

HAENDEL

GRUNDGESETZE
DER PHYSIK



HAENDEL · GRUNDGESETZE DER PHYSIK

GRUNDGESETZE DER PHYSIK

von DR. ALFRED HAENDEL

Vierte, verbesserte und erweiterte Auflage

Mit 377 Bildern



FACHBUCHVERLAG LEIPZIG 1958

Redaktionsschluß 1. 6. 1958

Alle Rechte vorbehalten · Fachbuchverlag Leipzig

Satz und Druck: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig (III/18/203)

**Veröffentlicht unter der Lizenznummer 114-210/19/58 des Ministeriums für Kultur
der Deutschen Demokratischen Republik, Hauptverwaltung Verlagswesen**

VORWORT

Die Physik von heute ist die Technik von morgen! Wir Menschen des 20. Jahrhunderts leben im Zeitalter der fortschreitenden Technisierung. Für jeden, der sich mit technischen Dingen zu befassen hat, ist eine gründliche Kenntnis der wichtigsten physikalischen Gegebenheiten die notwendige Voraussetzung zum Verständnis der technischen Zusammenhänge.

Die „Grundgesetze der Physik“ wollen in verständlicher, knapp gefaßter Darstellung einen allgemeinen Überblick über das Gesamtgebiet der Physik geben.

Das Buch ist in erster Linie für den jungen Techniker geschrieben, der vor Beginn seines Studiums den Wunsch hat, seine physikalischen Kenntnisse aufzufrischen und zu vertiefen. Die einzelnen Abschnitte sind so abgefaßt, daß sie dem Studierenden die oft recht schwierige Nachschrift im Experimentalunterricht ersetzen und eine wertvolle Lern- und Gedächtnishilfe darstellen. Darüber hinaus wendet sich das Buch an alle, die eine schnelle Orientierung über physikalische Fragen wünschen. Die kurze Zeit, in der die ersten Auflagen vergriffen waren, beweist, daß das Buch seine Aufgabe erfüllt. In der 4. Auflage wurde der Abschnitt Elektrizität und Magnetismus neu bearbeitet und der Abschnitt Atombau erweitert.

Leipzig, im Frühjahr 1958

Verfasser und Verlag

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Einführung	1
1. Aufgabe und Arbeitsweise der Physik	1
2. Messen und Maßeinheiten	2
a) Längenmaße	2
b) Längenmessung	3
c) Flächenmaße	5
d) Flächenmessung	5
e) Raummaße	5
f) Raummessung	5
g) Winkelmessung	6
h) Zeitmessung	6
i) Kraftmessung	7

I. Mechanik

A. Feste Körper	10
1. Statik fester Körper	10
a) Grundgesetze des Gleichgewichts	10
b) Einfache Maschinen	16
c) Atome und Molekeln	22
d) Molekularkräfte fester Körper	22
2. Kinematik fester Körper	24
a) Gleichförmige Bewegung	24
b) Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	26
c) Ungleichförmige Bewegung	27
d) Zusammensetzung von Bewegungen	28
3. Kraft und Bewegung	29
a) Kraft und Masse	29
b) Arbeit und Leistung	32
c) Physikalisches und technisches Maßsystem	33
d) Wichte und Dichte	34
e) Energie	35
f) Impuls und Stoß	36
4. Drehbewegung	38
a) Kreisbewegung	38
b) Drehmoment und Trägheitsmoment	40

	Seite
3. Messung der Wärmemenge (Kalorimetrie)	102
4. Änderung des Aggregatzustandes	104
a) Wärme als Molekularbewegung	104
b) Schmelzen und Erstarren	104
c) Verdampfen und Kondensieren	106
d) Verbrennungswärme (Heizwert)	108
e) Gesättigter und ungesättigter Dampf	108
f) Verflüssigung der Gase	111
5. Wärmeübertragung	113
a) Wärmeleitung	113
b) Wärmeströmung	114
c) Wärmestrahlung	114
6. Arbeit und Wärme	114
7. Wärmekraftmaschinen	117
a) Dampfmaschinen	117
b) Dampfturbinen	119
c) Verbrennungskraftmaschinen	120

IV. Optik

A. Geometrische Optik	123
1. Lichtausbreitung	123
a) Lichtquellen	123
b) Lichtgeschwindigkeit	123
2. Photometrie	126
a) Grundgesetze und Einheiten	126
b) Photometer	128
3. Spiegelgesetze	129
a) Ebene Spiegel	129
b) Sphärische Hohlspiegel (Konkavspiegel)	130
c) Gewölbte Spiegel	132
d) Parabolspiegel	132
4. Das Brechungsgesetz	132
a) Das Gesetz von Snellius	132
b) Folgerungen und Anwendungen. Atmosphärische Strahlenbrechung	133
c) Brechung einfarbigen Lichtes durch das Prisma	133

Inhaltsverzeichnis

XI

Seite

5. Farbenzerlegung (Dispersion)	134
a) Das kontinuierliche Spektrum	134
b) Arten von Spektren	135
6. Linsen und Linsengesetze	136
a) Arten von Linsen	136
b) Bildkonstruktion bei Linsen	137
c) Linsenformel	138
d) Linsenfehler	139
7. Optische Instrumente	139
a) Projektionsapparate	139
b) Lupe und Mikroskop	140
c) Fernrohre	141

B. Wellenoptik 143

1. Interferenz des Lichtes	143
a) Lichttheorien	143
b) Der Interferenzversuch von Fresnel	143
c) Die Wellenlängen des Lichtes	145
d) Farben dünner Blättchen	145
e) Newtonsche Ringe	146
2. Beugungserscheinungen des Lichtes	147
a) Beugung am dünnen Draht	147
b) Beugung am Spalt	148
c) Beugungsgitter und Beugungsspektren	149
d) Beugungserscheinungen in der Natur	150
3. Polarisation des Lichtes	150
a) Polarisation durch Turmalinkristalle	151
b) Polarisation durch Reflexion und Brechung	151
c) Tyndall-Effekt	152
d) Drehung der Polarisationsebene	153
4. Doppelbrechung	153
a) Eigenschaften des Kalkspats	153
b) Nicolsche Prismen	153
5. Elektrische und magnetische Eigenschaften des Lichtes	154
a) Der Faradaysche Versuch	154
b) Der Kerr-Effekt	154
c) Der Zeeman-Effekt	155

V. Elektrizität und Magnetismus

A. Der elektrische Gleichstrom	156
1. Stromquellen	156
2. Stromstärke, Spannung, Widerstand	157
a) Grundeinheiten	157
b) Ohmsches Gesetz	160
3. Stromverzweigung und Schaltung von Elementen	161
a) Die Gesetze von Kirchhoff	161
b) Schaltung von Widerständen	161
c) Schaltung von Elementen	163
d) Schaltung von Meßinstrumenten	164
4. Wärmewirkung des Stromes, Stromarbeit	165
a) Stromwärme	165
b) Stromleistung	166
c) Stromarbeit	167
d) Thermoelektrizität und Peltier-Effekt	167
5. Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes	168
a) Grundgesetze der Elektrolyse	168
b) Technische Anwendungen der Elektrolyse	169
c) Faradays Gesetze	169
d) Galvanische Elemente	171
6. Elektrizitätsleitung in Gasen und im Vakuum	173
a) Entladung in Luft von normalem Druck	173
b) Entladung in verdünnten Gasen	173
c) Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen	174
d) Entladung im Hochvakuum, die Elektronenröhre	176
B. Das elektrostatische Feld	178
1. Elektrische Ladungen	178
a) Anziehung und Abstoßung	178
b) Elektroskope	179
2. Das Coulombsche Gesetz	179
3. Feldlinien und Spannung	180
4. Influenz und Ladungsdichte	183
5. Ladungseinheit und Elementarquantum	184
6. Kapazität	185
a) Grundbegriffe und Maßeinheit	185
b) Kondensatoren	186
7. Flächendichte und Erregung	187
8. Abhängigkeit der Kapazität vom Dielektrikum	189

C. Das unveränderliche magnetische Feld.	190
1. Grundeigenschaften der Magnete.	190
a) Dauermagnete	190
b) Magnetische Influenz.	191
2. Messung der Polstärke	192
3. Magnetische Feldlinien	192
a) Verlauf der Feldlinien	192
b) Messung der Feldstärke	194
4. Das magnetische Feld der Erde	196
5. Magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes	196
a) Grundversuche	196
b) Das Gesetz von Biot und Savart.	199
c) Das praktische Maß der magnetischen Feldstärke.	200
d) Elektromagnete	201
6. Motorische Wirkung des elektrischen Stromes.	203
a) Grundversuche	203
b) Anwendung im Elektromotor.	205
D. Das veränderliche magnetische Feld	205
1. Die elektromagnetische Induktion	205
a) Grundversuche	205
b) Das Induktionsgesetz	207
c) Anwendungen der Induktion	208
d) Selbstinduktion	209
2. Generatoren und Motoren	210
a) Grundversuche	210
b) Ankerformen und Schaltungen	212
c) Energieübertragung	216
3. Wechselstrom	218
a) Allgemeine Eigenschaften	218
b) Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreis	219
c) Leistung im Wechselstromkreis	222
4. Elektromagnetische Schwingungen	222
a) Der geschlossene Schwingungskreis	222
b) Der offene Schwingungskreis	224
c) Die Schwingungserregung in der Elektronenröhre	225
d) Empfang modulierter Wellen	226

VI. Strahlung und Atombau

A. Gesetze der Strahlung	229
1. Die Wellenskala	229
a) Die Ausdehnung des Spektrums	229
b) Die Röntgenstrahlen	230
c) Die radioaktive Strahlung	231
d) Die kosmische Strahlung	231
e) Die Lebedewsche Wellenskala	232
2. Die Gesetze der Temperaturstrahlung	232
a) Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz	232
b) Die Gesetze von Wien und Stefan-Boltzmann	233
c) Die Plancksche Formel	234
B. Der Bau der Moleküle und Atome	235
1. Die kinetische Gastheorie	235
a) Grundgedanke der kinetischen Gastheorie	235
b) Grundgleichung der kinetischen Gastheorie	236
c) Folgerungen aus der Grundgleichung	237
2. Energie und Masse auf Grund des Relativitätsprinzips	239
a) Das Dopplersche Prinzip	239
b) Das Relativitätsprinzip	239
c) Folgerungen aus dem Relativitätsprinzip: Masse und Energie	240
3. Der Atombau	241
a) Balmers Serienformel	241
b) Das Atommodell von Rutherford	242
c) Das Atommodell von Bohr	243
d) Atomkern und Hülle	243
e) Weitere Elementarbausteine	246
4. Hilfsmittel zur Untersuchung von Atomkernen	246
5. Kernreaktionen und künstliche Radioaktivität	249
6. Anwendung der Atomenergie	251
a) Atomreaktoren	251
b) Verwendung künstlich radioaktiver Stoffe	252
7. De Broglie-Wellen	253
Sachverzeichnis	255
Literatur	263

Einführung

1. Aufgabe und Arbeitsweise der Physik

Der Name Physik stammt aus dem Griechischen (*physis*, die Natur) und bedeutet ursprünglich Naturwissenschaft. Mit dem Wachsen unserer Kenntnis von den Naturvorgängen hat sich eine Teilung der Forschungsgebiete nötig gemacht. Heute umfaßt die Physik nur noch die Erforschung der unbelebten Natur mit der Einschränkung, daß von den Zuständen und Veränderungen der Körper nur diejenigen untersucht werden, bei denen der Stoff unverändert bleibt und höchstens seinen Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) ändert. Die Untersuchung stofflicher Veränderungen ist Aufgabe der Chemie. Zwischen diesen Nachbarwissenschaften bestehen mannigfache Übergänge. In der neuen Atomphysik verschmelzen beide.

Die moderne Physik beginnt mit *Galilei* (1564 bis 1642), der als erster das Experiment als Mittel zur Gewinnung gesetzmäßiger Zusammenhänge einführte. Damit werden Maß und Zahl zur Grundlage physikalischer Forschung.

Der Arbeitsweg geht von bewußt abgeänderten Versuchen und den daraus gewonnenen Meßreihen zur Aufstellung allgemeingültiger Gesetze. Dieser Weg vom Besonderen zum Allgemeinen ist die *induktive Methode*, sie wird überwiegend in der Experimentalphysik angewendet.

Der induktiven Methode steht die *deduktive Methode* gegenüber. Ein vermuteter ursächlicher Zusammenhang zwischen verschiedenen physikalischen Erscheinungen wird als Gesetz angenommen (Hypothese), und daraus werden die entsprechenden Folgerungen für die speziellen Einzelfälle gezogen. Bestätigt sich diese Annahme lückenlos durch die Experimente, so wird die Hypothese zur Theorie. Der deduktive Weg steht in der theoretischen Physik obenan. Beide Wege sind gleichberechtigt und werden in der physikalischen Forschung nebeneinander angewendet.

2. Messen und Maßeinheiten

Die Gesetze der Physik werden durch Messen gewonnen. Jede physikalische Größe wird aus diesem Grund auf gewisse Grundeinheiten zurückgeführt. Im einzelnen können diese Maßeinheiten erst in den betreffenden Abschnitten abgeleitet werden. Die folgende Zusammenstellung hat nur den Zweck einer ersten Orientierung.

a) Längenmaße

Das Meter sollte ursprünglich ein immer wieder reproduzierbares Naturmaß sein, der zehnmillionste Teil des Erdmeridianquadranten (Meridianbogen Pol-Äquator). Die Fortschritte der Meßtechnik haben gezeigt, daß dieses Ziel nicht vollkommen erreicht worden ist. Das in Paris aufbewahrte Urmeter ist auf Grund der heute zur Verfügung stehenden Meßmittel der 10 000 850ste Teil des auf Meeresniveau bezogenen Erdmeridianquadranten, also fast $\frac{1}{10}$ mm zu klein. Da jede weitere Messung wieder eine, wenn auch kleine Abweichung ergeben würde, hat man das *Pariser Urmeter* in den meisten Ländern der Erde zum *gesetzlichen Maß* erklärt.

1 m = 10 dm, 1 dm = 10 cm, 1 cm = 10 mm (Verwandlungszahl 10), 1 km = 1000 m.

Als Längeneinheit im physikalischen Maßsystem dient das Zentimeter (cm), kleinere Einheiten sind

1 mm = 10^{-1} cm = 10^{-3} m

1 Mikron (μ) = 10^{-3} mm = 10^{-4} cm = 10^{-6} m

1 Millimikron (m μ) = 10^{-3} μ = 10^{-7} cm = 10^{-9} m

1 Ängströmeinheit¹ (Å) = 10^{-1} m μ = 10^{-8} cm = 10^{-10} m

1 Picometer (pm) = 10^{-3} m μ = 10^{-10} cm = 10^{-12} m

Die Meßgenauigkeit kann durch Anwendung von Präzisionsinstrumenten immer weiter gesteigert werden. Der amerikanische Physiker *Michelson*² hat 1895 die Länge des Urmeters in Wellenlängen der roten Kadmiumspektrallinie als Längeneinheit gemessen:

$$1 \text{ m} = 1553164 \lambda_{\text{rot, Cad}}$$

¹ Benannt nach dem schwedischen Physiker *Ångström* (1814 bis 1874), der vor allem auf dem Gebiet der Spektralanalyse gearbeitet hat.

² Michelson, 1852 bis 1931, Prof. der Physik in Chicago.

Bei praktischen Messungen ist es wichtig, sich über die hierbei möglichen Meßfehler klarzuwerden. Diese können in subjektiven Fehlern des Beobachters liegen, aber auch in der Unzulänglichkeit des verwendeten Maßstabes.

Unter dem absoluten Fehler versteht man die Abweichung einer Länge auf dem verwendeten Maßstab von der entsprechenden Länge auf dem Urmaßstab. Der relative Fehler ist das Verhältnis des absoluten Fehlers zur gemessenen Gesamtlänge.

Zur Beurteilung der Genauigkeit eines Meßergebnisses wird häufig der mittlere Fehler der Meßreihe angegeben. Dieser ist das arithmetische Mittel aus den einzelnen Abweichungen der Messungen vom Durchschnittswert (arithmetisches Mittel der Ablesungen).

b) Längenmessung

Zur Längenmessung dienen Maßstäbe und Bandmaße, für feinere Messungen Schublehren mit Noniusablesung (Bild 1) und die Mikro-

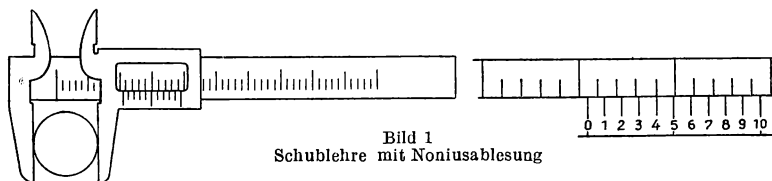


Bild 1
Schublehre mit Noniusablesung

eterschraube. Der *Nonius* zeigt einen festen Hauptmaßstab mit Millimeterteilung und einen zweiten verschiebbaren Maßstab, dessen Teilung oft so gewählt ist, daß auf 9 Teile der festen Skala 10 Teile auf dem Schieber kommen. Bei geschlossener Schublehre deckt sich der Nullstrich der Hauptskala mit dem des Nonius. Ein Teilstrich des Nonius ist um $\frac{1}{10}$ mm gegen den entsprechenden Teilstrich der festen Skala verschoben. Im Bild ist die Messung eines Stabdurchmessers gezeigt. Der vierte Teilstrich des Nonius fällt mit einem Teilstrich der festen Skala zusammen.

Der dritte Noniusstrich steht $\frac{1}{10}$ mm rechts vom entsprechenden Strich der festen Skala, der zweite $\frac{2}{10}$ mm, der erste $\frac{3}{10}$ mm, der Anfang der Noniuskala demnach $\frac{4}{10}$ mm rechts vom Teilstrich 5 mm der festen Skala. Daraus ergibt sich der Durchmesser zu 5,4 mm.

Die *Mikrometerschraube* (Bild 2) gestattet eine Ablesung auf Hundertstelmillimeter.

Bei einer vollen Umdrehung der Schraubenspindel rückt diese um 1 Teilstrich vor (Ganghöhe der Schraube meist 1 mm). Das Ende

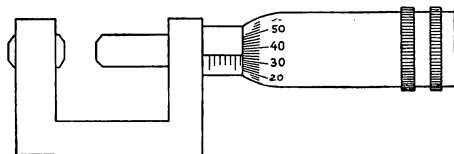


Bild 2. Mikrometerschraube

der Schraube ist in einem Hohlzylinder befestigt (Trommel), dessen Umfang in 100 gleiche Teile geteilt ist. Wenn der Trommelrand sich mit einem Millimeterstrich der Hauptskala deckt, liegt der Nullstrich der Trommel an einer festen Marke der Spindel. Beträgt die Stabdicke z. B. 6,35 mm, so sind 6 Millimeterstriche der Hauptskala frei, die Trommelskala zeigt an der Ablesemarke Teilstrich 35.

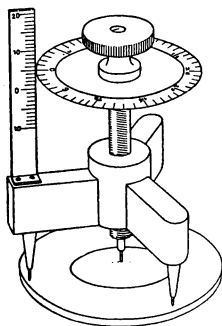


Bild 3. Sphärometer

Das *Sphärometer* (Bild 3) dient zur Dickenmessung, z. B. von Kristallen und optischen Linsen. Ein Tischchen mit 3 Füßen steht auf einer Glasplatte und trägt in der Mitte eine vertikale Schraube, deren Mutter in das Tischchen eingelassen ist. Der tellerartige Knopf der Schraube ist mit einer Kreis-Teilung von 100 Teilen versehen. Der Rand des Knopfes dreht sich dicht vor einem festen Vertikalmaßstab mit Millimeterteilung vorbei. Die Ablesung ist die gleiche wie bei der Mikrometerschraube.

In der Technik wird zu Messungen bis 25 mm Länge vielfach die *Meßuhr* verwendet. Aus dem Gehäuse der Meßuhr ragt ein federnder Stift, der in seinem oberen Teil als Zahnstange gearbeitet ist. In diese greift eine Zahnradübertragung ein, die die Verschiebung des Stiftes in eine Drehbewegung des Zeigers umsetzt. Die Meßgenauigkeit beträgt $\frac{1}{1000}$ mm. Feinere Meßgeräte werden wir in der Optik kennenlernen.

c) Flächenmaße

$1 \text{ km}^2 = 100 \text{ ha}$, $1 \text{ ha} = 100 \text{ a}$, $1 \text{ a} = 100 \text{ m}^2$;
 $1 \text{ m}^2 = 100 \text{ dm}^2$, $1 \text{ dm}^2 = 100 \text{ cm}^2$, $1 \text{ cm}^2 = 100 \text{ mm}^2$ (Verwandlungszahl 100).

d) Flächenmessung

Die Messung geradlinig begrenzter, ebener Flächen läßt sich nach den Sätzen der Geometrie auf die Messung der Seitenlängen eines Rechtecks zurückführen. Bei Begrenzung der Fläche durch Kurven wird die Messung schwieriger, sie wird zu einer Aufgabe der Integralrechnung, die auch mechanisch gelöst werden kann (Polarplanimeter)¹. Oft ist eine physikalische Methode zweckentsprechend: die Flächenmessung durch Wägung. Hierbei wird die zu messende Fläche auf gleichmäßig dicken Karton aufgezeichnet, ausgeschnitten und gewogen. Der Vergleich mit dem Gewicht der Flächeneinheit dieses Kartons gibt die Maßzahl der Fläche.

e) Raumaße

$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3$ (Liter); $1 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ cm}^3$;
 $1 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ mm}^3$ (Verwandlungszahl 1000).

f) Raummessung

Die Raummessung ebenflächig begrenzter Körper läßt sich auf die Längenmessung zurückführen. Zur Volumenbestimmung unregelmäßig begrenzter Körper dient das *Überlaufgefäß* (Bild 4).

