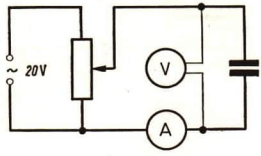
Vorbetrachtung

Die Abhängigkeit des Scheinwiderstandes von der Kapazität wird bei konstanter Spannung und bei konstanter Wechselstromfrequenz bestimmt.

Geräte und Hilfsmittel

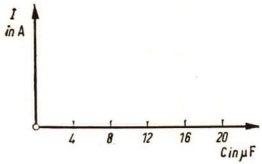
1 Spannungsquelle (Stromversorgungsgerät)
2 Spannungsmeßgerät
(Meßbereich 12 bis 20 V Wechselspannung)
3 Stromstärkemeßgerät
(Meßbereich 100 mA Wechselstrom)
4 Kondensatoren mit einer Kapazität von 4 μF, 8 μF ··· 20 μF
5 Potentiometer (25 Ω; 2 A belastbar)
6 Verbindungsleiter

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

1. Aufbau des Versuchs nach Skizze.
2. Greifen Sie an der Spannungsquelle eine Wechselspannung von etwa 12 V ab und stellen Sie mit dem Potentiometer eine Spannung von genau 4 V ein! Halten Sie durch eventuelles Nachstellen am Potentiometer diesen Spannungswert für die Dauer der Messungen konstant!
3. Variieren Sie die Kapazität des Kondensators jeweils in Stufen von 4 μF bis auf maximal 20 μF! (Verwenden Sie Kondensatoren der verlangten Kapazität oder schalten Sie mehrere Kondensatoren parallel! Stehen Kondensatoren der verlangten Kapazität nicht zur Verfügung, dann wählen Sie die Kapazitäten entsprechend kleiner!) Messen Sie die dazugehörigen Stromstärken; tragen Sie die Meßwerte in die Tabelle 1 ein und zeichnen Sie die Stromstärke als Funktion der Kapazität in ein Koordinatensystem ein!
4. Wiederholen Sie die gleiche Versuchsreihe bei einer Spannung von 8 V und bei einer Spannung von 12 V!



Meßprotokoll

Füllen Sie die Tabelle 2 und die Tabelle 3 aus!
Tragen Sie die entsprechenden Kurven jeweils in das dazugehörige Koordinatensystem ein und diskutieren Sie die Parameterdarstellung!

Tabelle 1

U in V	C in μF	I in A	X_C in Ω
4	4		
4	8		
4	12		
.	.		
.	.		

Tabelle 2

U in V	C in μF	I in A	X_C in Ω
8	4		
8	8		
8	12		
.	.		
.	.		

Tabelle 3

U in V	C in μF	I in A	X_C in Ω
12	4		
12	8		
12	12		
.	.		
.	.		

Aufgabe

Bestimmen Sie die Brechungszahl n beim Übergang eines Lichtstrahls von Luft in Glas!

Vorbetrachtungen

In Abhängigkeit von der Geräteausstattung Ihrer Schule kommen für diesen Versuch hauptsächlich zwei Varianten in Frage.

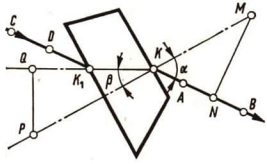
1. Arbeit mit optischer Leuchte, Glaskörper und Winkelmesser
2. Arbeit mit Stecknadel, Glaskörper und Lineal
   Anstelle des trapezförmigen Glaskörpers kann auch als Behelf eine mit Wasser gefüllte Küvette verwendet werden (das 2. Medium ist dann Wasser!).

Überlegen Sie, durch welche Maßnahme Sie die Genauigkeit der Messung steigern können!