Diese Volumenbestimmung beruht auf dem Prinzip der Undurchdringlichkeit: Dort, wo ein Körper ist, kann nicht zugleich eine Flüssigkeit sein. Die überlaufende Flüssigkeitsmenge wird in einem Meßzylinder aufgefangen. Die Raummessung kann auf Grund einer Wägung erfolgen, wenn man das Gewicht der Volumeneinheit, die Wichte des betreffenden Stoffes, kennt (Wichte, früher spezifisches Gewicht, vgl. S. 34).

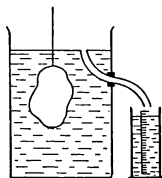


Bild 4
Überlaufgefäß

¹ Zur Erklärung des Polarplanimeters ist die Kenntnis der Integralrechnung notwendig.

g) Winkelmessung

Bei der Winkelmessung ist heute noch die alte Kreisteilung in 360° üblich, die auf die Babylonier zurückgeht. Als Einheit dient 1 Grad. $1^\circ = 60$ Minuten ($'$), $1' = 60$ Sekunden ($''$). Zur Winkelmessung im Gelände verwendet man den Theodolith (Bild 5). Er besteht aus einem Fernrohr, das um eine vertikale und um eine horizontale Achse drehbar ist. Die Winkel werden entsprechend auf einer vertikalen und einer horizontalen Kreisteilung abgelesen. Die Einstellung des Fernrohres auf einen Punkt liefert also 2 Winkel, einen Horizontalwinkel (Azimut, gemessen vom Nordpunkt oder Südpunkt aus) und einen Vertikalwinkel (Höhe = Erhebungswinkel über die Horizontalebene).

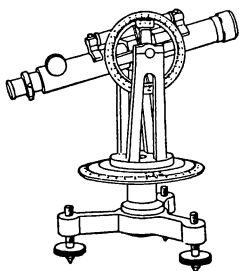


Bild 5. Theodolit

Auch hier verwendet man eine Noniusteilung (Bild 6). Wenn auf 29 Teile der Kreisteilung 30 Teile der Noniusteilung kommen, ist jeder Noniusteil $\frac{1}{30}^\circ = 2'$ zu kurz. Fällt bei einer Ablesung z. B. der 3. Noniustrich mit einem Strich der Hauptskala zusammen, so sind zu der vollen Gradzahl der Kreisteilung $3 \cdot 2' = 6'$ hinzuzurechnen. In Bild 6 ist auf der Noniusskala die Umrechnung schon berücksichtigt.



Bild 6. Winkelnonius

Bei neueren Meßinstrumenten ist der Kreis in 400 Teile geteilt (Neugrad), der rechte Winkel also in 100 Neugrad. Zur weiteren Unterteilung werden Dezimalstellen verwendet.

h) Zeitmessung

Die Grundeinheit der Zeitmessung ist die *Sekunde* (s). Eine Sekunde ist der 86 400ste Teil eines mittleren Sonnentages. Die Dauer einer Umdrehung der Erde um ihre Achse heißt ein Tag. Dabei ist zu unterscheiden die Dauer zwischen zwei aufeinander-

folgenden Kulminationen¹ des gleichen Sternes – dieses Zeitintervall ist ein Sterntag – und die Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kulminationen der Sonne, ein Sonnentag. Die Dauer des „wahren Sonnentages“ wechselt infolge der wechselnden Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne. Zur Zeitmessung dient deshalb der „mittlere Sonnentag“, der Mittelwert der wahren Sonnentage eines Jahres.

Der mittlere Sonnentag wird in 24 Stunden zu je 60 Minuten, die Minute in 60 Sekunden geteilt.

1 mittlerer Sonnentag	= 86400 s (mittl. Sonnenzeit)
1 Sterntag	= 86164 s (mittl. Sonnenzeit)

An Stelle des Vergleichs mit dem Lauf der Sonne verwendet man zur praktischen Zeitmessung andere sich regelmäßig wiederholende Vorgänge, z. B. das Ausfließen einer bestimmten Sand- oder Wassermenge (Sanduhren und Wasseruhren) oder den Hinundhergang eines Pendels (Pendeluhr). Auch die regelmäßigen Schwingungen des technischen Wechselstroms werden zur Konstruktion von Uhren benutzt. Die höchste Konstanz zeigen die Schwingungen von Quarzkristallen unter dem Einfluß elektrischer Wechselspannungen (Quarzuhr).

i) Kraftmessung

Unser Kraftbegriff ist von der Muskelkraft hergeleitet. Um einen leeren Handwagen zu ziehen, wenden wir eine geringere Kraft auf als zur Fortbewegung des beladenen Wagens. Um Kräfte objektiv zu messen, benutzen wir Federwaagen (Bild 7). Die Dynamometer² oder Kraftmesser bestehen aus einer Schraubenfeder oder gebogenen Blattfeder, die sich bei Einwirkung einer Zugkraft dehnt, bei Einwirkung einer Druckkraft zusammendrückt (Bilder 8 und 9). Die Dehnung oder Pressung ist innerhalb gewisser Grenzen (Elastizitätsgrenze, s. S. 23) der Kraft proportional.

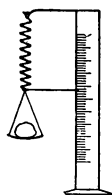
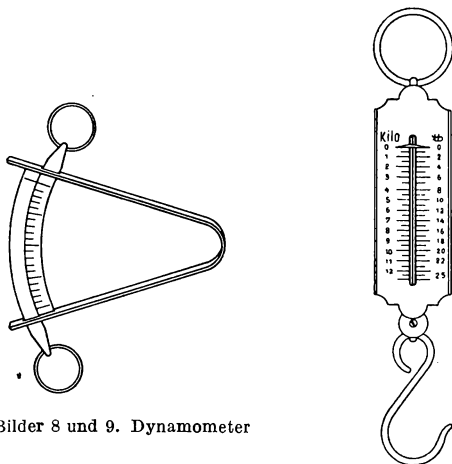


Bild 7
Federwaage

¹ Als Kulmination bezeichnet man den Durchgang des Gestirns durch den Ortsmeridian. Die Kulmination der Sonne ergibt den höchsten Sonnenstand des Tages.

² dynamis, griech., die Kraft.

Als **Krafteinheit** wurde diejenige Kraft festgelegt, die nötig ist, um einem Liter Wasser bei 4°C am Meeresspiegel unter 45° geographi-



Bilder 8 und 9. Dynamometer

scher Breite das Gleichgewicht zu halten. Diese Kraft heißt 1 Kilopond (kp), der 1000. Teil eines Kiloponds ist 1 Pond (p)¹.

Kräfte werden in Kilopond (kp) und Pond (p) gemessen

Die Aufschriften der Skalen unserer Dynamometer zeigen meist noch die Bezeichnung Kilogramm (kg) und Gramm (g), die in der Physik aber ausschließlich für eine andere Maßeinheit, die Masse, verwandt wird, deren Wesen wir erst in der Dynamik kennenlernen werden.

Eine Kraft können wir nur an ihrer Wirkung beurteilen. Diese besteht in einer Bewegungsänderung oder in einer Verformung des Körpers. Bei den Federwaagen ist es die der Kraft proportionale Verformung, die wir zur Kraftmessung benutzen.

¹ pónus, lat., das Gewicht, die Last, vgl. unser Wort Pfund. Die Bezeichnungen Kilopond und Pond sind eingeführt worden, um Verwechslungen der Krafteinheit mit der Masseneinheit Kilogramm zu verhüten. In der Technik und im täglichen Leben haben sich diese Bezeichnungen noch nicht durchgesetzt.

Die Kraft, unter deren Einwirkung alle Körper auf der Erde stehen, ist die Schwerkraft, sie äußert sich im Gewicht des Körpers. Die Schwerkraft ist nicht überall gleich groß, sondern sie hängt vom Abstand vom Erdmittelpunkt ab. Das gleiche Gewichtsstück dehnt die Feder des Dynamometers in München stärker als auf der Zugspitze. Am Nordpol ist das Gewicht eines Liter Wassers (4°C) unter sonst gleichen Bedingungen größer als am Äquator, weil der Nordpol infolge der Erdabplattung dem Erdmittelpunkt näher liegt als der Äquator. Doch sind diese Unterschiede im Gewicht kleiner als 0,5% und können deshalb im täglichen Leben vernachlässigt werden. Der Physiker darf dies nicht.

Das Gewicht ist abhängig vom Ort der Messung

Die Kräfte unterscheiden sich noch in einem Punkt von den Größen, die wir bisher gemessen haben. Zur Kenntnis einer Kraft gehört nicht allein die Messung ihrer Größe (ihres Betrages), sondern auch die Kenntnis der Richtung, in der sie wirkt, und des Punktes, in dem sie angreift. Eine Länge z. B. ist eindeutig bestimmt durch ihre Maßzahl. Größen dieser Art nennt man *Skalare*¹. Gerichtete Größen, wie z. B. die Kraft, bezeichnet man im Gegensatz dazu als *Vektoren*².

Ein Vektor wird graphisch durch einen Pfeil dargestellt, er ist durch drei Angaben bestimmt:

Angriffspunkt,
Richtung,
Betrag.

Für die Zeichnung ist weiter die Angabe des Kräftemaßstabs nötig, 1 cm kann an sich 1 p, aber auch 10 kp bedeuten.

¹ scalae, lat., Leiter, Treppe.

² véhère, lat., fahren, Vektor = Fahrstrahl.

I. Mechanik

A. Feste Körper

1. Statik fester Körper

a) Grundgesetze des Gleichgewichts

Ein Körper heißt starr, wenn er durch äußere Kräfte keine Deformation erleidet. Der „starre“ Körper ist eine Abstraktion, die besagt, daß von Veränderungen im Innern des Körpers abgesehen werden soll.

In einem starren Körper darf man den Angriffspunkt einer Kraft in ihrer Wirkungslinie beliebig verschieben. Man versteht unter der Wirkungsline einer Kraft die Linie, die durch den Angriffspunkt der Kraft geht und die Richtung der Kraft hat.

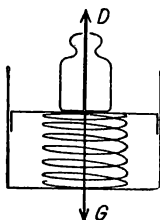


Bild 10. Kraft und Gegenkraft

Zwei entgegengesetzt gleiche Kräfte heben sich auf (Tauziehen!), der Körper bleibt im Gleichgewicht. Mit den Bedingungen, unter denen ein Körper unter der Einwirkung von Kräften im Gleichgewicht bleibt, befaßt sich die Statik¹. Jede auf einen Körper wirkende Kraft setzt diesen in Bewegung oder ruft in diesem eine gleich große Gegenkraft hervor (Bild 10).

$$\text{Kraft} = \text{Gegenkraft}$$

*Newton*² 1670: *actio et reactio pares*.

Die Wirkung eines Systems von Kräften ändert sich nicht, wenn man weitere Kräfte, die sich gegenseitig im Gleichgewicht halten, hinzufügt oder wegnimmt.

¹ status, lat., das Stehen, Statik = Lehre vom Gleichgewicht.

² *Isaac Newton* (spr. Njuťn), 1643 bis 1727, Begründer der klassischen Mechanik.

Zwei Kräfte, deren Wirkungslinien einen Winkel miteinander bilden, lassen sich zu einem *Parallelogramm* zusammenfügen. Die Diagonale des Parallelogramms ist der Richtung und der Größe nach der Ersatz für die beiden Kräfte, die die Seiten des Parallelogramms bilden. Die beiden Seitenkräfte heißen *Komponenten*, die Ersatzkraft (Diagonale) *Resultierende* (Stevin 1620).

Experimentelle Bestätigung durch Anhängen von Gewichten an einen Faden, der über zwei feste Rollen läuft (Bild 11).

Die Resultierende aus den Kräften (3) und (4) ist der Zugkraft (5) des mittleren Anhängengewichtes entgegengesetzt gleich. Der Winkel

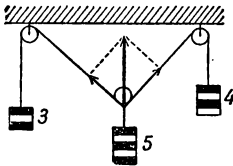


Bild 11. Parallelogramm der Kräfte

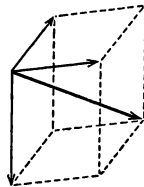


Bild 12. Drei Kräfte im Raum mit gemeinsamem Angriffspunkt

zwischen den Komponenten hängt von der Wahl der Gewichte ab. Die Resultierende ist vertikal gerichtet und dem mittleren Gewicht entgegengesetzt gleich.

Drei Kräfte im Raum ergeben als Resultierende die Diagonale des durch die drei Komponenten gebildeten Parallelepipeds (Bild 12).

Für drei und mehr Kräfte in einer Ebene ergibt die wiederholte Anwendung des Satzes vom Kräfteparallelogramm das *Kräftepolygon* (Krafteck).

Dieses entsteht durch Aneinanderfügen der Teilkräfte, so daß der Anfangspunkt der nächsten Kraft mit dem Pfeilende der vorhergehenden zusammenfällt.

Ist das *Kräftepolygon geschlossen*, so stehen die Kräfte im *Gleichgewicht*. Ist das Polygon offen, so gibt die Verbindungslinie des ersten Angriffspunktes mit dem letzten Pfeilende die Resultierende der Einzelkräfte (Bild 13).

Bild 13
Kräftepolygon

Wichtiger als das Zusammenfügen von Kräften zu einer Resultierenden ist für das Verständnis physikalischer Gesetze die Zerlegung einer Kraft in Komponenten von vorgeschriebener Richtung (Bild 14). Meist stehen die Komponenten aufeinander senkrecht und stellen Druck- und Zugkräfte dar.

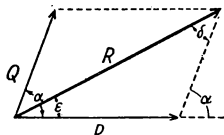


Bild 14. Resultierende zweier Teilkräfte

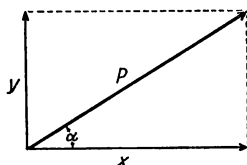


Bild 15. Zerlegung einer Kraft in zwei zueinander senkrechte Komponenten

Berechnung des Kräfteparallelogramms:

Cosinussatz: $R^2 = P^2 + Q^2 + 2 PQ \cos \alpha$

Sinussatz: $P : Q : R = \sin \delta : \sin \varepsilon : \sin \alpha, \quad \delta + \varepsilon = \alpha$

Zerlegung einer Kraft in 2 zueinander senkrechte Komponenten (Bild 15):

$$X = P \cos \alpha; \quad Y = P \sin \alpha; \quad \tan \alpha = \frac{Y}{X}$$

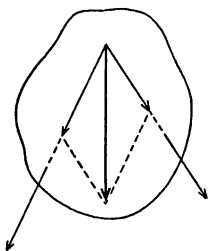


Bild 16. Zusammensetzung zweier schräger Kräfte

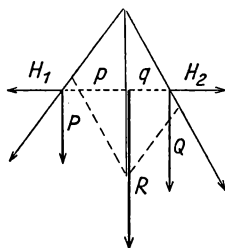


Bild 17. Zusammensetzung zweier paralleler, gleichgerichteter Kräfte

Nichtparallele Kräfte in einer Ebene kann man in ihren Wirkungslinien immer so verschieben, daß die Kräfte paarweise in einem Punkt angreifen (Bild 16).

Parallele Kräfte. Wir haben 3 Fälle zu unterscheiden: parallele gleichgerichtete Kräfte, parallele entgegengesetzt gerichtete, ver-

schieden große Kräfte, parallele entgegengesetzt gerichtete, gleiche Kräfte.

1. Zwei Parallele gleichgerichtete Kräfte lassen sich durch Hinzufügen zweier gleicher entgegengesetzter Hilfskräfte (H_1 und H_2) in schrägliegende Kräfte verwandeln und wie diese zusammenfügen (Bild 17).

Die Resultierende zweier paralleler gleichgerichteter Kräfte ist gleich der Summe der Teilkräfte.

Der Angriffspunkt der Resultierenden teilt die Verbindungslinie der Angriffspunkte der Teilkräfte im umgekehrten Verhältnis der Teilkräfte.

$$P : Q = q : p \quad \text{oder} \quad Pp = Qq$$

2. Zwei verschieden große parallele, entgegengesetzt gerichtete Kräfte lassen sich durch Hinzufügen zweier gleicher, entgegengesetzter Hilfskräfte in schräge Kräfte verwandeln und zusammenfügen (Bild 18). Nach Wegnahme der Hilfskräfte ergibt sich:

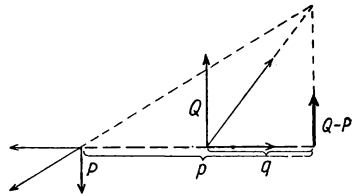


Bild 18. Zusammensetzung zweier paralleler, ungleicher, entgegengesetzt gerichteter Kräfte

Die Resultierende ist gleich der Differenz der Parallelkräfte. Der Angriffspunkt liegt außerhalb der Verbindungslinie der Teilkräfte.

$$P : Q = q : p \quad \text{oder} \quad Pp = Qq$$

3. Parallele entgegengesetzt gerichtete, gleiche Kräfte lassen sich nicht zu einer Resultierenden zusammenfügen, sie bilden ein *Kräftepaar*, das sich in einer *Drehbewegung* auswirkt.

Die Wirkung eines Kräftepaares ist durch das Produkt aus einer Kraft P und dem Abstand p der beiden Kräfte eindeutig bestimmt. Pp heißt das Moment des Paares, p der Arm. Daraus folgt, daß man ein Kräftepaar in der Ebene beliebig verschieben und durch ein anderes ersetzen kann, wenn nur $Pp = P'p'$ ist.

Bei einem Kräftepaar ergibt das Hinzufügen zweier gleicher, aber entgegengesetzter Hilfskräfte ein neues Kräftepaar von gleichem Moment.

$$Pp = \frac{P}{\cos \alpha} \cdot 2 \frac{p}{2} \cos \alpha = P'p' \quad (\text{Bild 19})$$

Die Wirkung des Kräftepaares ist unabhängig von der Lage des Drehpunktes.

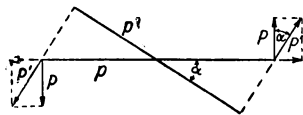


Bild 19. Gleichwertige Kräftepaare

Gleichgewicht am drehbaren Körper

Auf einen Körper wirken 2 Kräfte. Ein Punkt der Resultierenden sei fest, so daß der Körper höchstens eine Drehbewegung ausführen kann.

Dann wird die Resultierende durch die Gegenkraft in der Befestigung aufgehoben, und der Körper bleibt im Gleichgewicht. Die Bedingung für das Gleichgewicht eines Körpers mit einem festen Drehpunkt lautet: $Pp = Qq$.

Bedingung für das Gleichgewicht eines drehbaren Körpers:

$$Pp = Qq$$

Das Produkt aus der Kraft und ihrem senkrechten Abstand vom Drehpunkt heißt *Drehmoment*, oft kurz *Moment* genannt. Das Drehmoment ist für verschiedene Punkte eines Körpers verschieden groß. Wo eine Verwechslung möglich ist, muß deshalb genauer gesagt werden: das Drehmoment der Kraft P in bezug auf den Punkt D . Ein drehbarer Körper ist unter der Wirkung zweier Kräfte im Gleichgewicht, wenn die beiden Drehmomente entgegengesetzt gleich sind.

Das Gesetz findet praktische Anwendung im Hebel (S. 16). Für das Gleichgewicht des Hebels gilt:

Kraft $\times$ Kraftarm = Last $\times$ Lastarm.

$$Pp = Qq$$

Hebelgesetz

Das Gesetz läßt sich auf beliebig viele angreifende Parallelkräfte erweitern:

Am Hebel herrscht Gleichgewicht, wenn die Summe der Drehmomente im Uhrzeigersinne gleich der Summe der Drehmomente

im Gegensinn ist. Man sagt auch: Die Summe der rechtsdrehenden Momente ist gleich der Summe der linksdrehenden.

Der Schwerpunkt

Auf die Massenteilchen eines starren Körpers wirken die Schwerkraften $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$. Diese Parallelkräfte lassen sich zu einer Resultierenden zusammensetzen, deren Größe dem Gesamtgewicht des Körpers entspricht. Hängt man den Körper in einem Punkt auf, so bewirkt die resultierende Schwerkraft durch ihr Drehmoment so lange eine Drehung, bis ihre Wirkungslinie durch den Drehpunkt geht. Die Aufhängung in einem zweiten Punkt liefert eine zweite Wirkungslinie. Beide schneiden sich in einem Punkt, dem Schwerpunkt des Körpers. Denkt man sich die einzelnen Schwerkraften der Massenteilchen eines Körpers durch die resultierende Schwerkraft, das Gewicht des Körpers, ersetzt, so ist der Schwerpunkt derjenige Punkt des Körpers, durch den bei jeder Lage die Wirkungslinie der Resultierenden hindurchgeht.

In bezug auf den Schwerpunkt sind die Drehmomente im Gleichgewicht.

Im Schwerpunkt kann man sich das gesamte Gewicht eines Körpers vereinigt denken.

Ist ein Körper um eine Achse drehbar befestigt, so herrscht Gleichgewicht, wenn der Schwerpunkt in der durch die Achse gelegten Vertikalebene liegt.

Die Berechnung des Schwerpunktes ist eine Aufgabe der Integralrechnung, nur bei regelmäßigen Körpern läßt sich der Schwerpunkt elementar berechnen.

Schwerpunktslagen. Dreiecksfläche: Schnittpunkt der Seitenhalbierenden (Schwerlinien), Dreiecksumfang: Inkreismittelpunkt des Dreiecks, dessen Ecken auf den Seitenmitten liegen.

Praktische Schwerpunktsbestimmung: Aufhängen an zwei Punkten nacheinander.

Jede Aufhängung ergibt eine Schwerlinie. Schnittpunkt beider ist der Schwerpunkt.

Arten des Gleichgewichts

Stabiles Gleichgewicht. Der Schwerpunkt liegt lotrecht unter dem Aufhängepunkt (Unterstützungspunkt). Bei Heben des freien

Endes eines oberhalb des Schwerpunktes aufgehängten Körpers tritt ein Drehmoment auf: Gewicht mal Schwerpunktabstand von der Vertikalen durch den Aufhängepunkt. Dieses Drehmoment treibt den Körper in die stabile Gleichgewichtslage zurück (Bild 20a).

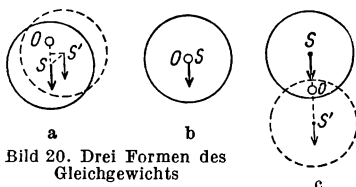


Bild 20. Drei Formen des Gleichgewichts

Indifferentes Gleichgewicht. Der Schwerpunkt befindet sich im Aufhängepunkt. Gleichgewicht bei jeder Lage des Körpers (Bild 20b).

Labiles Gleichgewicht. Der Schwerpunkt liegt senkrecht über dem Aufhängepunkt. Der geringste Anstoß bringt den Körper zum Umschlagen in das stabile Gleichgewicht (Bild 20c).

Standfestigkeit. Ist ein Körper in mehreren Punkten unterstützt, so kann das Gleichgewicht stabil sein, auch wenn der Schwerpunkt über den Unterstützungspunkten liegt. Die Kraft, die nötig ist, um einen Körper zu kippen, gibt ein Maß für seine Standfestigkeit. Die Standfestigkeit eines Körpers ist um so größer, je breiter seine Stützfläche ist und je tiefer sein Schwerpunkt liegt.

b) Einfache Maschinen

Hebel. Ein Hebel ist im Gleichgewicht, wenn die auftretenden Drehmomente entgegengesetzt gleich sind.

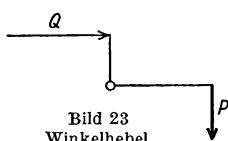
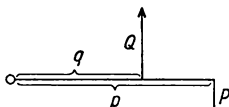
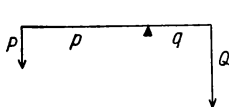


Bild 21. Zweiseitiger Hebel

Bild 22. Einseitiger Hebel

Bild 23
Winkelhebel

Zweiseitiger Hebel (Bild 21): $Pp = Qq$

Einseitiger Hebel (Bild 22): $Pp - Qq = 0$

Winkelhebel verbinden eine Änderung der Kraftrichtung mit der Veränderung des Betrages der Kraft (Bild 23).

Anwendungen. Einseitiger Hebel: Unterarm, Schubkarre, Hebelschneidemaschine, Nußknacker, Sicherheitsventil der Dampfmaschine.

Zweiseitiger Hebel: Zange, Schere, Balkenwaage.

Wellrad und Winde. Das Wellrad (Bild 24) besteht aus zwei festverbundenen Rollen auf gleicher Achse. Das Hebelgesetz ergibt als Gleichgewichtsbedingung:

$$PR = Qr \quad \text{oder} \quad P = Q \frac{r}{R}$$

Bei der Winde ist die große Rolle des Wellrades durch die Kurbelstange (R) ersetzt. Mit der Seiltrommel (r) ist ein Zahnrad verbunden, in das eine Sperrklinke eingreift, damit die Kurbel beim Loslassen nicht zurückschnellt (Bild 25).

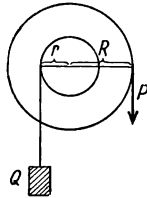


Bild 24. Wellrad

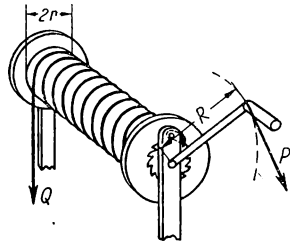


Bild 25. Winde

Seil und Rolle. Die feste Rolle (Bild 26) dient nur dazu, die Richtung der Kraft zu verändern, sie bringt keine Kraftersparnis. Die lose Rolle (Bild 27) halbiert die Last, eine

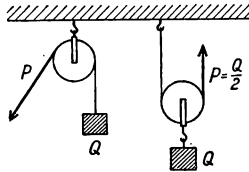


Bild 26. Feste Rolle

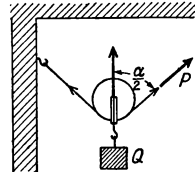


Bild 27. Lose Rolle

Hälfte wird durch den Gegenzug der Aufhängevorrichtung ersetzt. Bei schräg gespanntem Seil gilt das Parallelogrammgesetz:

$$P = \frac{Q}{2} : \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Flaschenzüge. Eine Flasche ist ein System von Rollen, die in einem Halter vereinigt sind.

Gewöhnlicher Flaschenzug mit n festen und n losen Rollen (Bild 27):

$$P = \frac{Q}{2n}$$

Begründung: Denkt man das Seil zwischen beiden Flaschen zerschnitten, so hat jedes Seilstück $\frac{Q}{2n}$ zu tragen, also auch das Stück, an dem P angreift.

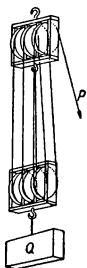


Bild 28
Gewöhnlicher Flaschenzug

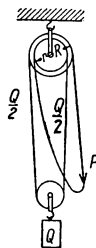


Bild 29
Differentialflaschenzug

Differentialflaschenzug (Bild 29):

$$P = \frac{R - r}{2R} Q$$

Begründung: Drehmomente $\frac{Q}{2} r + PR = \frac{Q}{2} R$.

Für alle einfachen Maschinen gilt die goldene Regel der Mechanik:

Was an Kraft gespart wird, muß an Weg zugesetzt werden, ein Gewinn oder Verlust an Arbeit tritt nicht ein. Maschinen dienen zur Umwandlung von Arbeit, sie bringen keine Arbeitersparnis.

Waagen. Balkenwaagen sind Anwendungen der Hebelgesetze.

Gleicharmige Waagen. Stabiles Gleichgewicht, Schwerpunkt unter dem Drehpunkt. Die Empfindlichkeit der Waage wächst mit der Länge des Waagebalkens, nimmt aber ab mit dem Gewicht des Balkens (Waagebalken in Gitterform).

Die *Empfindlichkeit* wird durch das Übergewicht x gemessen, das den Ausschlag α hervorbringt (Bild 30).

$$d = s \sin \alpha; \quad p = l \cos \alpha$$

$$(P + x)p = Pp + Gd; \quad x = \frac{Gd}{p} = \frac{Gs \sin \alpha}{l \cos \alpha}; \quad x = \frac{Gs}{l} \tan \alpha$$

G Gewicht des Balkens, l Balkenlänge, s Abstand des Schwerpunktes vom Drehpunkt.

Doppelwägung zum Ausgleich der Waagefehler. Die zu bestimmende Last Q wird einmal links, einmal rechts auf die Waagschale

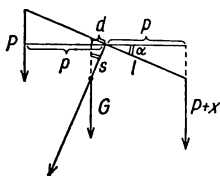


Bild 30. Empfindlichkeit der Waage

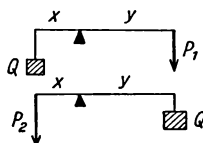


Bild 31

Wägung mit ungleicharmiger Waage

gelegt, es ergeben sich die Gewichte P_1 und P_2 , die Hebelarme seien x und y (Bild 31).

$$Qx = P_1y$$

$$\frac{P_2x = Qy}{\frac{Q}{P_2} = \frac{P_1}{Q}}$$

$$Q^2 = P_1P_2$$

$$Q = \sqrt{P_1P_2}$$

Das wahre Gewicht ist das geometrische Mittel der beiden Wägungen. Für praktische Zwecke genügt meist das arithmetische Mittel, das etwas größer ist als das geometrische.

Ungleicharmige Waagen

Schnellwaage (Bild 32). Die Last hängt am kurzen Hebelarm, ein Laufgewicht ist am langen Hebelarm verschiebbar. Der Hebelarm ist empirisch geeicht.

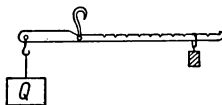


Bild 32. Schnellwaage

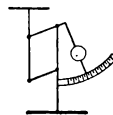


Bild 33. Briefwaage

Briefwaage (Bild 33). Bei Belastung der Waage kann sich die Waagschale infolge der Führung in einem mit Gelenken versehenen

Parallelogramm nur in vertikaler Richtung bewegen. Die obere Parallelogrammseite ist gleichzeitig kurzer Arm eines Winkelhebels, dessen langer Arm am Ende beschwert ist. Der lange Arm gleitet über eine Skala. Im Gleichgewichtsfall sind die beiderseitigen Drehmomente gleich.

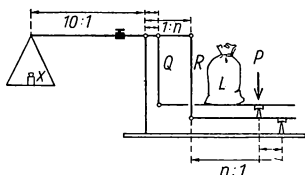


Bild 34. Dezimalwaage

Dezimalwaage (Bild 34). In der Dezimalwaage halten die aufgelegten Gewichte der zehnfachen Last das Gleichgewicht. Der rechte Arm des zweiseitigen Hebels ist im gleichen Verhältnis geteilt wie der ein-

seitige Hebel der Brücke; der linke Arm ist zehnmal so lang wie die Einheit des rechten Arms. Am zweiseitigen Hebel ergibt sich die Momentengleichung:

$$X \cdot 10 = Q \cdot 1 + R \cdot n$$

am einseitigen:

$$\frac{0 = P \cdot 1 - R \cdot n}{X \cdot 10 = Q + P = L}$$

Schiefe Ebene (Bild 35)

Steigung: $\tan \alpha = \frac{h}{b}$, Hangabtrieb $H = G \sin \alpha = G \frac{h}{l}$, Normalkraft auf die schiefe Ebene $N = G \cos \alpha = G \frac{b}{l}$.

Last: Bodendruckkraft: Hangabtrieb = Länge: Basis: Höhe

Reibung: Reibungskräfte sind Widerstandskräfte, die erst auf-

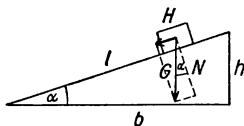


Bild 35. Schiefe Ebene

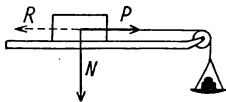


Bild 36. Gleitende Reibung

treten, wenn eine andere Kraft zu wirken beginnt. Dem Hangabtrieb wirkt die Reibungskraft entgegen. Man unterscheidet gleitende Reibung (Bild 36) und rollende (wälzende) Reibung.

Die *Reibungszahl* μ ist das Verhältnis der bei der Überwindung der Reibung nötigen Kraft zur Normalkraft auf die Unterlage: $\mu = \frac{R}{N}$.

μ läßt sich mit einer schiefen Ebene mit verstellbarem Winkel bestimmen. Der Klotz gleitet, wenn mindestens $H = R$ ist.

$$\mu = \frac{G \sin \alpha}{G \cos \alpha} = \tan \alpha; \quad \boxed{R = \mu N}$$

Die Reibungskraft ist unabhängig von der Größe der Berührungsfläche.

Reibungszahlen

Holz auf Holz 20 ... 48%, geschmiert 6 ... 8%;

Metall auf Metall, trocken 15 ... 24%, geschmiert 6 ... 11%;

Metall auf Eis 2 ... 3%;

Rollende Reibung: Metall auf Metall 1%.

Schraube und Keil

Bei einer Umdrehung rückt die Spindel um die Ganghöhe h der Schraube vor. Der Schraubengang läßt sich als schiefe Ebene auffassen (Bild 37). Aus der goldenen Regel der Mechanik folgt:

$$P 2\pi R = Qh.$$

$$\boxed{P = \frac{h}{2\pi R} Q}$$

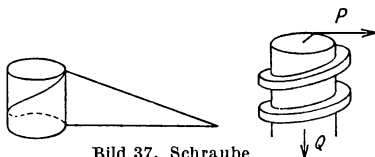


Bild 37. Schraube

Schrauben finden Verwendung als Druck- und Hubschrauben (Pressen, Schleusenschütze), vor allem aber wegen der hohen Reibung der Schraubenwindungen als Halteschrauben.

Der Keil (Bild 38) besteht aus zwei mit der Basis aneinandergefügten schiefen Ebenen. Die auf den Rücken des Keils wirkende Kraft P läßt sich in zwei gleiche Normalkomponenten N zerlegen. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke folgt:

$$P : N = r : s;$$

$$\boxed{P = N \frac{r}{s}}$$

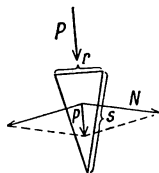


Bild 38. Keil

Je spitzer der Winkel des Keils ist, um so größer ist die Trennkraft.

c) Atome und Molekeln

In der Chemie hat sich die Vorstellung durchgesetzt, daß die Körper aus kleinsten Teilchen bestehen, die durch Anziehungskräfte miteinander verbunden sind; das physikalisch kleinste Teilchen eines Stoffes heißt *Molekül* oder Molekel¹. Die Molekeln lassen sich nur mit chemischen Mitteln in die Atome² weiterzerlegen. Man hat sich die Atome und Molekeln ursprünglich als kleine elastische Kugeln vorgestellt. Heute wissen wir, daß auch diese Atome nicht die kleinsten Bausteine der Stoffe sind, sondern selbst wieder „Planetensysteme“ von winzigen Ausmaßen.

Für unsere Betrachtungen wollen wir aber so lange bei der Vorstellung von elastischen Kugeln bleiben, bis wir die nötigen Kenntnisse gesammelt haben, um den weiteren Atombau verstehen zu können.

Die Molekularhypothese erklärt zugleich das Verhalten eines Stoffes in seinen drei Aggregatzuständen³: fest, flüssig und gasförmig. Im festen Körper sind die Molekeln so dicht gepackt und durch Anziehungskräfte⁴ zusammengehalten, daß sie nur Schwingungen um eine Ruhelage ausführen können. Im flüssigen Zustand ist der Zusammenhalt schon mehr gelockert, die Molekeln gleiten aneinander vorbei, die Flüssigkeit hat keine feste Form, aber ein bestimmtes Volumen. Die Bewegung der Molekeln in Flüssigkeiten hat 1827 der Botaniker *Brown* (spr. Braun) erkannt und nachgewiesen. Man nennt nach ihm diese Bewegung die Brownsche Molekularbewegung. Unter einem guten Mikroskop zeigen die in einer Flüssigkeit schwebenden Teilchen eines Farbstoffes eine unregelmäßige Zickzackbewegung. Die Farbstoffpartikel stoßen ununterbrochen mit den unsichtbaren Wassermolekeln zusammen und werden dadurch selbst hin und her gestoßen.

In Gasen ist der Zusammenhalt der Molekeln so weit gelockert, daß sie jeden gebotenen Raum einnehmen.

d) Molekularkräfte fester Körper

Die Festigkeit eines Körpers beruht auf der Stärke der *Kohäsionskräfte*⁴, die zwischen den Molekeln wirksam sind.

¹ *molécule*, lat., die kleine Masse; das häufig gebrauchte Wort Molekül ist aus dem Französischen entlehnt.

² *átomos*, griech., unteilbar.

³ *aggregare*, lat., anhäufen.

⁴ Kohäsionskräfte von *cohaerere*, lat., zusammenhängen.

Adhäsion heißt Zusammenhalt zwischen Molekeln verschiedener Stoffe (Glasscheibe und Wasser). Auf der Adhäsion beruht das Malen, Leimen, Löten, Vernickeln, Verchromen usw.

Härte heißt der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen oder Ritzen seiner Oberfläche entgegensetzt.

Härteskala (der Mineralogie)

1. Talk, 2. Gips, 3. Kalkspat, 4. Flußspat, 5. Apatit, 6. Feldspat, 7. Quarz, 8. Topas, 9. Korund, 10. Diamant.

Jeder in der Reihe folgende Körper ritzt alle vorhergehenden.

Körper, die nach Dehnung oder Zusammendrückung ihre alte Form wiederherstellen, heißen *elastisch*, Körper, die die Deformation beibehalten, *plastisch*. Wenn die Deformation ein gewisses Maß überschreitet (Elastizitätsgrenze), geht die Verformung nicht vollständig wieder zurück.

Die *Dehnungszahl* (ε) gibt die Dehnung an, die ein 1 m langer Stab von 1 mm² Querschnitt bei einem Zug von 1 kp erfährt. Die Dehnungszahl ε ist eine Materialkonstante, ihr reziproker Wert heißt *Elastizitätsmodul* (E).

$$\text{Dehnung } d = \varepsilon \frac{lP}{q}$$

l Länge in m, P dehnende Kraft in kp, q Querschnitt in mm², $\varepsilon = \frac{1}{E} \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{kp}} \right]$. Dann ergibt sich d in m.

Die *Zugfestigkeit* gibt die Kraft an, bei der das Zerreißen einsetzt, die *Druckfestigkeit* die Kraft, die zum Zerdrücken nötig ist.

Auch Biegung und Drillung rufen elastische Gegenkräfte wach. Für alle elastischen Kräfte gilt das *Hookesche Gesetz* (1670):

Innerhalb der Elastizitätsgrenze ist die Dehnung, Verkürzung, Biegung und Drillung den verformenden Kräften proportional.

Die technisch zulässige Belastung liegt weit unter der Elastizitätsgrenze. Man bezeichnet als *Sicherheit* das Verhältnis der Zug- oder Druckfestigkeit zur zulässigen Spannung.

Stoff	Dehnungs- zahl ε	Zugfestigkeit t kp/mm ²	Druckfestigkeit kp/mm ²
Stahl	0,000 045	70 ... 120	100 ... 300
Eisen	0,000 053	40 ... 60	60 ... 90
Kupfer	0,000 07	15 ... 30	40
Aluminium	0,000 11	17 ... 20	7,5 ... 10
Blei	0,000 6	1,4 ... 1,8	5
Glas	0,000 14	0,7 ... 3	27
Eiche (=)	0,000 7	9	5,4

2. Kinematik fester Körper

Die Kinematik ist die Lehre von der Bewegung ohne nähere Untersuchung der dabei auftretenden Kräfte.

a) Gleichförmige Bewegung

Eine Bewegung heißt gleichförmig, wenn ein Körper in gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt. Bei jeder Bewegung verstehen wir unter Geschwindigkeit den Quotienten aus dem Weg und der dafür gebrauchten Zeit. Bei einer gleichförmigen Bewegung wird die Geschwindigkeit durch den in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg gemessen. Bei einer ungleichförmigen Bewegung wechselt die Geschwindigkeit von Augenblick zu Augenblick, wir bezeichnen sie mit v (variable Geschwindigkeit) und müssen dabei den Zeitpunkt angeben, für den sie gilt. Praktisch messen wir die Augenblicksgeschwindigkeit, indem wir ein kleines Wegelement Δs durch die kleine Zeit Δt dividieren. Läßt man beide Elemente immer kleiner werden, so ist im Grenzfall die

$$\text{Momentangeschwindigkeit } v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

Für die gleichförmige Bewegung gilt:

$$s = ct$$

Hier bedeutet s den Weg, c die konstante Geschwindigkeit und t die Zeit, wenn diese von dem Augenblick an gemessen wird, an dem $s = 0$ war.

Im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm (Bild 39) erscheint der Weg als Fläche:

$$F = ct; \quad \frac{\text{cm}}{\text{s}} \text{s} = \text{cm}^1$$

Die gleichförmige Bewegung ist eine Abstraktion; in der Natur gibt es kaum eine vollkommen gleichförmige Bewegung.

Sie würde zustande kommen, wenn ein Körper einen Stoß erhält und dann keine weitere Kraft auf ihn wirkt. Da es aber in der Natur keine Bewegung ohne Reibung gibt, wird jede derartige Bewegung zu einer gleichmäßig verzögerten. Eine gleichförmige Bewegung entsteht dann, wenn z. B. eine konstante Kraft und eine gleich große, entgegengesetzte Reibungskraft wirken, wie das beim Fall eines Körpers in Wasser oder beim Fall der Regentropfen in der Luft zutrifft. Angenähert wird eine gleichförmige Bewegung bei einer rollenden Kugel auf glatter, horizontaler Unterlage vorhanden sein. Die Formel für die gleichförmige Bewegung erhält aber für den Fall ihre Bedeutung, daß man für c die Durchschnittsgeschwindigkeit setzt.