Geräte und Hilfsmittel

1 Glaskörper
2 Vier Stecknadeln
3 Zeichenkarton A 5
4 Lineal
5 Winkelmesser

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung (Variante 2)

1. Legen Sie auf eine glatte Tischplatte einen A 5 Bogen Schreib- oder Zeichenpapier und darauf den Glaskörper (Unterlage aus Karton oder Holz verwenden!)
2. Im Punkt A wird eine Nadel senkrecht eingesteckt.
   Man visiert über das Papier und dreht den Glaskörper so, daß man eine hinreichend große Parallelverschiebung der Stecknadel A sieht.
3. Man steckt in den Punkten B, C und D weitere Stecknadeln ein, so daß die Fußpunkte aller vier Stecknadeln in einer Geraden erscheinen.
4. Der Umriß des Glaskörpers ist in seiner Arbeitslage mit dem Bleistift zu fixieren, ebenso die Lage der Punkte A, B, C, D.
5. Nun können Glaskörper und Nadeln beiseite gelegt werden, und es beginnt die zeichnerische Auswertung des Versuchs.
6. Zeichnen Sie nach der Skizze zum Versuchsaufbau den Strahlengang voll aus, die Hilfslinien nur gestrichelt! (Einfallslot auf den Punkt K, die Punkte M und P auf dem Lot sind willkürlich angenommen.)
7. Beachten Sie, daß bei der Auswertung der Strahl über C und D hinaus gar nicht mehr interessiert, nur die Verlängerung von K über K_1 in Richtung Q!

8. Die für die Auswertung nötigen Dreiecksseiten sind zu messen und in die Meßtabelle einzutragen.
9. Der Versuch ist dreimal zu wiederholen, jeweils mit neuem Papier. (Wenn mehrere Arbeitsgruppen mit gleichen Glassorten experimentieren, können diese ihre Ergebnisse zusammenfassen.)
10. Die rechnerische Auswertung ist vorzunehmen: Berechnen von n. Ermitteln des Durchschnittswertes von n und des mittleren absoluten Fehlers.
11. Kontrolle des Ergebnisses durch das Bestimmen der Brechungszahl beim Übertritt des Lichtstrahls im Punkte K_1.
12. Kontrolle des Ergebnisses durch das Messen der Winkel statt der Längen.

Auswertung

Antworten zur Vorbetrachtung:
Zeichnerisches Versuchsergebnis (als Beilage)
Meß- und Auswertungstabelle

	1	2	3		1	2	3
$\overline{MN}$ in mm				$\sin \beta$			
$\overline{KM}$ in mm				n			
$\sin \alpha$				$\bar{n}$			
$\overline{PQ}$ in mm				$\lvert \Delta n \rvert = \bar{n} - n$			
$\overline{KP}$ in mm				$\overline{\Delta n}$			

Hinweis: Sie können die Auswertung etwas vereinfachen, wenn Sie in der Zeichnung $\overline{KM} = \overline{KP}$ wählen.
Wenn mit optischen Leuchten experimentiert wird, sind selbstverständlich nur Winkel zu messen. Das Protokoll ist dann einfacher.

Brennweite einer Konvexlinse | 06

Aufgabe

Bestimmen Sie die Brennweite einer Konvexlinse durch experimentelle Ermittlung von Gegenstands- und Bildweite!

Vorbetrachtungen

1. Schreiben Sie die Abbildungsgleichung für Linsen auf und skizzieren Sie den Sachverhalt in einem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem!
2. Diskutieren Sie die Abbildungsgleichung mit Hilfe folgenden Schemas!
   Die fehlenden Angaben sind von Ihnen zu ergänzen:

Voraussetzung	Bedingung	rechnerisches Ergebnis	physikalische Folgerung
s negativ	$\|s\| > \|f\|$	s' positiv	Bild reell
s negativ	$\|s\| < \|f\|$		
s negativ	s' positiv	f positiv	Konvexlinse

3. Nach welchem der drei angeführten Fälle gestalten Sie das Meßverfahren zur hier gestellten Aufgabe?

Geräte und Hilfsmittel

1 Konvexlinse
2 Gegenstand
3 Lichtquelle
4 Längenmeßgerät

Versuchsaufbau

nach eigenem Ermessen

Versuchsunterweisung

1. Die Auswahl des abzubildenden Gegenstandes und der zu messenden Linse wird vom Lehrer vorgenommen.
   (Als Gegenstand darf kein beleuchteter Spalt gewählt werden, sondern eine dunkle Figur auf transparentem Untergrund.)
2. Es kann bei Tageslicht gearbeitet werden.
3. Es sind mindestens fünf Messungen vorzunehmen, dann ist der Mittelwert der Brennweite mit dem absoluten Maximalfehler zu berechnen.
4. Geben Sie sich Mühe bei der Scharfeinstellung des Bildes!
5. Geforderte Meßgenauigkeit: Millimeter

Meßprotokoll

Messung	s in mm	s' in mm	$f = \frac{s \cdot s'}{s - s'}$ in mm	$\lvert \Delta f \rvert = \lvert \bar{f} - f \rvert$ in mm
			$\sum f_i =$	
			$\bar{f} =$	

Auswertung

Berechnung des mittleren absoluten Maximalfehlers:

$$|\overline{\Delta f}| =$$

Ergebnis:

Aufgabe

Bauen Sie ein Mikroskop und ein Fernrohr aus Aufbauteilen zusammen und prüfen Sie die Funktionstüchtigkeit der Geräte!