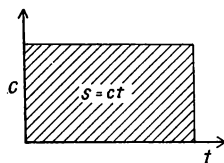


Bild 39. Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung

Gesetz der Trägheit (Galilei 1638). Jeder Körper bleibt im Zustand der Ruhe oder gleichförmiger Bewegung auf gerader Bahn, solange er nicht durch eine Kraft gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern. Auch die Umkehrung dieses Satzes ist von Bedeutung. Wenn ein Körper seinen Ruhezustand oder den der gleichförmig geradlinigen Bewegung ändert, so muß eine äußere Kraft auf ihn wirken.

Durchschnittsgeschwindigkeiten

Fußgänger	1,1 ... 1,7 m/s = 4 ... 6 km/h
Pferd im Trab	2,5 m/s = 9 km/h
Schnellzug	15 ... 28 m/s = 54 ... 100 km/h
Brieftaube	30 m/s = 108 km/h
mittlerer Wind	4 ... 11 m/s = 14 ... 40 km/h
Schall der Luft	335 m/s = 1206 km/h
Punkt am Äquator	463 m/s = 1667 km/h
Licht	300 000 km/s

¹ Die Maßbezeichnung $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ für die Geschwindigkeit zeigt an, wie die neue Einheit aus den Grundeinheiten abgeleitet ist. Vgl. S. 31.

b) Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Beschleunigung b ist der Quotient aus einer Geschwindigkeitsänderung und der dazu benötigten Zeit. $b = \frac{v_t - v_0}{t - t_0}$; v_t Endgeschwindigkeit (variabel) nach $t - t_0$ Sekunden, v_0 Anfangsgeschwindigkeit, t_0 Anfang des Zeitintervalls.

Bei der gleichmäßig beschleunigten (oder verzögerten) Bewegung ist b konstant, entweder positiv oder negativ. Setzt man statt dieser Bewegung eine gleichförmige mit der Mittelgeschwindigkeit v_m , so muß sich der gleiche Weg ergeben (Bild 40).

$$v_t = v_0 + b t$$

$$v_m = \frac{v_0 + v_t}{2} = v_0 \pm \frac{b}{2} t$$

$$s = v_m t = v_0 t \pm \frac{b}{2} t^2$$

Für $v_0 = 0$ ist $v_t = b t$ und $2 b s = b^2 t^2 = v_t^2$
 $v_t = \sqrt{2 b s}$

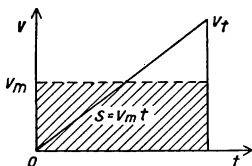


Bild 40. Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

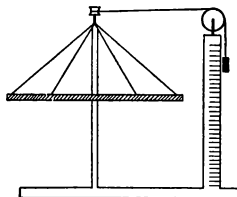


Bild 41. Reifenapparat nach Wildermuth

Anwendung: Fallrinne, Reifenapparat.

Die Fallrinne ist eine schiefe Ebene mit kleinem Neigungswinkel. Man läßt eine Kugel abwärts rollen, um zu zeigen, daß die Wege in den einzelnen Zeiteinheiten sich wie die ungeraden Zahlen verhalten.

Beim Reifenapparat nach Wildermuth (Bild 41) wird die Zugkraft eines Gewichtes durch die verhältnismäßig große Masse (d. h. Trägheit) des Reifens, der mit in Bewegung gesetzt wird, gehemmt.

Auch hier ergeben sich kleine, leicht meßbare Werte für die Beschleunigung.

Sonderfälle: *Freier Fall und senkrechter Wurf.*

Freier Fall: Fallbeschleunigung g , $v_0 = 0$:

$$v_t = g t, \quad s = \frac{1}{2} g t^2, \quad v_t = \sqrt{2 g s}$$

Die in den einzelnen Sekunden zurückgelegten Teilwege verhalten sich wie die ungeraden Zahlen, die Gesamtwege wie die Quadratzahlen.

Lotrechter Wurf

$$\text{abwärts: } v_t = v_0 + g t, \quad s = v_0 t + \frac{g}{2} t^2$$

$$\text{aufwärts: } v_t = v_0 - g t, \quad s = v_0 t - \frac{g}{2} t^2$$

Der Körper steigt, bis v_t Null geworden ist, diese Zeit heißt Steigdauer T , die Steighöhe sei H .

$$0 = v_0 - g T; \quad T = \frac{v_0}{g}$$

$$H = v_0 T - \frac{g}{2} T^2 = \frac{v_0^2}{2g}$$

$$\text{Steigzeit} = \text{Fallzeit}$$

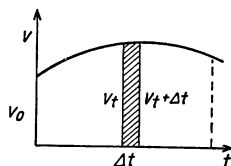


Bild 42. Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der ungleichförmigen Bewegung

c) Ungleichförmige Bewegung

$$\text{Augenblicksgeschwindigkeit} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

$$\text{Augenblicksbeschleunigung} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}$$

Weg $s = \Sigma (v_t \Delta t) = \text{Fläche des Zeit-Geschwindigkeit-Diagramms (Bild 42).}$

d) Zusammensetzung von Bewegungen

Versuch (Bild 43). Die linke Kugel wird durch die Feder festgehalten, die rechte liegt auf der Leiste auf. Schlägt der Hammer gegen die Feder, so fällt die linke Kugel frei herab, die rechte erhält einen seitlichen Antrieb und fällt im Bogen zur Erde. Beide Kugeln treffen gleichzeitig auf den Boden auf.

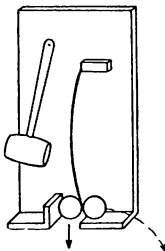


Bild 43
Unabhängigkeit
der Bewegungen

Prinzip der Unabhängigkeit der Bewegungen. Führt ein Körper gleichzeitig mehrere Bewegungen aus, so läßt sich der Ort des Körpers nach t Sekunden bestimmen, indem man die Wege als Vektoren zusammensetzt.

Relativitätsgesetz der Mechanik. Körper, die sich in einem abgeschlossenen Raum bewegen, werden in der Bewegung nicht beeinflusst, wenn der Raum als Ganzes sich gleichförmig fortbewegt.

Die Gesetze der Mechanik gelten in gleicher Weise auf einem fahrenden Schiff.

Der schräge Wurf. Die Anfangsgeschwindigkeit c läßt sich in die Horizontalkomponente v_x und die Vertikalkomponente v_y zerlegen. Auf v_x hat die Schwerkraft keinen Einfluß, v_y vermindert sich in jeder Sekunde um den Betrag g .

Geschwindigkeit: $v_x = c \cos \alpha$; $v_y = c \sin \alpha - gt$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Weg:

$$x = ct \cos \alpha$$

$$y = ct \sin \alpha - \frac{g}{2} t^2$$

Die Wurfbahn ist eine Parabel, wenn man vom Luftwiderstand absehen kann (geringe Geschwindigkeit!).

Wurfhöhe und Wurfweite. Der geworfene Körper steigt, bis $v_y = 0$ ist. Die Steigdauer T ergibt sich aus $0 = c \sin \alpha - gT$; $T = \frac{c \sin \alpha}{g}$.

Die Wurfhöhe folgt durch Einsetzen von T in die Formel

$$y = ct \sin \alpha - \frac{g}{2} t^2, \quad H = \frac{c^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Wegen der Symmetrie der Wurfbahn ist die Wurfweite der doppelte Betrag der zu T gehörigen horizontalen Wegkomponente.

$$W = 2X = 2c \cos \alpha \cdot c \frac{\sin \alpha}{g} = \frac{c^2 2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}; \quad W = \frac{c^2 \sin 2\alpha}{g}$$

Die größte Wurfweite wird für den Erhebungswinkel $\alpha = 45^\circ$ erreicht, weil dann $\sin 2\alpha$ seinen größten Wert 1 erreicht. Jeden Punkt der waagerechten Ebene kann ein geworfener Körper auf zwei verschiedenen Wegen erreichen: entweder durch Steilwurf ($\alpha > 45^\circ$) oder durch Flachwurf ($\alpha < 45^\circ$) (Bild 44).

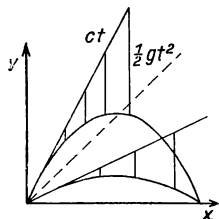


Bild 44. Steilwurf und Flachwurf

3. Kraft und Bewegung

a) Kraft und Masse

In der Statik ist das Gleichgewicht von Kräften untersucht worden. Nachdem wir nun in der Kinematik die Grundformen der Bewegung kennengelernt haben, gehen wir in der Dynamik dazu über, die Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung zu betrachten. Schon das Trägheitsgesetz sagt aus, daß eine Kraft die Ursache einer Bewegungsänderung ist. Durch die Kraft wird die Bewegung beschleunigt oder, wenn der Kraftvektor der Bewegungsrichtung entgegenwirkt, verzögert.

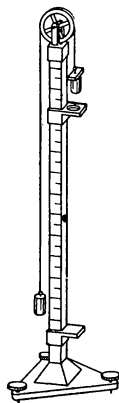


Bild 45
Atwoodsche
Fallmaschine

Mit der gleichen Muskelkraft kann man einen schweren Körper nur in langsamere Bewegung setzen als einen leichten. Die Körper setzen der bewegendenden Kraft verschiedenen Widerstand entgegen. Diesen Widerstand gegen die Bewegungsänderung schreiben wir dem Beharrungsvermögen zu und bezeichnen diesen Widerstand als *Masse*. Versuche an der Atwoodschen Fallmaschine oder am Wildermuthschen Reifenapparat bestätigen, daß die Beschleunigung der Kraft proportional ist.

Die *Atwoodsche Fallmaschine* (Bild 45) trägt an einem hohen Stativ mit Zentimeterteilung eine leichte Rolle. Über diese ist ein Faden gelegt und mit gleichen Massen beschwert. Als treibende Kraft dient ein kleines abhebbares Übergewicht. Durch einen verstellbaren Ring, durch den die Massen ungehindert hindurchgleiten, kann das Übergewicht nach verschiedenen Laufzeiten abgehoben und so die erzielte Endgeschwindigkeit gemessen werden.

Die drei Größen Kraft, Masse und Beschleunigung sind durch das Grundgesetz der Mechanik verbunden:

$$\begin{aligned} \text{Kraft} &= \text{Masse} \times \text{Beschleunigung} \\ P &= mb \end{aligned}$$

Bisher haben wir Kräfte durch die Dehnung von Schraubenfedern gemessen. Die Spannung der Feder ruft in dieser eine Gegenkraft hervor, die dem auf die Feder ausgeübten Zug gleich und entgegen-gerichtet ist. Wir bezeichnen diese Form der Kraftmessung als *statische Kraftmessung*.

Jetzt lernen wir die Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung kennen und kommen so zu einer zweiten Form der Kraftmessung, der *dynamischen Kraftmessung*.

Zu diesem Zweck müssen wir für den Proportionalitätsfaktor m in der Grundgleichung der Mechanik noch eine Maßeinheit festlegen.

Als Masseneinheit diene zunächst 1 cm³ Wasser von 4° C, heute eine in Paris aufbewahrte Normale, das Urkilogramm. Die Masseneinheit ist 1 Gramm (g), 1000 g ergeben 1 Kilogramm (kg), 1000 kg 1 Tonne (t).

Während das Gewicht eines Körpers vom Ort der Messung abhängig ist, ist die Masse unabhängig vom Ort. 1 g wiegt unter 45° Breite 1 p, am Nordpol etwas mehr, am Äquator weniger.

Massen werden in Kilogramm (kg) und Gramm (g) gemessen. Die Masse ist unabhängig vom Ort der Messung.

Im täglichen Leben und in der Technik werden die Bezeichnungen kg und g auch als Gewichtseinheiten verwendet, weil die übliche Form der Wägung mit der Hebelwaage ein Vergleichen von Massen ist. Nur die Gewichtsbestimmung mit der Federwaage ist eine Kraftmessung. Begrifflich sind aber Gewicht und Masse streng zu scheiden, und deshalb ist eine Unterscheidung auch durch verschiedene Benennung der Einheiten notwendig.

Aus der Grundgleichung folgt für das *Gewicht*:

$$G = mg$$

Hierbei bedeutet g die Schwerebeschleunigung.

Diese Gleichung führt zur dynamischen Kraftmessung und zur Festsetzung einer neuen Krafteinheit.

Die Kraft, die der Masse 1 g die Beschleunigung 1 cm s^{-2} erteilt, heißt 1 Dyn (dyn)¹

1 dyn ist die physikalische Einheit der Kraftmessung, im Gegensatz zu der technischen Einheit 1 kp, die wir bisher ausschließlich verwendet haben.

In der Physik führen wir alle Messungen auf drei Grundeinheiten zurück, auf die Längeneinheit cm, die Masseneinheit g und die Zeiteinheit s. Alle anderen Maße werden aus diesen abgeleitet. Um diese Ableitung sofort kenntlich zu machen, geben wir an, wie jede neue Einheit aus den Grundeinheiten aufgebaut ist, und nennen diese Angabe die neue Maßeinheit. Bei der Geschwindigkeit haben wir die Maßeinheit $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ oder cm s^{-1} schon benutzt, bei der Beschleunigung cm s^{-2} . Die physikalische Krafteinheit hat die Maßeinheit g cm s^{-2} .

Auf 1 Massengramm wirkt die Kraft (Gewicht!) $G = 1 \cdot 981 \text{ g cm s}^{-2}$. Soll die Beschleunigung, wie in unserer Definition des Dyn verlangt ist, nur 1 cm s^{-2} betragen, so muß man die treibende Kraft kleiner wählen als die Schwerkraft, und zwar darf sie nur $\frac{1}{981}$ der Kraft betragen, die ein Grammstück auf die Unterlage ausübt. Hier ist die gleiche Überlegung wie bei der Atwoodschen Fallmaschine anzustellen, bei der ein kleines Übergewicht eine große Masse in Bewegung setzt.

Das physikalische Kraftmaß ist eine sehr kleine Einheit, sie entspricht der Kraft, mit der etwa 1 Millipond (mp), genauer $\frac{1}{981} \text{ p}$, auf die Unterlage drückt. Der 10⁶fache Betrag von 1 dyn ist 1 Grobdyn oder 1 Newton².

Mißt man dagegen die Kraft technisch in kp, so ergibt sich aus der Grundgleichung $P = mb$ die Notwendigkeit, für die Masse eine neue Maßeinheit festzulegen. Die Masse ist, wenn man die

¹ dynamis, griech., Kraft.

² Benannt nach dem englischen Physiker *Newton*. Am 1. 1. 48 ist neben dem bisher in der Physik üblichen Zentimeter-Gramm-Sekunden-System (CGS) das Meter-Kilogramm-Sekunden-System (MKS) eingeführt worden. Die Krafteinheit ist hier 1 Newton = 10^6 dyn.

Kraft in kp und die Beschleunigung in ms^{-2} mißt, durch diese Wahl eindeutig bestimmt. Die Masse ist jetzt eine abgeleitete Einheit. Es ist $1 \text{ kp} = M \cdot 9,81 \text{ ms}^{-2}$. Damit die Grundgleichung erfüllt wird, müssen wir als technische Masseneinheit diejenige Masse setzen, die an einem Ort mit der Schwerebeschleunigung $9,81 \text{ ms}^{-2}$ das Gewicht $9,81 \text{ kp}$ hat, denn dann ist das M in unserer Gleichung $\frac{1}{9,81} \text{ kpms}^{-2}$, und die rechte Seite der Gleichung wird 1 kp .

Bei Messung der Kraft in kp ist die Masse in technischen Masseneinheiten zu setzen. Man erhält die Zahl der technischen Masseneinheiten (techn. ME), indem man das Gewicht G der bewegten Masse durch die Schwerebeschleunigung g dividiert.

$$\text{techn. ME} = \frac{G}{g} ; \quad 1 \text{ techn. ME} \triangleq 9,81 \text{ kp}$$

b) Arbeit und Leistung

Unter Arbeit versteht man in der Physik das Produkt aus Kraft und Weg. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Kraft längs des Weges konstant bleibt und infolge der Reibungswiderstände nur eine gleichförmige, keine beschleunigte Bewegung hervorruft.

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg}; \quad A = Ps$$

Bildet die Kraftrichtung mit der Wegrichtung einen Winkel α , so ist $A = Ps \cos \alpha$. Wenn z. B. ein Boot gezogen wird, dann ist die Zugkraft in zwei Komponenten zu zerlegen, auf die Vorwärtsbewegung des Bootes wirkt nur die Komponente in der Richtung der Bootsachse. Die dazu senkrechte Komponente würde das Boot zum Ufer treiben, wenn nicht durch die Steuerstellung eine Gegenkraft geschaffen würde, die diese Komponente aufhebt.

Der Physiker mißt die Arbeit in $\text{dyn} \times \text{cm}$ oder in $\text{Newton} \times \text{Meter}$.

$$1 \text{ dyn} \times 1 \text{ cm} = 1 \text{ erg}^1$$

¹ érgon, griech., das Werk, die Arbeit.

Das Erg ist ebenso wie das Dyn eine sehr kleine Einheit,

$$10^7 \text{ erg} = 1 \text{ Joule}^1; \quad 1 \text{ Newton} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ Joule}$$

Der Techniker mißt die Arbeit in Kilopondmeter (früher Meterkilogramm!)

$$1 \text{ kp} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ kpm}$$

Die in der Physik gewählte Definition der Arbeit weicht vom Arbeitsbegriff des täglichen Lebens etwas ab. Physikalisch bedeutet es keine Arbeit, wenn man ein Kilogrammstück mit gestrecktem Arm waagerecht bewegt, weil dabei die Kraft- und Wegrichtung aufeinander senkrecht stehen ($\cos 90^\circ = 0!$). Die mit dem Strecken des Arms verbundene Muskularbeit tritt physikalisch nicht in Erscheinung.

Die in der Zeiteinheit verrichtete Arbeit nennt man *Leistung* oder *Effekt*.

Physikalisch: $1 \frac{\text{erg}}{\text{s}}$ und $1 \frac{\text{Joule}}{\text{s}} = 1 \text{ Watt (W)}^2$

Technisch: $1 \frac{\text{kpm}}{\text{s}}$ und $75 \frac{\text{kpm}}{\text{s}} = 1 \text{ PS}$

Die Pferdestärke (PS) ist eine reine Rechengröße, als Dauerleistung erreicht ein Pferd $75 \frac{\text{kpm}}{\text{s}}$ nicht.

e) Physikalisches und technisches Maßsystem

<i>Grundeinheiten:</i>	physikalisch cm, g, s	technisch m, kp, s
<i>Abgeleitete Einheiten</i>		
Geschwindigkeit:	cm s^{-1}	m s^{-1} und km/h
Beschleunigung:	cm s^{-2}	m s^{-2}
Kraft:	1 dyn (cm g s^{-2}) 1 Newton = 10^5 dyn	—
Masse:	—	1 techn. ME $\hat{=}$ $9,81 \frac{\text{kp s}^2}{\text{m}}$

¹ Benannt nach dem engl. Physiker *Joule* (spr. Dschaul), 1818 bis 1889.

² Benannt nach *James Watt*, 1736 bis 1819, dem die Technik die Vervollkommnung der Dampfmaschine verdankt.

Arbeit:	1 erg = 1 dyn · 1 cm	1 kpm [kp · m]
	1 Joule = 10 ⁷ erg	
Leistung:	1 erg · s ⁻¹	1 kpm s ⁻¹
	1 Watt = 1 $\frac{\text{Joule}}{\text{s}}$	1 PS = 75 $\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$

Umrechnungen

1 kp = 981 000 dyn = 9,81 Großdyn; 1 dyn = $\frac{1}{981}$ p;
 1 Großdyn = $\frac{1}{9,81}$ kp.

1 kpm = 9,81 Joule; 1 Joule = 0,102 kpm $\approx \frac{1}{10}$ kpm

1 PS = 75 $\frac{\text{kpm}}{\text{s}}$ = 75 · 9,81 $\frac{\text{Joule}}{\text{s}}$ = 736 W

1 Kilowatt (kW) = 1000 · 10⁷ $\frac{\text{erg}}{\text{s}}$ = 1,36 PS

d) Wichte und Dichte

Gleich große Körper sind im allgemeinen verschieden schwer. Um Gewichte von Körpern bekannten Volumens berechnen zu können, ist die Kenntnis des Gewichts der Volumeneinheit notwendig.

Die *Wichte* eines Körpers (alte Bezeichnung: spezifisches Gewicht) ist das Verhältnis des Gewichts zum Volumen.

$$\text{Wichte} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Volumen}}; \quad \gamma = \frac{G}{V} \left[\frac{\text{p}}{\text{cm}^3} \right]$$

Die Dichte eines Körpers ist das Verhältnis der Masse zum Volumen.

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}; \quad \varrho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

Wichten in p/cm³ und Dichten in g/cm³ fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe

Platin	21,5	Marmor	2,8	Schwefel-	
				kohlenstoff	1,26
Gold	19,3	Fensterglas	2,6	Wasser	1,00
Blei	11,3	Ziegelstein	1,5	Benzol	0,88
Silber	10,5	Eis	0,92	Petroleum	0,80
Kupfer	8,9	Eichenholz	≈ 0,8	Alkohol	0,79
Eisen	7,8 ... 7,2	Fichtenholz	≈ 0,6	Benzin	0,69
Zink	7,1				
Aluminium	2,7				

Gase bei 0° und 760 Torr:

Luft	0,001293
Kohlendioxyd	0,001977
Sauerstoff	0,001429
Leuchtgas	0,0006
Wasserstoff	0,00009

Wichte und Dichte sind benannte Zahlen. Häufig verwendet man auch die unbenannte Wichtezahl bzw. Dichtezahl. Die Wichtezahl gibt an, wievielmals so schwer ein Stoff ist wie das gleiche Volumen Wasser, die Dichtezahl gibt an, wievielmals so groß die Masse eines Stoffes ist wie die des gleichen Volumens Wasser. Gasē werden häufig auf Luft als VerhāltnisgrōÙe bezogen.

e) Energie

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Die mechanische Energie hat zwei Formen, die Energie der Bewegung (kinetische Energie, Wucht des fallenden Gewichtes) und die Energie der Lage (potentielle Energie¹, gehobenes Gewicht, gespannte Feder).

$$\text{Energie der Bewegung: } Ps = \frac{1}{2} m v_t^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

Begründung: $P = mb; \quad v_t = v_0 + bt, \quad s = \frac{v_0 + v_t}{2} t$

$$Ps = mb \frac{v_0 + v_t}{2} t = m \left(\frac{v_t - v_0}{t} \right) \frac{v_t + v_0}{2} t = \frac{1}{2} m v_t^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

Die Wirkung der Kraft P längs des Weges s äußert sich in einer Steigerung der Bewegungsenergie. Die Abnahme der Bewegungsenergie gibt die vom Körper geleistete Arbeit.

$$\text{Energie der Lage: } E = mgh$$

Um ein Gewicht G in die Höhe h zu heben, ist die Arbeit $Gh = mgh$ nötig. Fällt der Körper aus dieser Höhe herab, so verwandelt sich die Lageenergie in Bewegungsenergie. $v = \sqrt{2gh}$, $v_0 = 0$.

$$Gh = mgh = \frac{1}{2} m \cdot 2gh = \frac{1}{2} m v^2$$

¹ potens, lat., mächtig, möglich.

Der Satz von der Erhaltung der mechanischen Energie ist von Robert *Mayer* und *Helmholtz* erweitert worden zum allgemeinen Satz von der *Erhaltung der Energie*:

Alle Vorgänge in der Natur sind Energieumwandlungen. Bei diesen bleibt die Summe der vorhandenen Energiewerte konstant. Die Umwandlung geschieht nach festen Äquivalenten¹.

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{\quad} 1 \text{ Watt} \xleftarrow{\quad} \\ \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ 0,24 \text{ cal s}^{-1} \longleftrightarrow \frac{1}{9,81} \text{ kpm s}^{-1} \end{array}$$

f) Impuls und Stoß

Wirkt eine konstante Kraft t Sekunden auf einen Körper ein, so ist, wenn der Körper vorher in Ruhe war,

$$Pt = mbt = mv \quad (v = 0 + bt).$$

Das Produkt Pt heißt *Kraftstoß* oder *Antrieb* und dient als Maß der Kraftwirkung, mv heißt *Bewegungsgröße* oder *Impuls*.

Ist die Kraft veränderlich, so ist $\Sigma P \cdot \Delta t = \Sigma m \Delta v = m \Sigma \Delta v = mv$, weil $\Sigma \Delta v = v$ ist.

Wirkt eine Kraft auf einen Körper (ohne Reibung), so ist der Kraftstoß gleich der Änderung des Impulses.

$$\Sigma P \Delta t = m(v_1 - v_0)$$

Die Impulsgleichung wird meist bei Kraftäußerungen von kurzer Zeitdauer angewendet.

Jeder *Stoß* ruft als Reaktionskraft einen *Rückstoß* hervor. Diese beiden Impulse sind gleich.

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

Die Geschwindigkeiten verhalten sich umgekehrt wie die Massen.

Zentraler Stoß unelastischer Kugeln

Zwei unelastische Kugeln haben gleichsinnige Geschwindigkeiten v_1 und v_2 , die mittlere Geschwindigkeit nach dem Stoß sei v_m , dann ist

$$m_1(v_1 - v_m) = m_2(v_m - v_2); \quad v_m = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

¹ aequus, lat., gleich; valēre, lat., wert sein, also nach festen Umrechnungswerten.

Zentraler Stoß elastischer Kugeln

Bei unelastischen Kugeln bleibt nach dem Stoß die Verformung bestehen, bei elastischen Kugeln führt die Wiederherstellung der Form zu einem zweiten Impuls in umgekehrtem Sinne. Die Geschwindigkeiten nach dem elastischen Stoß seien v_3 und v_4 , dann ist $(v_m - v_3) m_1 = (v_4 - v_m) m_2$ für den zweiten Teil des Stoßvorgangs und $(v_1 - v_m) m_1 = (v_m - v_2) m_2$ für den ersten Teil.

Diese beiden Impulse sind gleich: $v_1 - v_m = v_m - v_3$; $v_4 - v_m = v_m - v_2$

$$v_3 = 2 v_m - v_1 = 2 \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - v_1$$

$$v_4 = 2 v_m - v_2 = 2 \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - v_2$$

Schräger elastischer Stoß

Durch Zerlegen der schrägen Stoßkraft in eine Komponente längs der Wand und eine zweite senkrecht zur Wand ergibt sich das

Reflexionsgesetz:

Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.

Bild 46 zeigt die Reflexion einer elastischen Kugel an einer festen Wand. Der Geschwindigkeitsvektor v der schräg auftreffenden Kugel läßt sich in zwei Komponenten v_x senkrecht zur Wand und v_y längs der Wand zerlegen. Beim Auftreffen auf die Wand kehrt sich die Komponente v_x um in $-v_x$, während v_y unverändert bleibt. $-v_x$ und v_y ergeben als Resultierende die Geschwindigkeit und die Richtung der zurückprallenden Kugel. Die Senkrechte im Auftreffpunkt nennt man das Einfallslot. Die Einfallrichtung bildet mit dem Einfallslot den gleichen Winkel wie dieses mit der Reflexionsrichtung.

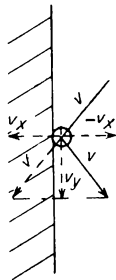


Bild 46
Schräger Stoß

Bestätigung der Stoßgesetze an dem Stoßapparat, Bild 47.

Er besteht aus einer Reihe bifilar¹ aufgehängter elastischer Kugeln. Hebt man die erste Kugel und läßt sie gegen die zweite der Reihe

¹ bis, lat., zweimal, filum, lat., Faden, bifilar = zweifädig.

stoßen, so pflanzt sich der Impuls durch die Reihe fort, die letzte Kugel wird abgeschleudert und erreicht die gleiche Höhe, die die erste beim Anheben gehabt hat.

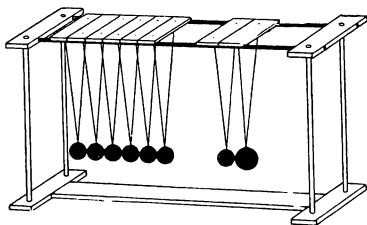


Bild 47. Stoßapparat

Bei zwei verschieden schweren Kugeln verhalten sich die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Massen.

4. Drehbewegung

a) Kreisbewegung

Setzt man eine Kreisscheibe in gleichmäßige Umdrehung, so wächst der Drehwinkel φ bei der Bewegung gleichmäßig, die Bahngeschwindigkeit eines Punktes der Scheibe hängt aber auch von seinem Abstand von der Drehachse ab. Bei der gleichförmigen Drehbewegung entspricht der Begriff der Winkelgeschwindigkeit dem Geschwindigkeitsbegriff der gleichförmig geradlinigen Bewegung. Man mißt den Drehwinkel meist in Bogenmaß, d. h. durch die Länge des Bogens auf dem Kreis mit dem Radius 1, der zu dem Zentriwinkel φ gehört, und erklärt die Winkelgeschwindigkeit ω als die Bahngeschwindigkeit eines Punktes auf dem Einheitskreis.

Eine volle Umdrehung erfolgt in der Zeit T , der zugehörige Weg auf dem Einheitskreis ist 2π . Dann ist die

$$\text{Winkelgeschwindigkeit } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Macht die Kreisscheibe in der Sekunde ν Umdrehungen, so ist

$$T = \frac{1}{\nu} \text{ und } \nu = \frac{1}{T}.$$

ν heißt die *Frequenz*, T die *Schwingungsdauer*.

Für einen Punkt der Kreisscheibe im Abstand r von der Drehachse ist die

$$\text{Bahngeschwindigkeit } v = r\omega = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi\nu r.$$

Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung ist ω konstant, für eine ungleichförmige Kreisbewegung, z. B. eine rotierende Scheibe mit

Reibung und Luftwiderstand, ist die Winkelgeschwindigkeit veränderlich, im Beispiel gleichmäßig abnehmend.

Winkelbeschleunigung (Winkelverzögerung)

$$\beta = \frac{\omega_t - \omega_0}{t - t_0} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}.$$

Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung bleibt auch die Bahngeschwindigkeit jedes Punktes dem Betrag nach gleich, aber sie ändert ständig ihre Richtung. Die Richtungsänderung kann nur durch eine Kraft bedingt sein. Diese nach dem Zentrum der Kreisbewegung hin gerichtete Kraft heißt die

$$\text{Zentripetalkraft. } Z = \frac{m v^2}{r}$$

Begründung. Eine Kreisbewegung kann man sich in zwei Bewegungen zerlegt denken, den Weg in der Tangentenrichtung infolge der gleichförmigen Bewegung und den Weg zum Anziehungszentrum (Bild 48). Eine konstante Anziehungskraft bringt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung hervor. Weg in Tangentenrichtung: vt , Weg zum Bahnzentrum: $\frac{1}{2} bt^2$.

Nach Pythagoras ist

$$r^2 + (vt)^2 = \left(r + \frac{b}{2} t^2\right)^2; \quad v^2 = rb + \frac{b^2 t^2}{4}.$$

Für kleine t kann das letzte Glied vernachlässigt werden.

$$b = \frac{v^2}{r} \quad \text{Zentralbeschleunigung}$$

$$Z = mb = \frac{m v^2}{r} = m r \omega^2$$

Dem Zwang, aus der geradlinigen Bahn in die Kreisbahn überzugehen, setzt der Körper seinen Trägheitswiderstand entgegen, dieser wird als Fliehkraft F' (oder Zentrifugalkraft Z) bezeichnet (Bild 49). Die Fliehkräfte sind, wie die Formel $Z = m r \omega^2$ erkennen läßt, um so stärker, je größer der Abstand von der Drehachse ist.

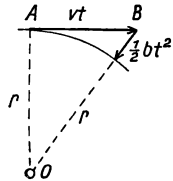


Bild 48. Zentripetalkraft

Die Fliehkraft ist der Zentripetalkraft entgegengesetzt gleich.

Versuche mit der Schwungmaschine: Elastischer Reifen (Erdabplattung!) (Bild 50a).

Der kreisförmige elastische Reifen verformt sich bei rascher Rotation zu einer Ellipse, deren kleine Achse in die Drehachse fällt.

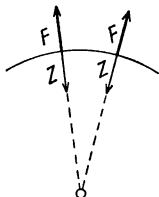


Bild 49

Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft

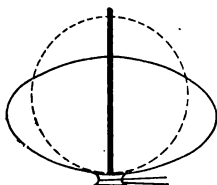
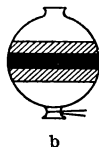


Bild 50. Wirkung der Fliehkräfte



b

Kugelgefäß mit Quecksilber und gefärbtem Wasser (Bild 50 b). Quecksilber hat eine größere Wichte als Wasser, deshalb wirken auf das Quecksilber stärkere Fliehkräfte, es lagert sich im äußersten Ring des Kugelgefäßes an, den inneren Ring nimmt das Wasser ein.

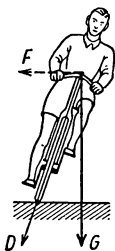


Bild 51. Radfahrer in der Kurve

Anwendung der Fliehkraft: Zentrifugen, Zentrifugalregulator der Dampfmaschine, Wäsche-schleuder.

Schutz gegen Fliehkräfte: Kurvenüberhöhung der Eisenbahn, Neigung des Fahrrades in der Kurve (Bild 51).

Die Neigung des Rades wird durch das Zusammenwirken der waagerechten Fliehkraft F und des lotrechten Gewichtes G bestimmt. Beide Kräfte ergeben eine Resultierende D , die in die Ebene des Rades fällt.

b) Drehmoment und Trägheitsmoment

Bei der Drehbewegung hängt die Wirkung der in tangentialer Richtung liegenden Kraft wesentlich von der Entfernung vom Drehpunkt ab. Am Radkranz läßt sich ein Schwungrad leichter in Bewegung setzen als an den Speichen in Achsennähe. Für die erzielte Beschleunigung ist nicht allein die Kraft, sondern das Drehmoment maßgebend (Bild 52).

$$\text{Drehmoment } M = Pr$$

Drehmomente lassen sich ebenfalls durch Vektoren darstellen (Bild 53). Der *Momentenvektor* steht im Drehpunkt senkrecht zur Momentenebene und zeigt nach der Seite, von der aus gesehen die Drehung dem Uhrzeigersinn entgegengesetzt ist.

Nach dem Kraftwirkungsgesetz ist $P = mb$. Für eine Drehbewegung ist die Bahnbeschleunigung $b = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta(r\omega)}{\Delta t} = r \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$

$= r\beta$, also das Drehmoment

$M = Pr = m r \beta r = m r^2 \beta$. Ver-

gleicht man die geradlinige Be-

wegung (Grundgesetz $P = mb$)

mit der Drehbewegung ($M = Pr$

$= m r^2 \beta$), so sieht man, daß die

Gleichung für die Drehbewegung

aus der für die geradlinige Be-

wegung hervorgeht, indem man

ersetzt: P durch M , m durch

$m r^2$, b durch β . Man bezeichnet den Ausdruck $m r^2 = J$ als das

Trägheitsmoment in Analogie zur trägen Masse m bei geradliniger

Bewegung. Für ein System von Massenpunkten gilt:

$$\Sigma Pr = \Sigma m r^2 \beta = J \beta$$

$J = \Sigma m r^2$ heißt *Trägheitsmoment* oder *Drehmasse*.

Da das Trägheitsmoment von der Massenverteilung abhängt, ändert sich bei einer Verschiebung der Drehachse auch der Wert des Trägheitsmomentes.

Für parallele Achsen gilt der Satz von *Steiner*: Das Trägheitsmoment für eine willkürliche Achse setzt sich aus zwei Trägheitsmomenten zusammen, dem Trägheitsmoment $M d^2$, das vorhanden wäre, wenn die gesamte Masse M im Schwerpunkt läge und dieser den Abstand d von der Drehachse hätte, und dem Trägheitsmoment in bezug auf die parallele Achse durch den Schwerpunkt.

$$\Sigma m r^2 = \Sigma m r_1^2 + M d^2$$

Die Berechnung von Trägheitsmomenten ist eine Aufgabe der Integralrechnung, über die experimentelle Bestimmung siehe physikalisches Pendel.

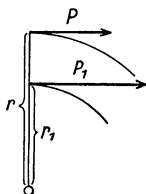


Bild 52. Drehmoment

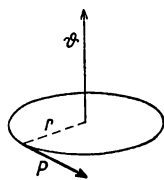


Bild 53. Vektor des Drehmoments

Vergleich der fortschreitenden und der drehenden Bewegung

Fortschreitende Bewegung (Translation)	Drehbewegung (Rotation)
Die Bahnen der Massenteilchen sind parallele Strecken	Die Bahnen der Massenteilchen sind konzentrische Kreise
Geschwindigkeit $v = \frac{ds}{dt}$	Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
Beschleunigung $b = \frac{dv}{dt}$	Winkelbeschleunigung $\beta = \frac{d\omega}{dt}$
Masse $m = \sum m_i$	Trägheitsmoment $J = \sum m_i r_i^2$
Kraft P	Drehmoment $M = Pr$
Kraftwirkungsgesetz $P = mb$	Kraftwirkungsgesetz $M = J\beta$
Bewegungsenergie $E = \frac{1}{2}mv^2$	Bewegungsenergie $E = \frac{1}{2}J\omega^2$

Die allgemeine Bewegung eines Körpers setzt sich aus einer fortschreitenden Bewegung und einer Drehbewegung zusammen. Die im Schwerpunkt angreifende Kraft ergibt eine fortschreitende Bewegung, das resultierende Drehmoment eine drehende Bewegung. Das Ergebnis ist im allgemeinen eine Schraubung.

c) Allgemeine Zentralbewegung

Unter einer Zentralbewegung versteht man die Bewegung eines Körpers auf einer ebenen Bahn unter dem Einfluß einer konstanten, von einem festen Punkt ausgehenden Kraft, der Zentralkraft. Für jede Zentralbewegung gilt der

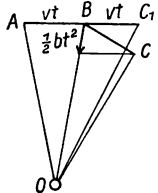


Bild 54. Flächensatz

Flächensatz: Die Verbindungslinie Körper—Kraftzentrum überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Bild 54).

Begründung: $\triangle ABO = \triangle BC_1O$, weil $AB = BC_1$ und O gemeinsame Spitze ist. $\triangle OBC_1 = \triangle OBC$, weil gemeinsame Grundlinie und Höhe, folglich $\triangle ABO = \triangle BCO$. Läßt man die Dreiecke beliebig klein werden, so geht der Sehnenzug $ABC \dots$ in die gekrümmte Bahnkurve über.

Die Planeten führen eine Zentralbewegung aus, Anziehungszentrum ist die Sonne.

Für die Planeten gelten die *Keplerschen Gesetze*:

1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht (1609).
2. Der Fahrstrahl Sonne—Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Flächensatz, 1609).
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der mittleren Entfernungen von der Sonne.

$$T_1^2 : T_2^2 = r_1^3 : r_2^3$$

Folgerung aus dem Flächensatz: In Sonnennähe rückt die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne schneller vor als in Sonnenferne. In den Wintermonaten befindet sich die Erde in Sonnennähe (Bild 55). Das Nordwinterhalbjahr ist 7 Tage kürzer als das Sommerhalbjahr. Aus dem 3. Keplerschen Gesetz, das rein empirisch aus einer Fülle von Einzelbeobachtungen gewonnen worden ist, zog *Newton* die physikalischen Folgerungen. Er leitete daraus 1680 das *Gravitationsgesetz* ab: Jeder Körper zieht jeden anderen mit einer Kraft an, die proportional ist den Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung.

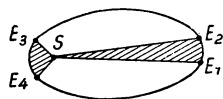


Bild 55. Aphel und Perihel

$$\text{Massenanziehung } Z = f \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ [dyn]}$$

$$f = 6,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cm}^3}{\text{g s}^2} \text{ Gravitationskonstante}$$

f konnte durch die Messung der Anziehungskraft zwischen zwei Bleiklötzen bestimmt werden.

Begründung zum Gravitationsgesetz: Zentripetalkraft

$$Z = \frac{mv^2}{r} = mr \left(\frac{v}{r} \right)^2 = mr \omega^2 = mr \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = \left(\frac{4\pi^2}{T^2} r^3 \right) \frac{m}{r^2}.$$

Der Klammerausdruck ist nach dem 3. Keplerschen Gesetz konstant für einen bestimmten Planeten; also ist die Anziehungskraft proportional der Masse und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung.

An dem System Erde—Mond bestätigte *Newton* das Gesetz und zeigte, daß der Mond durch die Erdanziehung in seine Bahn gezwungen wird.

Aus dem Gravitationsgesetz folgt für das Gewicht eines Körpers von der Masse m auf der Erdoberfläche (E Erdmasse, R Erdradius):

$$G = mg = f \frac{mE}{R^2} \text{ und daraus für die Erdmasse:}$$

$$E = \frac{gR^2}{f} = 5,9 \cdot 10^{24} \text{ kg } (\approx 6000 \text{ Trillionen Tonnen})$$

Die Erddichte $\varrho_E = \frac{E}{V}$ beträgt danach $\varrho_E = 5,5 \text{ g/cm}^3$. Da die Gesteinshülle eine Dichte von $2,5 \dots 3$ hat, muß der Erdkern eine Dichte von $7 \dots 8$ haben (Nife = Nickel-Eisenkern!).

Infolge der Erdrotation wird die Fallbeschleunigung vermindert um die Komponente der Fliehkraft, die in die Lotrichtung fällt. Die Fliehkraft selbst liegt in der Ebene des Breitenkreises. Ein Äquatorpunkt hat die Bahngeschwindigkeit $v_0 = 463 \text{ m/s}$.