Vorbetrachtung

Zur genauen Ermittlung der Bildebene einer reellen Abbildung wird die sog. Parallaxenmethode angewendet.
Dieser Methode liegt die Tatsache zugrunde, daß zwei Objekte, die zum Beispiel übereinander in einer Ebene liegen, auch bei seitlichem Verschieben des Auges ihre Lage zueinander nicht ändern. War die Lage in der gleichen Ebene aber nur scheinbar, erfolgt eine relative Orstveränderung beim Verrücken des Auges. Fangen wir also ein reelles, von einer Linse erzeugtes Bild auf einem mit einem Gitter bezeichneten Transparentpapier auf, so ist immer schwer zu sagen, ob wir genau scharf eingestellt haben. Das heißt nach der Parallaxenmethode, ob die wirkliche Bildebene mit der Papierebene übereinstimme oder nicht. (Die Betrachtung des Bildes erfolgt direkt.) Es gibt drei Möglichkeiten:

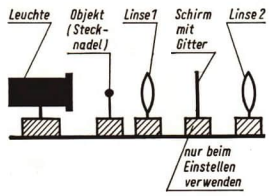
1. Beim Verrücken des Auges nach links oder rechts erfolgt bei Blickrichtung von hinten in Richtung Linse keine relative Verschiebung von Bild und Gitternetz.
2. Das Bild verschiebt sich in gleicher Richtung wie das Auge.
3. Das Bild verschiebt sich in entgegengesetzter Richtung.

Frage: Was liegt in jedem der drei Fälle vor und welche Korrektur muß erfolgen? Nach dieser Methode ist die Lage des reellen Zwischenbildes bei Mikroskop und Fernrohr zu ermitteln.

Versuchsunterweisung

1. Der Gegenstand muß gut beleuchtet sein. Beim Mikroskop zum Beispiel Millimeterpapier, beim Fernrohr ein Tafellineal.
2. Bei den Versuchen mit den Linsen des Aufbausatzes darf keine überwältigende Vergrößerung erwartet werden. Der Abbildungsmaßstab ist vorher durch Überschlag zu errechnen.
3. Sie werden die Auswirkungen von Linsenfehlern beobachten. Es soll nur auf die Mitte des Bildes scharf eingestellt werden.

Versuchsaufbau (ohne Maßstab)



Auswertung

1. Aufgabe: Aufbau eines Mikroskops
2. Aufgabe: Aufbau eines Fernrohrs
   Brennweiten der verwendeten Linsen:
   Errechneter Vergrößerungsmaßstab:
   Skizze der Versuchsanordnung mit Maßangaben und Strahlengang

Zerlegung des weißen Lichtes

08

Aufgabe

Weißes Licht soll mit einem Prisma in einzelne Spektralfarben zerlegt werden!

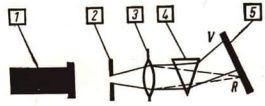
Vorbetrachtungen

Sie sollen nicht nur eine Zerlegung des weißen Lichtes in die Spektralfarben schlechthin durchführen, sondern ein reines und schönes Spektrum erzielen. Dazu hat FRAUNHOFER folgende Anordnung empfohlen:

Geräte und Hilfsmittel

1 Leuchte
2 Spaltblende
3 Konvexlinsen
4 Prisma
5 Schirm

Versuchsaufbau:



Versuchsunterweisung

1. Mit der Lichtquelle ein schwach konvergentes Lichtbündel erzeugen.
2. An die engste Stelle des Lichtbündels den senkrechten Spalt stellen.
3. Eine Sammellinse so aufstellen, daß der Abstand vom Spalt etwas größer als die Brennweite ist.
4. Mit dem Schirm ein scharfes Spaltbild auffangen.
5. Unmittelbar hinter der Linse das Prisma mit der brechenden Kante parallel zum Spalt anordnen.