Am Äquator ist $b_0 = \frac{v_0^2}{R} = R\omega^2 = 3,37 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

In der Breite φ tritt bei der Berechnung der Fliehkraft an die Stelle des Erdradius R der Breitenkreisradius $R \cos \varphi$, also ist $b_\varphi = 3,37 \cos \varphi$. Diese Beschleunigung zerlegen wir in eine Komponente b_y lotrecht zur Erdoberfläche und eine Tangentialkomponente b_x . $b_y = b_\varphi \cos \varphi = 3,37 \cos^2 \varphi$. In der Breite φ ist also die Fallbeschleunigung $g_\varphi = g' - 3,37 \cos^2 \varphi$, wobei g' die Fallbeschleunigung bei ruhender Erde bedeutet, ferner ist $g_0 = g' - 3,37$. Durch Subtraktion beider Gleichungen fällt g' heraus:

$$g_\varphi - g_0 = 3,37 - 3,37 \cos^2 \varphi; \quad g_\varphi = g_0 + 3,37 \sin^2 \varphi$$

d) Kreiselbewegung

Eine freie Achse ist eine Drehachse, in der die Zentrifugalkräfte sich aufheben. Die freie Achse geht immer durch den Schwerpunkt. *Versuch* an der Schwungmaschine: Kette am Faden (Bild 56). Setzt man den Faden mit der lotrecht hängenden Kette in Umdrehung, so hebt sich die Kette entgegen der Schwerkraft und nimmt Kreisform an, weil in dieser Lage die Fliehkräfte symmetrisch auftreten. Sie heben sich gegenseitig auf.

Ein frei rotierender Körper sucht sich so einzustellen, daß die Fliehkräfte sich aufheben.

Ein Kreisel ist ein Drehkörper, der um eine freie Achse rotiert, er behält die Richtung der freien Achse so lange bei, wie keine Kraft auf ihn wirkt. Auf eine ablenkende Kraft reagiert die Kreiselachse, indem sie senkrecht zur Kraft-

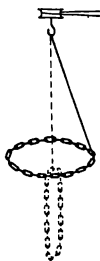


Bild 56
Rotierende Kette

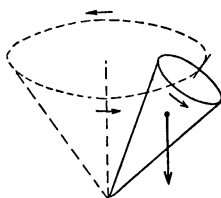


Bild 57
Präzession des Kreisels

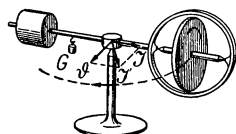


Bild 58
Fesselscher Apparat

richtung ausweicht. Dabei beschreibt die Kreiselachse einen Kegelmantel. Diese Ausweichbewegung der Kreiselachse heißt *Präzession* (Bild 57).

Versuch mit dem Fesselschen Apparat (Bild 58).

Der rotierende Kreisel ergibt den Impulsvektor $\mathfrak{S}$, das Drehmoment des Anhängengewichtes G den Momentenvektor $\mathfrak{D}$. $\mathfrak{D}$ steht auf der Zeichenebene senkrecht, im Schrägbild erscheint er geneigt. Vektoraddition ergibt $\mathfrak{S}'$, die neue Lage der Drehachse. Hier wiederholt sich der gleiche Vorgang und führt zu einer Drehung der Achse im Uhrzeigersinn.

Anwendung: Kreiselkompaß von Anschütz (Bild 59).

Ein Elektromotor von etwa 14 cm Durchmesser hat eine Drehzahl 300 je Sekunde. Der Motor ist mit einem Schwimmer verbunden, der im Quecksilber des Kompaßkessels schwimmt. Infolge der tiefen Lage des Schwerpunktes wird die Kreiselachse immer waagrecht gestellt und weicht dem Zwang, ihre Achsenrichtung zu verändern, so lange aus, bis die Nordrichtung erreicht ist. In dem Augenblick hört das Kippmoment auf.

Auch die *Erde* ist ein Kreisel (Bild 60), die Erdachse führt infolge des Drehmomentes, das die Sonne auf den Äquatorwulst ausübt,

eine *Präzessionsbewegung* aus. Die Achse beschreibt in 26 000 Jahren einen Kegelmantel vom halben Öffnungswinkel $23\frac{1}{2}^\circ$.

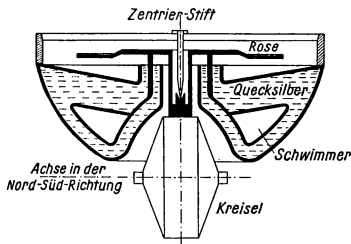


Bild 59. Kreiselkompaß

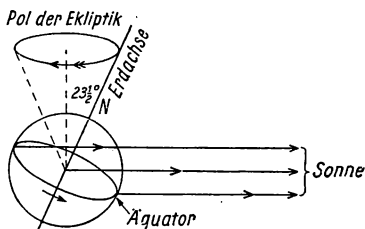


Bild 60. Die Erde als Kreisel

Der Mond bewirkt eine Störung des Erdkreisels, die *Nutation*, die sich als periodische Schwankung der Präzession überlagert.

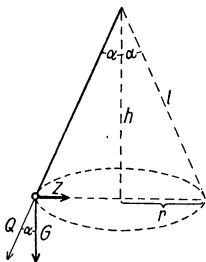


Bild 61. Kegelpendel

e) Harmonische Schwingungen

1. *Kegelpendel*. Bei einem Kegelpendel (Bild 61) bewegt sich der Pendelkörper auf einem horizontalen Kreise; der Winkel α , den das Pendel mit der Lotrechten durch den Aufhängepunkt bildet, ist konstant. Das an der Pendelkugel angreifende Gewicht G läßt sich in zwei Komponenten zerlegen, die Zentripetalkraft Z zum Mittelpunkt des Grundkreises und die Kraft Q in Richtung des Fadens.

$$Z : G = r : h; \quad Z = \frac{r}{h} G; \quad Z = \frac{mv^2}{r} = mr \frac{4\pi^2}{T^2}$$

Durch Gleichsetzen ergibt sich $\frac{r}{h} mg = \frac{4\pi^2 rm}{T^2}$; $\frac{1}{h} g = \frac{4\pi^2}{T^2}$;

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h}{g}}. \quad \text{Für kleine Öffnungswinkel ist } h \approx l.$$

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

2. Die Parallelprojektion eines schwingenden Kegelpendels auf eine vertikale Ebene zeigt als Schattenbild eine *harmonische Schwingung* (Bild 62). Die Gesetze der harmonischen Schwingung (Bild 63) lassen sich aus der Kreisbewegung ableiten: $P = Z \cos \varphi$
 $= Z \frac{x}{r} = kx$; $k = \frac{Z}{r}$ ist konstant.

Eine harmonische Schwingung ist dadurch charakterisiert, daß die zur Ruhelage treibende Kraft dem Abstand von der Ruhelage pro-

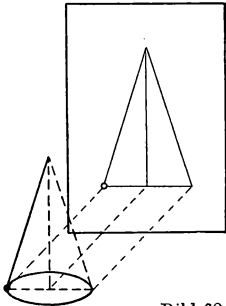


Bild 62

Harmonische Schwingung

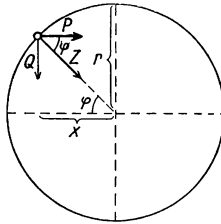


Bild 63

Die Kraft bei der harmonischen Schwingung

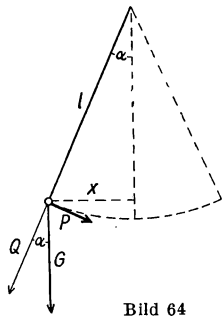


Bild 64

Ebenes Fadenpendel

portional ist. Die Schwingung stellt eine sich wiederholende Umsetzung von Lageenergie in kinetische Energie dar. In den Umkehrpunkten ist die Geschwindigkeit Null, der Durchgang durch die Ruhelage geschieht mit maximaler Geschwindigkeit. Schwingungsdauer der harmonischen Schwingung:

$$\text{Aus } Z = \frac{4\pi^2 m r}{T^2} \text{ (vgl. c) folgt: } T = 2\pi \sqrt{m \frac{r}{Z}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

3. *Ebenes Pendel.* a) *Mathematisches Pendel.* Die Schwingung eines Fadenpendels (Bild 64) kann bei kleiner Schwingungsweite ($< 5^\circ$) als harmonische Schwingung betrachtet werden.

$$P : G = \sin \alpha = x : l; \quad P = \frac{mgx}{l} = kx$$

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

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

Hierbei ist zu beachten, daß die Schwingungsdauer T die Zeit eines Hin- und Hergangs bedeutet.

Pendelgesetze

1. Die Schwingungsdauer ist unabhängig von der Masse des Pendelkörpers.
2. Für kleine Schwingungen ist die Schwingungsdauer unabhängig von der Schwingungsweite.
3. Die Schwingungsdauer wächst bei kleinen Ausschlägen mit der Quadratwurzel der Pendellänge.

Anwendungen. Das Sekundenpendel braucht für einen Hin- oder Hergang 1 Sekunde. $T = 2$ Sekunden,

$$l = 99,4 \text{ cm}.$$

Messung der Fallbeschleunigung mit dem Pendel: T und l werden gemessen, g daraus berechnet.

Foucaults Pendelversuch zum Nachweis der Erddrehung beruht auf der Eigenschaft der Pendelebene, ihre Richtung beizubehalten, wenn sich die Aufhängevorrichtung dreht (freie Achse senkrecht zur Schwingungsebene) (Bild 65).

b) Physisches Pendel (Bild 66). Jeder um die stabile Gleichgewichtslage schwingende starre Körper stellt ein physisches

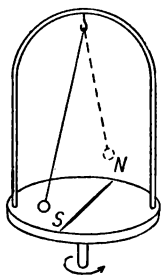


Bild 65. Erklärung des Foucaultschen Pendelversuchs

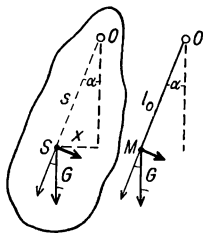


Bild 66. Physisches Pendel

Pendel dar. Bei kleinen Schwingungsweiten kann diese Bewegung als harmonische Schwingung aufgefaßt werden. Beim physischen Pendel hängt die Schwingungsdauer von der Massenverteilung ab. Die näher am Drehpunkt liegenden Teilchen wirken

beschleunigend, die entfernten verlangsamend. Dazwischen muß ein Punkt liegen, der genau so schwingt wie ein gleich langes Fadenpendel. Dieser Punkt heißt *Schwingungsmittelpunkt*, sein Abstand vom Drehpunkt *reduzierte Pendellänge*. Im Schwerpunkt S greift das Gewicht G an, das Drehmoment ist $M = Gx = Gs \sin \alpha$, die Winkelbeschleunigung $\beta = \frac{M}{J} = \frac{mgs \sin \alpha}{J}$.

Auf das Fadenpendel gleicher Schwingungsdauer wirkt die treibende Kraft $mg \sin \alpha$, das Drehmoment ist $mg l_0 \sin \alpha$, das Trägheitsmoment ist, da nur die Masse m im Abstand l_0 vorhanden ist, $J = ml_0^2$.

$$\beta = \frac{mg l_0 \sin \alpha}{ml_0^2} = \frac{g \sin \alpha}{l_0}$$

Durch Gleichsetzen der β -Werte ergibt sich:

$$\frac{mgs \sin \alpha}{J} = \frac{g \sin \alpha}{l_0}; \quad l_0 = \frac{J}{ms}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}}$$

Schwingungsdauer des physischen Pendels $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgs}}$

mgs ist das Drehmoment, das das physische Pendel erfahren würde, wenn es in waagerechte Lage gebracht würde. Dieses maximale Drehmoment bezeichnet man mit $D_{\max}$ und erhält so

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D_{\max}}}$$

Anwendung. Das Metronom dient als Taktgeber in der Musik, es ist ein physisches Pendel mit zwei schwingenden Massen (Bild 67). Durch Verschieben des Laufgewichts wird das Trägheitsmoment geändert und damit die Schwingungsdauer. Pendel und Laufgewicht bilden die schwingenden Massen. Schiebt man das Laufgewicht nach oben, so wird sein Abstand vom Drehpunkt größer, das Trägheitsmoment ebenfalls. Zugleich rückt der Schwerpunkt des Systems näher an den Drehpunkt. Der Schwerpunktsabstand s wird kleiner. Dieser steht aber in der Formel für die Schwingungsdauer im Nenner. Das Metronom schwingt langsamer.

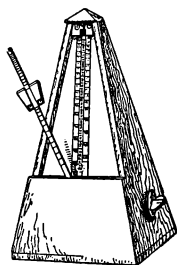


Bild 67. Metronom

Experimentelle *Bestimmung des Trägheitsmomentes* durch Pendelschwingungen. Gemessen wird T , der Schwerpunktsabstand s vom Drehpunkt und das Gewicht. $J = \frac{T^2}{4\pi^2} D_{\max}$.

B. Flüssigkeiten

1. Hydrostatik

a) Allgemeine Eigenschaften der Flüssigkeiten

Flüssigkeiten unterscheiden sich von den festen Körpern durch die leichte Beweglichkeit der Teilchen. Flüssigkeiten haben keine Formelastizität, sondern nur Volumenelastizität, sie passen sich jeder Gefäßform an, sind aber beinahe unzusammendrückbar (inkompressibel). Der Flüssigkeitsspiegel stellt sich immer senkrecht zur Schwerkraft ein, bildet eine Niveaulfläche, die bei kleinen Flächen als eben gelten kann, bei großen Flächen (Meer) den Teil einer Kugeloberfläche bildet.

Unter dem Druck versteht man die auf die Flächeneinheit ausgeübte Kraft.

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \left[\frac{\text{p}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{oder} \quad \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$$

Die äußerst geringe Zusammendrückbarkeit von Flüssigkeiten zeigt das *Piezometer* (Bild 68). In dem Gefäß P befindet sich luftfrei gemachtes Wasser. Der Kapillaransatz des Gefäßes

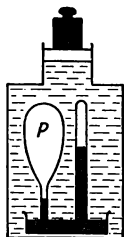


Bild 68
Piezometer

taucht in Quecksilber. Das äußere Gefäß ist ebenfalls mit Wasser gefüllt und durch einen beweglichen Kolben verschlossen. Ein starker äußerer Druck pflanzt sich durch die Flüssigkeit fort. Die Volumenverkleinerung im Piezometer zeigt sich in einem Steigen des Quecksilbers im Kapillarrohr. Die Kompressionszahl gibt die Volumenverminderung von 1 cm^3 bei dem Druck 1 kp/cm^2 an, sie beträgt für Wasser $50 \cdot 10^{-6}$, Alkohol $120 \cdot 10^{-6}$, Quecksilber $4 \cdot 10^{-6}$ des Anfangsvolumens. *Flüssigkeiten können daher als nahezu inkompressibel betrachtet werden.*

Allseitige Druckfortpflanzung

Grundversuch. Der Spritzkolben (Bild 69) ist mit engen Öffnungen versehen. Drückt man die Flüssigkeit von oben, so spritzt das Wasser nach allen Seiten gleichmäßig.

Messung. Der Apparat von *Recknagel* (Bild 70) bestätigt die allseitige Druckfortpflanzung. Dabei ist $P_1 : F_1 = P_2 : F_2$. Gleiche Flächen unterliegen gleichem Druck.

$$P_1 : P_2 = F_1 : F_2$$

Anwendung. In der hydraulischen Presse öffnet sich beim Anheben des Pumpenhebels (Bild 71) das Bodenventil und läßt neue Flüssigkeit einströmen. Im rechten Zylinder herrscht Überdruck, das Zwischenventil ist geschlossen. Beim Niederdrücken des Pumpen-

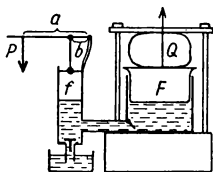
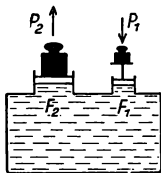
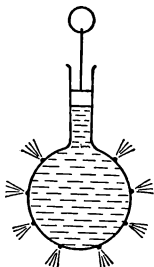


Bild 69. Spritzkolben Bild 70. Apparat nach *Recknagel* Bild 71. Hydraulische Presse

hebels drückt der Kolben f , das Bodenventil schließt sich, der Überdruck am Zylinder öffnet das Zwischenventil und drückt Flüssigkeit in den rechten Zylinder.

$$Q = \frac{a}{b} \frac{F}{f} P$$

Bild 72 zeigt die technische Ausführung eines Wagenhebers.

b) Bodendruck und Seitendruck

Der Bodendruck ist gleich dem Gewicht der über der Grundfläche lastenden Flüssigkeitssäule.

$$\text{Hydrostatischer Druck } p = h \gamma \text{ (} \gamma \text{ Wichte)}$$

Der *Pascalsche Apparat* (Bild 73) zeigt, daß die Kraft auf den Boden nur abhängt von der Höhe der Flüssigkeitssäule und der

Bodenfläche, nicht aber von der Form des Gefäßes und der Wassermenge, die zur Herstellung der Flüssigkeitssäule notwendig ist.

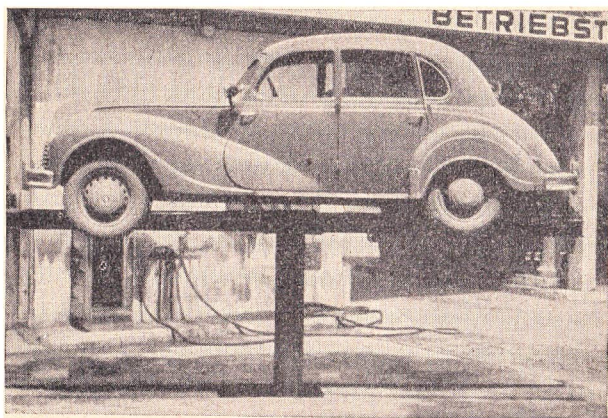


Bild 72. Wagenheber

Die verschieden geformten Gefäße haben die gleichen Bodenflächen; die Gefäße werden unten durch einen Metalldeckel verschlossen, der durch den unbelasteten Waagearm gegen das Gefäß

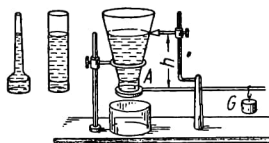


Bild 73. Pascalscher Bodendruckapparat

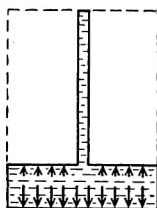


Bild 74. Hydrostatisches Paradoxon

gedrückt wird. Bei Erreichen einer bestimmten Flüssigkeitshöhe löst sich der Bodenverschluß und läßt das Wasser ausfließen. Als *hydrostatisches Paradoxon* bezeichnet man die Tatsache, daß die kleine Flüssigkeitsmenge im Ansatzrohr von entscheidendem Einfluß ist auf die gesamte Kraft auf die Bodenfläche (Bild 74).

Seitendruck $p = h \gamma$

Hierbei ist h der senkrechte Abstand des Flächenschwerpunktes von der Flüssigkeitsoberfläche. Zum Nachweis dient die Hartlsche Druckdose (Bild 75). Die Dose ist um ein Gelenk drehbar.

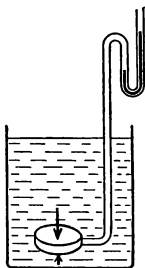


Bild 75. Hartlsche Druckdose

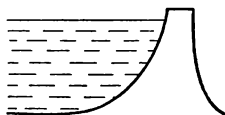


Bild 76. Staumauer

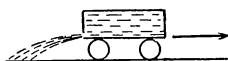


Bild 77. Reaktionskraft

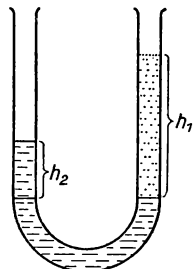


Bild 78. Bestimmung der Wichte im U-Rohr

Der Manometerstand (vgl. S. 65) hängt nur von der Eintauchtiefe ab, nicht vom Neigungswinkel der Dose.

Bei Sperrmauern (Bild 76) muß dem mit der Tiefe zunehmenden Seitendruck Rechnung getragen werden, indem man die Mauer nach der Tiefe zu verstärkt.

Seitlich ausfließende Flüssigkeit ergibt als Reaktionskraft (Bild 77) einen entsprechenden Druck auf die Gegenwand. Der Wagen bewegt sich in der Richtung des Pfeils.

Kommunizierende Gefäße. In verbundenen Gefäßen steht die Flüssigkeit überall gleich hoch. Der Querschnitt und die Menge sind dabei ohne Einfluß.

Begründung. Ein Querschnitt des Verbindungsrohres der beiden Gefäße erfährt von beiden Seiten her entgegengesetzt gleiche Seitendrücke, andernfalls würde eine Verschiebung der Flüssigkeit stattfinden. Gleiche Seitendrücke sind aber nur möglich, wenn die Flüssigkeitshöhen in beiden Gefäßen die gleichen sind.

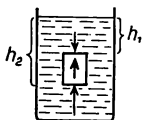
Anwendungen: Kanalwaage, Wasserstandsglas.

Flüssigkeiten verschiedener Wichte stellen sich so ein, daß die Flüssigkeitshöhen sich umgekehrt verhalten wie die Wichten (Bild 78).

$$F h_1 \gamma_1 = F h_2 \gamma_2 \quad \text{oder} \quad \gamma_1 : \gamma_2 = h_2 : h_1$$

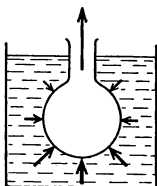
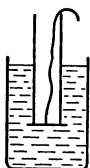
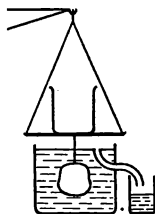
c) Auftrieb

Ein Würfel taucht vollständig in eine Flüssigkeit. Dann wirkt auf die Deckfläche die Kraft $F h_1 \gamma$, auf die Bodenfläche infolge der Aufdrücke die Kraft $F h_2 \gamma$, die der tieferen Lage der Bodenfläche entspricht. Die Differenz beider Kräfte ergibt eine vertikale, nach oben gerichtete Resultierende, den Auftrieb (Bild 79).