Auswertung

Versuchsskizze mit Maßangaben und Bezeichnungen:
Formulieren des Ergebnisses:

1. Beschreiben Sie das von Ihnen erzeugte Spektrum schriftlich und gehen Sie dabei auf die physikalischen Ursachen ein!

Zusätzliche Beobachtungen:

2. Was ist festzustellen, wenn das Prisma um die brechende Kante etwas gedreht wird?
3. Was bewirkt eine weitere Sammellinse im Strahlengang hinter dem Prisma?

7. $T = 0{,}00227$ s

11. $T = 0{,}137$ s

18. Die Elongation ist zu den angegebenen Zeitpunkten stets gleich Null.

19. $l = 3{,}98$ m

22. $T = 16{,}41$ s

23. $l = 99{,}5$ cm

24. $T = 1{,}20$ s; $f = 0{,}83\ \mathrm{s^{-1}}$

25. $T = 9{,}6$ s

26. $T = 0{,}4$ s; $f = 2{,}5\ \mathrm{s^{-1}}$

28. $\varphi = 270°$

29. $G = 0{,}95$ kp

33. Nein! Mitschwingen tritt nur bei gleicher Eigenfrequenz ein.

44. $\lambda = 1{,}7$ cm

45. $f \approx 442$ Hz

46. $\lambda = 375$ km

47. $s = 29$ m

56. $\lambda_1 = 1{,}77$ cm
$\lambda_2 = 1{,}54$ cm

58. $n \approx 1{,}32$

63. $\omega \approx 105\ \mathrm{s^{-1}}$
$T = 0{,}06$ s

64. $I_1 = 2{,}00$ A
$I_2 \approx 1{,}73$ 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

70. $u_{max} \approx 537$ V

71. $U \approx 156$ V

74. $X_L \approx 31{,}4\ \Omega$

75. $X_C \approx 318\ \Omega$

76. $I_C \approx 0{,}025$ A
$I_R = 5$ A
$I_L \approx 0{,}016$ A

77. $U \approx 201$ V

81. $P_Z = 990$ VA
$\cos\varphi = 0{,}5000$
$\varphi = 60°$

82. $I \approx 24$ A

83. $I_2 = 135$ A

84. $I_2 = 2$ A

94. $$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C} = \frac{1}{4\pi^2 8^2 \cdot 1000^2\,\mathrm{s^{-2}} \cdot 2 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{A\,s\,V^{-1}}}$$
$$= \frac{10^4\ \mathrm{Vs}}{512 \cdot \pi^2\ \mathrm{A}} = \frac{10^4\ \mathrm{Vs}}{5{,}05 \cdot 10^3\ \mathrm{A}} \approx 2\ \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}} \approx 2\ \mathrm{H}.$$

95.1. Für 2 parallelgeschaltete Kondensatoren von je 200 pF ist die Kapazität $C = 400$ pF. Damit erniedrigt sich die Frequenz auf $8\ \mathrm{kHz}/\sqrt{2} = 5{,}66$ Hz.

95.2. Die genannten Kondensatoren, in Reihe geschaltet, haben die Kapazität $C = 100$ pF. Die Frequenz wird dadurch
$f = 8\ \mathrm{kHz} \cdot \sqrt{2} = 11{,}3\ \mathrm{kHz}$.

104. $$\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{3 \cdot 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{6{,}1 \cdot 10^6\ \mathrm{s^{-1}}} = 49{,}2\ \mathrm{m}$$

113. $\beta_g \approx 42°$

115. Voraussetzung für die Forderung, daß es keine Totalreflexion gibt, ist $n > 1$
$$n_{D/C} = \frac{10}{17} < 1;\ \text{nein}$$
$$n_{D/B} = \frac{n_{D/C}}{n_{C/B}} = \frac{10 \cdot 8}{17 \cdot 10} < 1;\ \text{nein}$$
$$n_{D/A} = \frac{n_{D/B}}{n_{B/A}} = \frac{8 \cdot 15}{17 \cdot 10} < 1;\ \text{nein}$$
D ist gegenüber A, B und C optisch sehr dicht, es gibt Grenzwinkel der Totalreflexion.

118. $\beta_2 = 60°$

124. $s = \frac{1}{3}\,s'$ bzw. $s = \frac{1}{n} \cdot s'$
Bild liegt außerhalb von $2f$ auf der anderen Seite der Linse.

131. $\alpha \approx 36°$

135. $\lambda_1 = 21{,}2$ m
$\lambda_2 = 0{,}017$ m

Abbildungsmaßstab 93
Abschirmung 71
Absorptionsspektrum 100
Änderung, periodische 9
Ampere, André Marie Vorsatz
Amperewindungszahl 54
Amplitude 10, 22, 26, 32
Ableitung, theoretische 30
Ausbreitungsgeschwindigkeit 22, 25, 72
Auslenkung 10
Auslenkwinkel 8
Außenpolmaschine 40

Bandbreite 76
Beugung 103
Bewegungs-bauch 32
–knoten 32
Bild-größe 95
–weite 94
Blind-faktor 51
–widerstand 48
Bohr, Niels Vorsatz
Brechung 27, 72, 84
– einer Welle 29
Brechungsgesetz 30
Brechungswinkel 86
Brechungszahl 30, 86
–, absolute 88
Bremsstrahlung 106
Brenn-punkt 92
–weite 92

Coulomb, Charles Augustin Vorsatz

Dämpfung 62
Deduktion 89
Demodulation 77
Dezimeterwellen 74
Differenzfrequenz 76
Dipol 73
Dispersion 98
Dreheisengerät 44
Durchdringungsfähigkeit 107

Effektiv-leistung 49
–wert 43
Eigenfrequenz 17
Einfalls-lot 85
–winkel 28, 86
Einstein, Albert Vorsatz
Elektrifizierung 58
Elementarwelle 27, 29
Elongation 10, 22, 33
– bei harmonischer Schwingung 15
Emissionsspektrum 100
Empfänger 71
Empfang 69
Energie 19, 24, 26, 32, 33
–, elektrische 49
–, kinetische 9
–, potentielle 9
–speicher 9, 20
Erreger-frequenz 17, 26
–zentrum 27, 33

Faraday, Michael 36, Vorsatz
Feder-konstante 14
–schwinger 9
Fernrohr, astronomisches 97
Forschungen, astrophysikalische 101
Foucault, Léon Vorsatz
Fraunhofer, Joseph 101
Frequenz 10, 22, 25
– eines elektrischen Schwingkreises 64
– eines Federschwingers 14
– eines Pendelschwingers 14

Galilei, Galileo Vorsatz
Gegenstands-größe 95
–weite 94
Gesetz der Wellenausbreitung 25
Gitterkonstante 103
Gleichspannung, geglättete 41
Gleichstrom-maschine 42
Gleichstrom, pulsierender 41
–reihenschlußmotor 42
Grenzfall, aperiodischer 12
Grenzwinkel 90
Grundfarbe 99

Hahn, Otto Vorsatz
Helligkeits-maxima 102
–minima 102
Hertz, Heinrich Rudolf Vorsatz
Hertzsche Wellen 67, 69
Hookesches Gesetz 9
Huygens, Christian 27, Vorsatz
Hugenssche Elementarwellen 87
Huygenssches Prinzip 27, 29
Hypothese 27, 86

Induktionsverlust 55
Innenpolmaschine 40
Interferenz 26

Kenngrößen einer mechanischen Welle 22
– einer Schwingung 10
Kopplung 19
Kopplungsglied 19, 20, 26
Kraft, rücktreibende 9
Kreis-frequenz 10, 15
–wellen 21
Kugelwellen 21
Kurzwelle 74

Ladestrom 44
Langwelle 74
Längswelle 21
Laue-Diagramm 105
Leerlauf 53
Leistung, elektrische 49
Leistungsfaktor 50
Leuchtschirm 105
Lichtgeschwindigkeit 87
Linienspektrum 99
Linsengleichung 95
Linsen, optische 92
Longitudinalwelle 21
Lot 89

Magnetischer Fluß, Änderung des 37
Maxwell, James Clerk Vorsatz
Medium 20, 26, 85
Meßwandler 56
Mikroskop 97
Mittelpunkt, optischer 92
Mittelwelle 74
Modell 32
Modulation 75
Momentanwert der Wechselspannung 38
– der Wechselstromstärke 39