Bild 79
Auftrieb

Grundversuch. Eintauchen eines leeren Kolbens in Wasser (Bild 80). *Messung.* Ein beiderseits offener Zylinder mit losem Boden wird in Wasser eingetaucht.

Der Boden sinkt ab, wenn der Zylinder ebenfalls bis zur äußeren Oberfläche mit Wasser gefüllt ist (Bild 81).

Bild 80. Auftriebskraft
auf den KolbenBild 81. Der Auftrieb ist gleich
dem Gewicht der verdrängten
FlüssigkeitsmengeBild 82
Hydrostatische Waage

Der Auftrieb ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Begründung. Auftrieb: $F h_2 \gamma - F h_1 \gamma$

$A = F \gamma (h_2 - h_1) = \text{Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge}$

Archimedisches Prinzip: Ein Körper verliert in einer Flüssigkeit so viel an Gewicht, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt.

Anwendung. Bestimmung von Wichten mit der hydrostatischen Waage (Bild 82).

1. Wägung: Gewicht des Körpers in Luft (G_l).
2. Wägung: Gewicht des in Wasser eingetauchten Körpers (G_w).

Die Differenz beider Gewichte gibt das Volumen.

$$\gamma = \frac{G_1}{G_1 - G_w}$$

Die *hydrostatische Waage* kann auch zur Bestätigung des Archimedischen Prinzips verwendet werden. Das Eintauchen des Körpers in Flüssigkeit bringt die tarierte Waage aus dem Gleichgewicht. Gießt man die übergelaufene Flüssigkeit in das Gefäß auf der Waagschale, so tritt wieder Gleichgewicht ein.

Die *Mohrsche Waage* benutzt einen Glaskörper zur Bestimmung des Auftriebs in der zu untersuchenden Flüssigkeit. In Wasser wird der Auftrieb des Senkkörpers durch ein großes Reitergewicht ausgeglichen. Bei Eintauchen des Körpers in die zu untersuchende Flüssigkeit ($\gamma > 1$) sind weitere Reitergewichte zur Herstellung des Gleichgewichts nötig. Durch Ablesen der Reiterstellungen erhält man die Dezimalen der Wichte.

Ein Körper *geht* in einer Flüssigkeit *unter*, wenn sein Gewicht größer ist als der Auftrieb, er *schwebt* in der Flüssigkeit, wenn Auftrieb und Gewicht gleich groß sind, er *schwimmt*, wenn das Gewicht geringer ist als der Auftrieb, und taucht dabei so weit ein, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge gleich dem Gewicht des Körpers ist.

Schwimmen: Gewicht des Körpers = Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge

Das Schwimmen ist stabil, wenn der Schwerpunkt des Körpers tiefer liegt als der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeitsmenge. Darüber hinaus bleibt die Schwimmlage noch stabil, solange das Metazentrum (Schnittpunkt des Auftriebsvektors mit der Symmetrielinie des Körpers) über dem Schwerpunkt liegt (Bild 83).

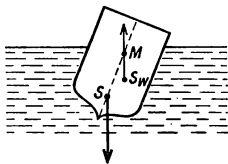


Bild 83. Das Metazentrum bestimmt die Schwimmlage

Anwendungen: *Aräometer* dienen zur Bestimmung der Wichte von Flüssigkeiten aus der Eintauchtiefe des Schwimmers. Die Eichung erfolgt empirisch je nach Verwendungszweck. Säuremesser geben den Prozentgehalt der Säure an, Milchprüfer den Fettgehalt.

2. Hydrodynamik

a) Gesetze der stationären Strömung

Eine „ideale“ Flüssigkeit ist unzusammendrückbar und frei von innerer Reibung.

Eine Strömung heißt stationär, wenn durch jeden Querschnitt der Leitung in der Zeiteinheit die gleiche Flüssigkeitsmenge fließt.

$$F_1 v_1 = F_2 v_2$$

Geht eine stationäre Strömung durch eine Leitung mit wechselndem Querschnitt, so ist die Strömungsgeschwindigkeit an jeder Stelle dem Querschnitt der Leitung umgekehrt proportional.

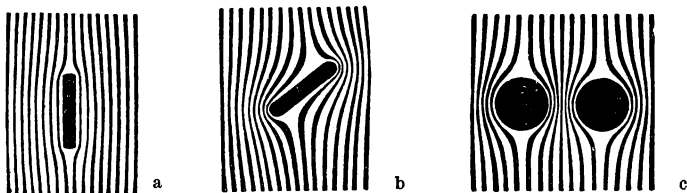


Bild 84a bis c. Stromlinien

Versuch: Stromlinienapparat nach *Pohl*. Die gefärbten Flüssigkeitsfäden zeigen die Stromliniendichte und die wechselnde Geschwindigkeit (Bild 84a bis c).

Ausflußgesetz von *Torricelli*: Die Ausflußgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{2gh}.$$

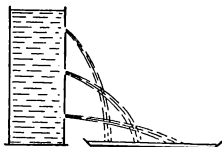


Bild 85 Ausflußgefäß

Das ist die gleiche Geschwindigkeit, die sich beim freien Fall der Flüssigkeitsteilchen ergeben würde (Bild 85).

$$\text{Ausflußmenge } M = Fv = F\sqrt{2gh};$$

F Querschnitt der Öffnung.

Infolge der Reibung an der Ausflußöffnung beträgt bei Wasser die Ausflußmenge nur

etwa 65% der theoretischen Menge. Beim Ausfließen spielt die verschieden große innere Reibung der Flüssigkeiten eine Rolle. Die *Viskosität* (Zähigkeit) ist ein Maß für die innere Reibung. Einheiten der Viskosität:

$$1 \text{ Poise} = 100 \text{ Zentipoise (cP)} = 1 \text{ g/cm s}$$

Strömung in geschlossener Leitung. Bei unverändertem Querschnitt nimmt der Druck der stationären Strömung geradlinig nach der Ausflußöffnung hin ab. Das zeigt der Ausflußapparat mit Steig-

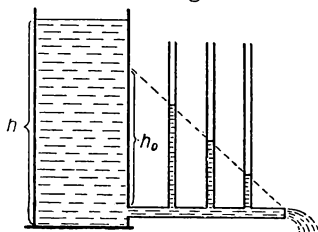


Bild 86. Druckabfall im waagrecht ausflußrohr

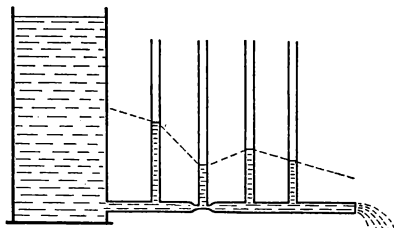


Bild 87. Einschnürung im Ausflußrohr

röhren (Bild 86). Die am Ausflußrohr angesetzten Steigrohre wirken als Manometer, die Wassersäulen nehmen von der Mündung des Rohres zum Gefäß hin linear zu. Tritt das Wasser aus der Öffnung noch mit einer Geschwindigkeit aus, so schneidet die Verbindungslinie der Druckhöhen das Gefäß unterhalb des Flüssigkeitsspiegels. Die Flüssigkeitshöhe h_0 bis zum Schnitt der Geraden heißt *Druckhöhe*, der Überschuß $h - h_0$ *Geschwindigkeitshöhe*. Die Druckhöhe dient zur Überwindung der Reibung in der Röhre, die Geschwindigkeitshöhe bestimmt die Ausflußgeschwindigkeit.

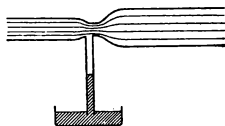


Bild 88. Saugwirkung an der Rohrverengung

An einer Verengung der Röhre sinkt der Druck. Die Beschleunigung an der engen Stelle erfordert Arbeit; dadurch entsteht der Druckabfall. Hinter der Verengung tritt eine Verzögerung ein, der dabei entstehende Gegendruck erklärt den Wiederanstieg des Druckes (Bild 87).

Die Druckabnahme an der Verengung des Querschnittes führt zu einer Saugwirkung (Bild 88).

Anwendung: Wasserstrahlpumpe (*Bunsen*) (Bild 89).

Das Wasser tritt aus einer engen Düse mit erhöhter Geschwindigkeit aus und zerfällt im weiteren Raum in Tropfen. An der Verengung entsteht eine Saugwirkung. Die Flüssigkeitstropfen reißen die aus dem Rezipienten angesaugte Luft mit sich fort (vgl. S. 66).

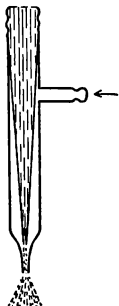


Bild 89. Wasserluftpumpe nach *Bunsen*

b) Ausnutzung der Wasserenergie

Älteste Form: überschlächtige und unterschlächtige Wasserräder. Neue Form: Wasserturbinen.



Bild 90. Zur Wirkungsweise der Wasserturbine



Bild 91. Zur Wirkungsweise der Freistrahlturbine

1. *Überdruckturbine*. Ein festes Leitrad gibt dem Wasser eine seitliche Richtung. Die Kanäle des Laufrades stehen senkrecht dazu. Der Reaktionsdruck setzt das Laufrad in Bewegung (Bild 90).

2. *Freistrahlturbine* (Bild 91). Hier wird der Stoß des aus einer Düse austretenden Wassers gegen die Schneide der Schaufel geleitet und direkt in Bewegung umgesetzt.

Leistung bei sekundlich abfließender Wassermenge G und wirk-samer Höhendifferenz h :

$$L = \frac{Gh}{75} \text{ [PS]}$$

Wird die sekundlich ausfließende Wassermenge in Litern gemessen, so ist Gh die potentielle Energie, die sich beim Herabstürzen des Wassers in kinetische verwandelt hat. Gh ist eine Arbeit, gemessen in kpm. 1 PS = 75 kpm/s.

Im Walchenseekraftwerk wird ein Gefälle von nahezu 200 m ausgenutzt. Sechs Druckrohre von je 2 m Durchmesser führen das Wasser den Turbinen zu. 4 Francis-Spiralturbinen (Bild 92) zu

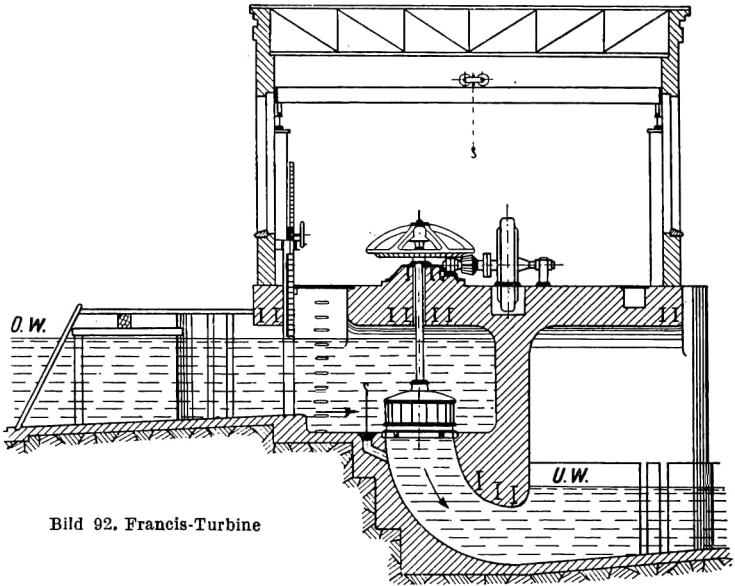


Bild 92. Francis-Turbine

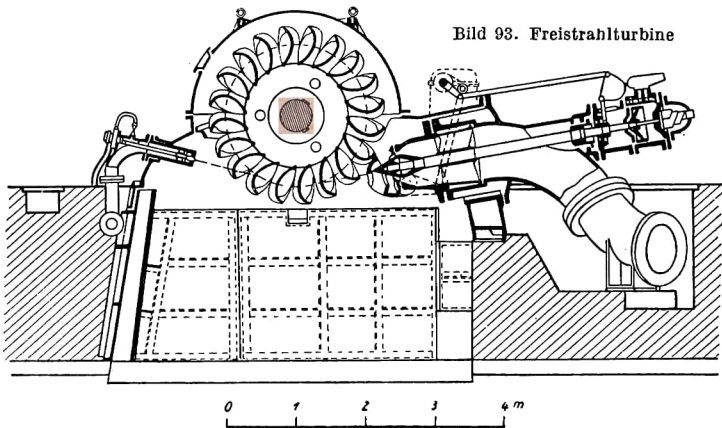


Bild 93. Freistrahlturbine

je 24000 PS und 500 U/min und 2 Pelton-Freistrahlturbinen (Bild 93) zu je 18000 PS und 250 U/min übertragen die Energie auf Drehstromgeneratoren. Maximalleistung 168000 PS, maximale Betriebswassermenge $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Molekularkräfte in Flüssigkeiten

a) Kohäsionskräfte

Ein Flüssigkeitstropfen, der äußeren Kräften entzogen ist, nimmt Kugelform an. Die Kohäsionskräfte der Flüssigkeitsmoleküle sind bei der Kugelform in vollkommener Symmetrie.

Versuch: Öltropfen in einer Mischung von Wasser und Alkohol (gleiche Dichten); die Ölkugel schwebt in der Flüssigkeit.

Messung der Kohäsionskräfte (Bild 94) mit Federwaage und benetzter Glasplatte. Die Kraft im Augenblick des Abreißens der Platte gibt die Kohäsionskraft.

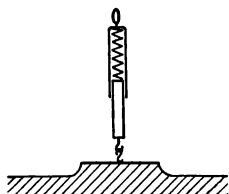


Bild 94. Messung der Kohäsionskraft

Auf eine im Innern einer Flüssigkeit befindliche Molekel wirken die Anziehungskräfte der Nachbarmolekeln symmetrisch. Man bezeichnet als Wirkungsradius den Kugelradius, innerhalb dessen diese Anziehungskräfte noch wirksam sind. Ragt ein Teil der Wirkungssphäre aus der

Oberfläche heraus (Bild 95), so fehlen zu diesem Teil die Anziehungskräfte der Nachbarmolekeln; die Symmetrie ist gestört. Die schraffierten Teile des Wirkungskreises der Kohäsionskräfte werden nicht durch symmetrische Gegenkräfte aufgehoben. Dabei entsteht eine Resultierende,

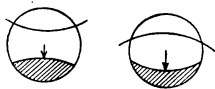


Bild 95. Zur Erklärung der Oberflächenspannung

die ins Innere der Flüssigkeit gerichtet ist. Um die Molekel vollends an die Oberfläche zu ziehen, ist eine Kraft notwendig. Das wirkt sich so aus, als ob die Flüssigkeitsoberfläche mit einer elastischen Haut überzogen wäre, die beim Heben der Molekel elastische Spannungen entwickelt: *Oberflächenspannung*.

Messung der Oberflächenspannung (Bild 96) mit Drahtrahmen und Reiter, als Flüssigkeitshaut dient eine Seifenlösung. Bei der Messung ist zu beachten, daß diese Seifenlamelle 2 Oberflächen hat.

Die Kapillaritätszahl α gibt die Zugkraft an, die an einem 1 cm langen Stück der Randlinie der Flüssigkeit wirkt. Kapillaritätszahl α in mp/cm: Wasser/Luft 7,5; Öl/Luft 3,3; Wasser/Öl 2. Wegen des Überschusses der Kapillaritätszahl Öl/Luft gegen Öl/Wasser wird ein Öltropfen auf Wasser breitgezogen, weil die Kapillaritätszahl Wasser/Luft die Summe der Kapillaritätszahlen Öl/Luft und Öl/Wasser übertrifft.

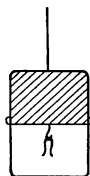


Bild 96. Messung der Oberflächenspannung einer Seifenlamelle

b) Randwirkung

Am Rand der Flüssigkeit gegen das Gefäß wirken Kohäsionskräfte und Adhäsionskräfte zusammen.

Je nach Überwiegen der einen gegen die anderen bezeichnet man die Flüssigkeit als nichtbenetzend oder benetzend.



Bild 97. Randwirkung einer nichtbenetzenden Flüssigkeit

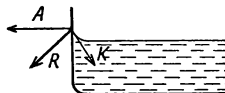


Bild 98. Randwirkung einer benetzenden Flüssigkeit

Nichtbenetzende Flüssigkeit (Bild 97).

Benetzende Flüssigkeit (Bild 98).

In engen Röhren (Kapillaren) tritt bei Überwiegen der Adhäsion eine Hebung der Flüssigkeitssäule ein (Kapillarattraktion, Bild 99), bei Überwiegen der Kohäsion eine Senkung (Kapillardepression) (Bild 100). Die längs der Randlinie wirkenden Kapillarkräfte $2\pi r\alpha$ halten der Flüssigkeitssäule $\pi r^2 h \gamma$ das Gleichgewicht:

$$\pi r^2 h \gamma = 2\pi r \alpha; \quad \alpha = \frac{h r}{2} \gamma$$

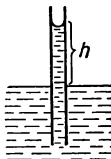


Bild 99. Kapillarattraktion einer benetzenden Flüssigkeit

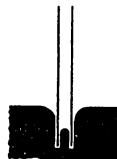


Bild 100. Kapillardepression einer nichtbenetzenden Flüssigkeit

c) Diffusion und Osmose

Diffusion heißt die Vermischung zweier Flüssigkeiten oder Gase verschiedener Wichte entgegen der Schwerkraft durch die Beweglichkeit der Molekeln. Bei der Diffusion von Alkohol und Wasser tritt eine Volumenverminderung ein.

Osmose heißt die Vermischung zweier Flüssigkeiten oder Gase durch eine poröse Wand hindurch (Tonzelle).

Auf dem osmotischen Druck (vgl. S. 71) beruht das Steigen der Pflanzensäfte in den Pflanzenstengeln und der Übertritt der Nährstoffe in das Blut.

C. Gase

1. Eigenschaften ruhender Gase

a) Allgemeine Eigenschaften

In den Gasen ist der Zusammenhalt der Molekeln so weit gelockert, daß sie jeden gebotenen Raum einnehmen. Um Gasmengen vergleichen zu können, ist es notwendig, sie auf *Normalvolumen* zu reduzieren. (Druck 760 Torr, Temperatur 0° C.) Vgl. S. 102.

Auch Gase haben ein Gewicht.

Versuch. Bestimmung des Gewichtes von 1 l Luft durch Wägung. Der Literkolben ist durch einen Hahn verschließbar.

1. Wägung: Kolben bei geöffnetem Hahn, also Gewicht von Kolben und Luft.

Evakuierung des Kolbens.

2. Wägung: Kolben bei geschlossenem Hahn, also Kolben ohne Luftinhalt.

Öffnen des Hahns unter Wasser, Einstromen des Wassers.

3. Wägung: Kolben mit Wasser.

Die Differenz des 1. und 2. Wägungsergebnisses ist gleich dem Gewicht der Luft, die Differenz des 3. und des 2. ergibt das Volumen.

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

1 Liter Luft wiegt	1,293 p
1 Liter Wasserstoff wiegt	0,090 p

Atmosphärische Luft ist 14,36mal so schwer wie Wasserstoff. Die Dichtezahlen der Gase werden entweder angegeben bezogen auf Wasser = 1 oder bezogen auf Luft = 1.

Dichtezahlen von Gasen

Bezogen auf	Wasser	Luft
Luft	0,001 293	1
Wasserstoff . . .	0,000 090	0,0695
Sauerstoff	0,001 429	1,106
Stickstoff	0,001 251	0,967
Kohlendioxyd . .	0,001 977	1,529

Gesetz von Avogadro. Gleiche Volumina zweier Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekeln.

Ein *Mol* ist die Stoffmenge, die so viel Pond wiegt, wie das Molekulargewicht angibt.

1 Mol Wasserstoff wiegt 2 p, 1 Mol Wasser (H_2O)

$2 + 16 = 18$ p, 1 Mol $\text{H}_2\text{SO}_4 = 2 + 32 + 64 = 98$ p.

1 Mol Gas hat das Normalvolumen 22 410 cm^3

1 cm^3 Gas enthält $27 \cdot 10^{18}$ Molekeln.

1 Mol enthält $22410 \cdot 27 \cdot 10^{18}$ Molekeln

$= 6,02 \cdot 10^{23}$ Molekeln. *Loschmidtsche Zahl.*

1 Wasserstoffatom hat die Masse $1,67 \cdot 10^{-24}$ g.

b) Gasdruck

Gase haben Volumenelastizität, sie setzen der Zusammendrückung einen Widerstand entgegen und haben das Bestreben der Expansion.

Grundversuche: Taucherglocke (Bild 101), Windbüchse, Fahrradreifen.

Die Druckfortpflanzung geschieht allseitig.

Nachweis des Luftdrucks mit der Barometerröhre (Bild 102). Der Raum über der Quecksilbersäule ist luftleer (*Torricellisches Vakuum*). Nachweis durch Kippen der Röhre (metallischer Klang).

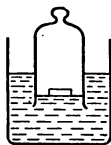


Bild 101. Modell einer Taucherglocke

Befindet sich noch etwas Luft im oberen Teil der Röhre, so bildet diese beim Neigen der Röhre ein Luftpolster und bremst das Anschlagen des Quecksilbers ab.