Nachrichtenübermittlung, drahtlose 75
Newton, Isaak Vorsatz

Oberflächenwelle 21
Objektiv 97
Oersted, Hans Christian Vorsatz
Okular 97
Ortskoordinate 8
Oszillator 20, 26, 33

Peilen 74
Pendel-schwinger 8, 9
–körper 8
Periode 10
– eines Federschwingers 14
– eines Pendelschwingers 14
periodisch 8
Phase 11, 22, 32
phasengleich 47
Phasen-gleichlauf 31
–sprung 31
–umkehr 31
phasenverschoben 47
Phasenwinkel 10
Plancksche Gleichung 106
Platte, planparallele 89
Popow, Alexander Vorsatz
Primär-spannung 53
–spule 53
Prisma, optisches 89

Prismenfernrohr 91
Prüftransformator 56

Querwelle 20, 21
–, stehende 32

Reflexion 28, 72
– am festen Ende 31
– einer Welle 28
– einer fortschreitenden Welle 31
Reflexions-gesetz 28, 84
–winkel 28
Resonanz 17
–schwingungen 7
Richtempfang 74
Röhrengenerator 65
Röntgen-strahlung 105
–wellen 105
RÖNTGEN, WILHELM CONRAD Vorsatz
Rotor 40
Rückkopplungsschaltung 65
Rückspiegel 91
Ruhepunkt 8
Rundspul-Dreheisenmeßgerät 44
RUTHERFORD, ERNEST Vorsatz

Sehwinkel 96
Seitenfrequenz 76
Sekundär-spannung 53
–spule 53
Sendeantenne 69
Sender 69
Scheibe, optische 85
Schein-leistung 50
–widerstand 48
Schwingkreis 60
–, offener 67
Schwingungen, elektrische 60
–, elektromagnetische 62
–, erzwungene 7, 17
–, gedämpfte 7, 11
–, gedämpfte elektrische 62
–, harmonische 9
–, mechanische 8, 33
–, tonfrequente 66
–, ungedämpfte 11
–, ungedämpfte elektrische 63
Schwingungs-anzahl 10, 22
–dauer 10, 14, 25
–weite 10, 22
Spalt 103
Spannungs-anpassung 59
–kurve, sinusförmige 37
–übersetzung 53
–verhältnis 54
Spektralanalyse 101
Spektralfarben 100
Spektrum 98
–, elektromagnetisches 107
–, kontinuierliches 99
Stator 40
Stoffe, fluoreszierende 107
Strahl, einfallender 85
–, gebrochener 85
Strahlenoptik 88
Strahlung, charakteristische 106
Stromstärke-anpassung 59
–verhältnis 54
Stromwärmeverlust 55
Superpositionsprinzip 103

Thomsonsche Schwingungsgleichung 64
Totalreflexion 89
Trägerfrequenz 76
Träger, stofflicher 104
Transformator 52
–, idealer 53, 54
Transversalwelle 20

Überlagerung von Wellen 26
Übersetzungsverhältnis 54
Ultrakurzwelle 74
Umkehrpunkt 8
Universalmotor 42

Verbund-netz 57
–system 57
Verdichtung 21
Verdünnung 21

Wattmeter 49
Wechselspannung, symmetrische 36
Wechselspannung, unsymmetrische 37
–skurve, sinusförmige 37
Wechselstrom 36
Wellen-arten 20
–auslöschung 26
–berge 21, 25, 31
–bereiche 74
–, fortschreitende 23, 32
–front 22, 27
–länge 22, 25
–, lineare 21
wellenmäßig dicht 29
– dünn 29
Wellen, mechanische 20, 24, 33
–, normale 22
–optik 104
–, räumliche 21
–, resultierende 32
–, stehende 31, 32
–täler 21, 31
Widerstand, induktiver 46, 47
–, kapazitiver 45, 47
–, Ohmscher 47
Widerstandsschweißung 56
Windungszahl 53
Winkel, brechender 89
Wirkleistung 50
Wirkungsgrad 55
Wirkwiderstand 44

Zentimeterwellen 74
Zünd-kerze 56
–spule 56

Quellennachweis der Bilder

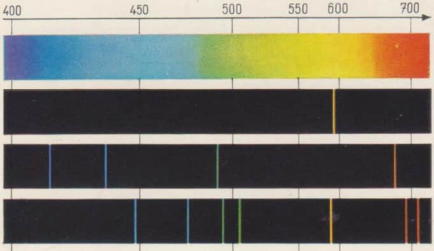
Blunck, H., Berlin: 34/1 · Bunschuh, W., Berlin: 119/1 · Demme, D., Berlin: 80/1 · Deutscher Militär-Verlag, Berlin: 67/1, 81/2b, 81/3a · Fuhr, G., Leipzig: 7/1 · Giebel, E., Halle: 81/2a · Nationale Forschungs- und Gedenkstätte, Weimar: 98/1 · Nixdorf, D., Berlin: 56/4 · Nowosti, Berlin: 35/1 · Photokino Krütgen, Halle: 13/1, 25/2a, b · PGH Fotostudio Leipzig: 18/2 · Pritsche-Foto, Dresden: 19/5 · Schiffbauversuchsanstalt Berlin: 34/5 · Schmidt, K. R., Berlin: 19/1 · Schulze, H. E., Berlin: 89/3 · Seidel, R., Karl-Marx-Stadt: 101/2 · Staatliche Fotothek Dresden: 34/7 · Uhlenhut, M., Berlin: 92/1 · Universitäts-Klinikum, Röntgen-Diagnostik, Berlin: 107/2 · VEB Carl Zeiss Jena: 91/3, 91/5, 108/1 · VEB Funkwerk Erfurt: 34/3 · VWV-Archiv, Berlin: 26/1, 28/1, 29/1, 98/1, 104/2, 105/4 · VWV Seifert, M., Berlin: 8/1, 13/5, 13/7, 18/1, 18/3, 18/4, 56/1, 56/5, 81/1a, 91/1, 105/3, 107/1, Farbfoto · Zentralbild Berlin: 81/1b, 81/3b, 81/4b, 91/4, 104/1, 105/1 · Zimmer, Leipzig: 75/1.

Reproduktionen aus

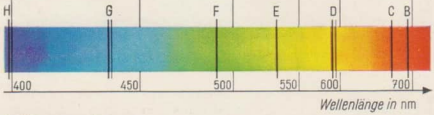
Aerosport: 81/4a, 84/1 · Jugend und Technik: 13/3 · Geschichte der Physik, Moskau 1956: 36/1.

Prismenspektren

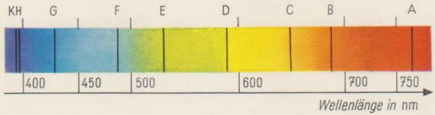
Emissionsspektren



Absorptionsspektren



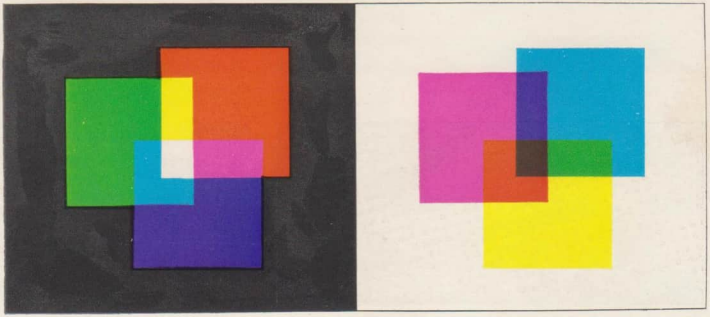
Gitterspektrum



Farbmischung

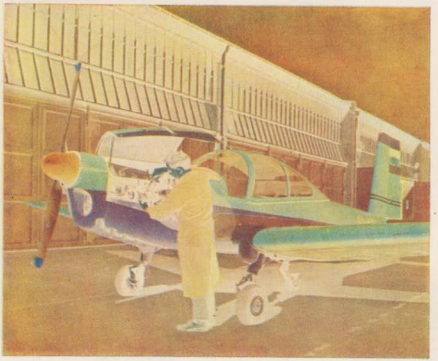
additiv

subtraktiv



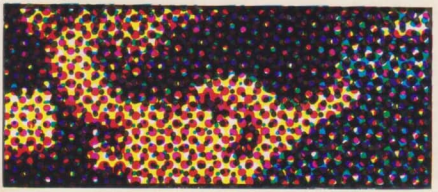


Positiv einer Farbaufnahme



Negativ einer Farbaufnahme

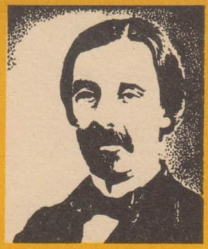
Das Negativ zeigt die
Komplementärfarben
des Positivs



Farbdruck

Der vergrößerte Bildausschnitt
zeigt die Farbpunkte,
die durch additive Mischung
im Auge den Farbeindruck
hervorrufen.

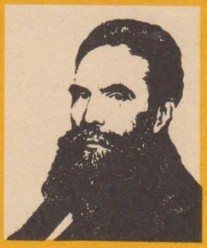
Léon Foucault



geboren am 18. 9. 1819,
verstorben am 11. 2. 1868 in Paris;
stellte Untersuchungen
zur Interferenz des Lichts an,
bestimmte experimentell
die Lichtgeschwindigkeit,
untersuchte die Pendelgesetze;
wies experimentell
die Erddrehung nach;
entdeckte die Wirbelströme,
entwickelte
neuartige Teleskopspiegel
und einen Drehzahlregler.

Wilhelm Conrad Röntgen

geboren am 27. 3. 1845
in Lennep, verstorben am
10. 2. 1923 in München;
entdeckte 1895 die durch das
Auftreffen von Katodenstrahlen
auf ein Metall erzeugten
Röntgenstrahlen;
machte Röntgenaufnahmen eines
Teils des menschlichen Körpers
(Hand) und eines metallenen
und eines nichtmetallenen
Gegenstandes (Jagdgewehr,
Holzkasten mit Wägestücken).



Heinrich Rudolf Hertz



geboren am 22. 2. 1857
in Hamburg,
verstorben am 1. 1. 1894 in Bonn;
entdeckte die von Maxwell
vorausgesagten elektro-
magnetischen Erscheinungen;
bewies die Übereinstimmung
der Eigenschaften der elektro-
magnetischen Welle und des Lichts;
konstruierte einen Sender
und eine Dipol-Empfangsantenne
für elektromagnetische Wellen
und bestimmte die Wellenlänge.

Albert Einstein

geboren am 14. 3. 1879
in Ulm,
verstorben am 18. 4. 1955
in Princeton;
entdeckte die atomistische
Struktur der Strahlung;
schuf die Theorie von den
Lichtquanten;
schuf die allgemeine und die
spezielle Relativitätstheorie,
1933 verließ er Deutschland
aus Protest gegen den
Faschismus.



Alexander Popow



geboren am 16. 3. 1859 in Turjinskije Rudniki, verstorben am 13. 1. 1906 in Petersburg; untersuchte Röntgenstrahlen und elektromagnetische Wellen; wies elektromagnetische Wellen in der Umgebung von Gewittern nach; erfand die Antenne und ein Registriergerät luftelektrischer Erscheinungen; unternahm Übertragung von Funkzeichen über kürzere Strecken.

Ernest Rutherford

geboren am 30. 8. 1871 in Brightwater (Neuseeland), verstorben am 19. 10. 1937 in Cambridge; erkannte im Jahre 1903 die Zerfallstufen radioaktiver Stoffe, 1905 die α-Strahlen als Heliumkerne; entwickelte das Rutherfordsche Atommodell; führte 1919 erste Kernspaltung herbei; sagte das Vorhandensein der Neutronen voraus.



Otto Hahn



geboren am 8. 3. 1879 in Frankfurt a. M.; entdeckte in London bei der Untersuchung radioaktiver Stoffe das Radiumthorium, 1905 in Montreal das Aktinium, 1906 in Berlin das Mesothorium; im Jahre 1936 begann er die Erforschung der Transurane; entdeckte 1938 die Kernspaltung; verpflichtete sich 1957, an der Herstellung von Atomwaffen nicht mitzuwirken.

Niels Bohr

geboren am 7. 10. 1885 in Kopenhagen, verstorben am 18. 11. 1962 in Carlsberg; fand 1913 eine Erklärung für das Wasserstoff-Spektrum; entwarf 1920 das Bohrsche Atommodell; erklärte die Spektren der Röntgenstrahlen; entwickelte eine Spaltungstheorie, die zur Voraussage noch unbekannter Elemente wie Plutonium führte.



021060-1 · 3.00