Messung des Luftdrucks

Eine Quecksilbersäule QS von 76 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt wiegt bei 0° C $76 \cdot 13,6 \text{ p} = 1033 \text{ p}$.

Dieser Druck heißt 1 *physikalische Atmosphäre*.



Bild 102
Nachweis des Luftdrucks

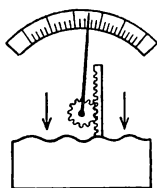


Bild 103
Aneroidbarometer

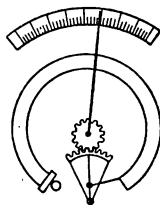


Bild 104
Bourdonsche Röhre

Der Druck von 1 kp/cm^2 heißt 1 at (*technische Atmosphäre*).
 $1 \text{ at} \triangleq 735,6 \text{ mm QS}$ (bei 0° C), $1 \text{ at} = 981\,000 \text{ dyn/cm}^2$. 1 mm QS
 $\triangleq 1333,2 \text{ dyn/cm}^2 = 1 \text{ Torr}$ (*nach Torricelli*).

$$1000 \text{ dyn/cm}^2 = 1 \text{ Millibar (mb)}$$

$$10^6 \text{ dyn/cm}^2 = 1 \text{ Bar} = 1000 \text{ mb} = 750,1 \text{ Torr}$$

Zur Messung des Luftdrucks dienen die Barometer.

1. *Quecksilberbarometer*: Gefäßbarometer und Heberbarometer.
2. *Aneroidbarometer* (Bild 103). Der Luftdruck wirkt auf eine luftleere Dose mit elastischer Deckfläche. Aneroidbarometer werden nach dem Quecksilberbarometer geeicht.
3. *Bourdonsche Röhre* (Bild 104). Sie besteht aus einer ringförmigen, luftleeren Röhre mit elliptischem Querschnitt, deren eines Ende fest ist. Die Röhre krümmt sich mit zunehmendem Luftdruck.

Man verwendet das Barometer auch zur Messung von Höhenunterschieden. Der Luftdruck am Ausgangspunkt der Messung sei b_0 . Auf 10 m Erhebung nimmt der Druck um etwa 1 Torr ab, d. h.,

bei 10 m Erhebung beträgt der Luftdruck $b_1 = \frac{759}{760} b_0$, bei weiteren 10 m $b_2 = \frac{759}{760} b_1 = (\frac{759}{760})^2 b_0$, also $b_h = (\frac{759}{760})^h = k^h$, wenn man zur Abkürzung den Bruch $\frac{759}{760} = k$ setzt.

Ort A habe h_1 m Höhe, Ort B h_2 m Höhe, dann ist

$$b_1 = k^{h_1}, \quad b_2 = k^{h_2}; \quad \lg b_1 = h_1 \lg k; \quad \lg b_2 = h_2 \lg k;$$

$$H = h_2 - h_1 = \frac{1}{\lg k} (\lg b_2 - \lg b_1) = -\frac{1}{\lg k} (\lg b_1 - \lg b_2).$$

Die hier durchgeführte Überschlagsrechnung mit Stufen von 10 m ergibt für $-\frac{1}{\lg k}$ den Wert 1754, also $H = 17\,540 (\lg b_1 - \lg b_2)$ [m].

Die exakte Rechnung mit Hilfe der Integralrechnung liefert 18 400.

Barometrische Höhenformel: $H = 18\,400 (\lg b_1 - \lg b_2)$ [m]

Die Formel gilt für gleichbleibende Temperatur. Mit der Höhe nimmt aber die Temperatur durchschnittlich um $\frac{1}{2}^\circ \text{C}$ je 100 m Steigung ab. Daraus folgt eine stärkere Abnahme des Luftdrucks.

Barometerstand bei $\frac{1}{2}^\circ \text{C}$ Temperaturabnahme auf 100 m

Höhe:	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	m
Luftdruck:	762	671	590	517	453	395	344	288	258	Torr

Mittlerer Barometerstand einiger Orte:

Kiel 760, Berlin 757, Leipzig 751, München 713, Zugspitze 526 Torr

Messung von Gasdrücken

Zur Messung von Gasdrücken dienen die *Manometer*, sie zeigen den Überdruck bzw. Unterdruck gegenüber dem Luftdruck an.

1. Offenes Manometer für kleine Überdrücke.
2. Geschlossenes Manometer für größere Überdrücke. Der obere Teil des geschlossenen Schenkels ist mit Luft gefüllt (Bild 105).
3. Federmanometer (Bild 106).



Bild 105
Geschlossenes
Manometer

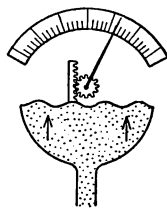


Bild 106
Federmanometer

c) Luftpumpen

Verdichtungspumpen. Die Fahrradpumpe enthält einen luftdicht schließenden Kolben im Zylinder (Stiefel). Dieser hat ein einseitig sich öffnendes Bodenventil.

Automatisch arbeitende Verdichtungspumpen heißen Kompressoren. Sie unterscheiden sich in ihrer Arbeitsweise vom Gasmotor nur durch den Fortfall der mittleren Takte: 1. Takt Ansaugen, 2. Takt Verdichten und Ausstoßen des verdichteten Gases (vgl. S. 120).

Verdünnungsluftpumpen (Otto von Guericke 1650)

Kolbenluftpumpe mit Zweiweghahn
(Bild 107).

R Rezipient, *S* Stiefel.

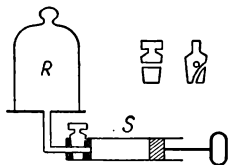


Bild 107. Kolbenluftpumpe

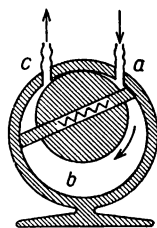


Bild 108. Rotierende Kapselluftpumpe

Verdünnung nach dem n -ten Kolbenhub $V = \left(\frac{R}{R+S} \right)^n$.

Beim Herausziehen des Kolbens ist der Hahn so zu stellen, daß Rezipient und Stiefel verbunden sind. Durch Drehen des Hahns wird der Rezipient abgeschlossen und der Stiefel mit der Außenluft verbunden.

Rotierende Kapselluftpumpe (Gaede) (Bild 108)

Die durch die Feder gegen die Innenwand des Zylinders gedrückten Schieber trennen die Räume *a* und *b* ab.

In *a* tritt bei der Rotation Verdünnung ein, in *b* Verdichtung. Die verdichtete Luft gelangt durch das Ansatzrohr *c* ins Freie.

Wasserstrahlluftpumpe für Verdünnungen bis etwa 60 Torr (siehe S. 58).

Versuche mit der Luftpumpe: Magdeburger Halbkugeln zeigen die große Kraft des Luftdrucks. Das Dasymeter beweist den Auftrieb der Körper in Luft. An einer Waage hängt auf der einen Seite eine Glaskugel, auf der anderen Seite ein kleines Gewicht.

In Luft befindet sich die Waage im Gleichgewicht. Unter dem Rezipienten senkt sich bei fortschreitender Evakuierung die Glaskugel. Das Gleichgewicht in Luft ist dadurch bedingt, daß die große Glaskugel einen stärkeren Luftauftrieb erfährt als das kleinere Gewichtsstück. Die Fallröhre bestätigt den Satz: Alle Körper fallen im luftleeren Raum gleich schnell.

d) Wirkungen des Luftdrucks

Stechheber und Saugheber. Beim Saugheber (Bild 109) wirkt der Luftdruckunterschied des Flüssigkeitsspiegels im Gefäß und an der Ausflußöffnung.

Überdruck im höchsten Punkt des Hebers:

$$(b - h_2 \gamma) - (b - h_1 \gamma) = (h_1 - h_2) \gamma$$

Wasserpumpen

Bei der *Saugpumpe* (Bild 110) ist der Kolben durchbohrt und durch ein Überdruckventil abgeschlossen. Beim Senken des Kolbens schließt sich das Bodenventil, das Kolbenventil öffnet sich und läßt das Wasser

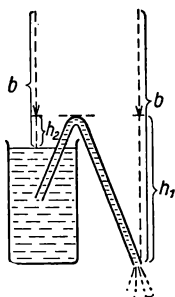


Bild 109. Saugheber

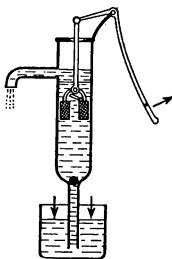


Bild 110. Saugpumpe

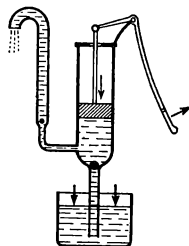


Bild 111. Druckpumpe

in den oberen Zylinderraum einströmen. Beim Heben des Kolbens schließt sich das Kolbenventil, das Bodenventil öffnet sich, und das Wasser strömt in den weiteren Zylinderraum nach.

Bei der *Druckpumpe* (Bild 111) ist der Kolben massiv. Die Ventile befinden sich am Boden des Zylinders und am Ansatz des Ausflußrohres. Beim Heben des Kolbens öffnet sich das Bodenventil, es schließt sich das Ausflußventil; beim Senken schließt sich das

Bodenventil, das Ausflußventil öffnet sich. Das Wasser des Zylinders wird in das Ausflußrohr gedrückt.

In der Kreiselpumpe (Bild 112) führt die Drehbewegung des Schaufelrades infolge der auf das Wasser wirkenden Zentrifugalkräfte zu einer Saugwirkung am Steigrohr.

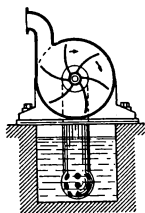


Bild 112. Kreiselpumpe

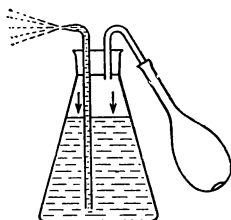


Bild 113. Spritzflasche

Heronball und Spritzflasche (Bild 113). Der Überdruck der eingepreßten Luft treibt die Flüssigkeit in das Steigrohr.

Auftrieb in Luft

Jeder Körper verliert in Luft so viel an Gewicht, wie die verdrängte Luftmenge wiegt.

Reduktion der Wägung auf den luftleeren Raum

G_k wahres Gewicht des Körpers, A_k Auftrieb des Körpers in Luft, G_g wahres Gewicht der Gewichtsstücke, A_g Auftrieb der Gewichtsstücke. Aus dem Gleichgewicht in Luft folgt:

$$G_k - A_k = G_g - A_g, \quad G_k = G_g + A_k - A_g$$

Vor der Reduktion muß eine Bestimmung des Körpervolumens und des Volumens der Gewichtsstücke vorgenommen werden.

Anwendung des Auftriebs in Luft: Luftballon.

2. Strömung von Flüssigkeiten und Gasen

a) Gesetz von Bernoulli

Flüssigkeiten und mit gewissen Einschränkungen auch Gase gehorchen den gleichen Strömungsgesetzen. Erzeugung von Luftströmungen im Windkanal (Fön = elektrischer Heißluftapparat).

In einer stationären Strömung sei F_1 der Querschnitt an einer Stelle der Röhre, v_1 die dort herrschende Strömungsgeschwindigkeit, p_1 der Druck an dieser Stelle. An einer anderen Stelle seien F_2 , v_2 , p_2 die entsprechenden Werte. Wenn $F_2 < F_1$ ist, ergibt sich ein Überdruck zwischen F_1 und F_2 :

$$\text{Kraft } P = F_1 p_1 - F_2 p_2 = F_m (p_1 - p_2),$$

wenn die Querschnittsverengung gleichmäßig zunimmt.

Die von der Kraft P verrichtete Arbeit ist

$$A = P s = F_m (p_1 - p_2) s = V (p_1 - p_2).$$

Diese Arbeit dient zur Vermehrung der kinetischen Energie:

$$A = \frac{m}{2} v_2^2 - \frac{m}{2} v_1^2,$$

also ist

$$V (p_1 - p_2) = \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2); \quad p_1 - p_2 = \frac{m}{2V} (v_2^2 - v_1^2) = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2):$$

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2$$

p_1 und p_2 bedeuten die statischen Drücke bei F_1 und F_2 . Den Aus-
druck $\frac{\rho}{2} v^2$ nennt man den Staudruck.

Gesetz von Bernoulli. In einer stationären Strömung ist die Summe aus Druck und kinetischer Energie der Volumeneinheit an jeder Stelle konstant.

Zweite Fassung: In einer stationären Strömung ist die Summe aus dem statischen Druck und dem dynamischen Druck (Staudruck) konstant.

Bei zunehmender Geschwindigkeit sinkt der statische Druck und nimmt umgekehrt bei abnehmender Geschwindigkeit zu.

Zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in Röhren dient das *Venturirohr* (Bild 114).

$$F_1 v_1 = F_2 v_2; \quad v_1 = \frac{F_2}{F_1} v_2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) = \frac{\rho}{2} \left(v_2^2 - \left(\frac{F_2 v_2}{F_1} \right)^2 \right)$$

$$v_2^2 = \frac{2 (p_1 - p_2)}{\rho \left(F_1^2 - F_2^2 \right)} F_1^2$$

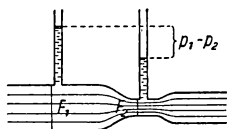


Bild 114. Venturirohr

Zur Messung des *Staudrucks* frei strömender Flüssigkeiten und Gase dienen das *Pitotrohr* (Bild 115) und das *Staurohr*. Dieses mißt den Druckunterschied zwischen den Punkten *A* und *B*.

Vor der Öffnung *A* wird die Geschwindigkeit abgebremst auf den

$$\text{Betrag } v_2 = 0. \quad p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} v_1^2;$$

$$\text{Staudruck } p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} v^2; \quad v = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}.$$

Anwendungen des Bernoullischen Gesetzes.

Aerodynamisches Paradoxon (Bild 116). Anziehung der beweglichen Scheibe bei Anblasen. An der Austrittsstelle des Luftstromes aus dem engen Rohr entsteht ein Sog. Auf diesem Prinzip beruhen auch die Flüssigkeitszerstäuber.

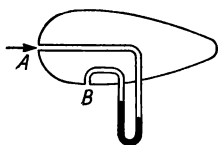


Bild 115. Pitotrohr

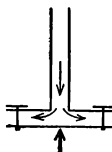


Bild 116. Aerodynamisches Paradoxon

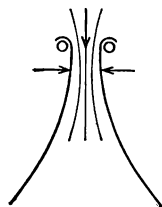
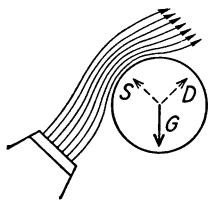


Bild 117. Anziehung zweier gekrümmter Bleche

Zusammenklappen zweier Flügel im Luftstrom. Die Verengung des Luftstroms zwischen den Platten (Bild 117) erzeugt von beiden Seiten her einen Sog. Die Platten schlagen zusammen.

Bild 118
Ball im Luftstrahl

Frei schwebender Ball am schrägen Luftstrom (Bild 118). Die Einschnürung des Luftstroms führt zu einem Unterdruck (Sog, vgl. F_2 in Bild 114), das Anströmen der Luft gegen den Ball zu einer tangentialen Druckkomponente. Beide Komponenten heben durch ihre Resultierende das Gewicht (G) des Balles auf.

b) Molekulareigenschaften der Gase

Gesetz von Dalton. Der Druck eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Einzeldrücke (vgl. S. 109).

Die Vermischung zweier Gase heißt Diffusion, die Vermischung zweier Gase durch eine poröse Wand hindurch Osmose.

Grundversuch (Bild 119). Leuchtgas diffundiert schneller durch die Tonzelle als Luft. Die im Wasser aufsteigenden Luftblasen zeigen die Verdrängung der Luft durch das Leuchtgas. Der osmotische Druck wirkt wie ein Gasdruck.

Gesetze von van't Hoff. Jedes Mol erzeugt bei der Lösung in Wasser den gleichen osmotischen Druck.

Ein Stoff übt in gelöstem Zustand den gleichen Druck aus, den er in gasförmigem Zustand bei Ausfüllung des gleichen Raumes ausüben würde.

Zur kinetischen Gastheorie, VI, B, 1.

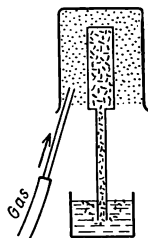


Bild 119. Diffusion

II. Schwingungen, Wellen und Akustik

1. Elastische Schwingungen und Wellen

a) Harmonische Schwingung

Elastische Körper, die aus der Gleichgewichtslage gebracht werden, führen eine harmonische Schwingung aus. Die harmonische Schwingung kann als Projektion einer Kreisbewegung aufgefaßt und mit deren Hilfe beschrieben werden, weil auch für die Kreisbewegung die Kraft in der Richtung der Koordinatenachsen proportional dem Abstand von der Nullage ist (s. I, 4 e).

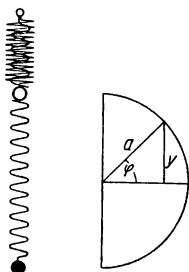


Bild 120. Harmonische Schwingung einer belasteten Schraubenfeder

Der Radius des Leitkreises sei a , er entspricht der größten Ablenkung aus der Ruhelage: a Amplitude. Die augenblickliche Lage ist bestimmt durch die Ordinate $y = a \sin \varphi$ (Bild 120).

Die augenblickliche Abweichung aus der Ruhelage heißt *Elongation*; der Winkel φ , den der Fahrstrahl zum Kreispunkt mit der x -Achse bildet, heißt *Phasenwinkel*. Er wird in Bogenmaß gemessen (s. S. 38). Die seit dem Beginn der Schwingung verflossene Zeit sei t , die Dauer eines vollen Umlaufs (Hinundhergang) sei T , die *Schwingungsdauer*. Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde heißt *Frequenz* (ν), sie wird in Hertz (Hz) gemessen.

$$\varphi : 2\pi = t : T ; \quad \varphi = \frac{2\pi t}{T} ;$$

$$\text{Winkelgeschwindigkeit } \omega = \frac{v}{r} = \frac{2\pi r}{T} : r = 2\pi \nu ;$$

$$\varphi = \omega t ; \quad \omega = 2\pi \nu \text{ heißt Kreisfrequenz.}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Hz} &= 1 \text{ Schwingung je Sekunde} \\ 1 \text{ kHz} &= 1000 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Frequenz und Schwingungsdauer sind reziproke Werte.

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

$$y = a \sin \frac{2\pi t}{T} = a \sin \omega t; \text{ Elongation der Sinusschwingung}$$

b) Die Sinuswelle

Betrachtet man die harmonische Schwingung eines leuchtenden Punktes, die mit Hilfe eines Drehspiegels auf einen Schirm projiziert wird, so erscheint die Schwingung in eine Wellenlinie auseinandergezogen. Das Bild der harmonischen Schwingung ist die Sinuslinie. Der Abstand zweier Punkte, die sich im gleichen Schwingungszustand befinden, heißt eine Wellenlänge (λ) (Bild 121).

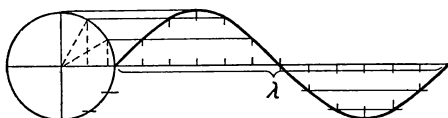


Bild 121. Sinusschwingung

jiziert wird, so erscheint die Schwingung in eine Wellenlinie auseinandergezogen. Das Bild der harmonischen Schwingung ist die Sinuslinie. Der Abstand zweier Punkte, die sich im gleichen Schwingungszustand befinden, heißt eine Wellenlänge (λ) (Bild 121).

Der Wellenlänge λ entspricht die Schwingungsdauer T

Die gleiche Form der Sinusschwingung ergibt sich, wenn ein einzelnes Teilchen innerhalb eines elastischen Mediums aus der Ruhelage gebracht wird. Dieses Teilchen wirkt auf das Nachbarteilchen und versetzt dieses ebenfalls in Schwingung. Die Schwingung des Nachbarteilchens beginnt eine kleine Zeitdifferenz später. Diese Schwingung wirkt wieder auf die Nachbarteilchen und so fort. Ein Teilchen im Abstand x vom Erregerpunkt beginnt seine Schwingung t' Sekunden später. Als Elongation ergibt sich

$$y = a \sin 2\pi \frac{t - t'}{T} = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right),$$

da $t' : T = x : \lambda$ ist.

In einem elastischen Medium pflanzt sich die Schwingung als Welle mit einer gewissen Geschwindigkeit (c) fort, in der Zeit T um den Betrag λ . Daraus folgt:

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

oder

$c = \lambda \nu$; Grundgleichung der Wellenlehre

Bei der Wellenbewegung führt das einzelne Teilchen eine Schwingung am Ort aus, nur die Wellenform pflanzt sich fort (Vergleich mit dem Ährenfeld im Wind). Eine Welle, deren Berge und Täler wandern, heißt *fortschreitende Welle*.

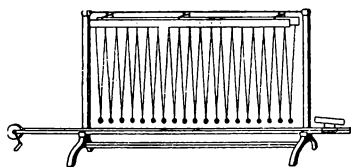


Bild 122
Machsche Wellenmaschine

Zur Veranschaulichung der Wellenbewegung dient die *Machsche Wellenmaschine* (Bild 122): Eine Reihe von zweifädig aufgehängten Pendeln schwingt quer zur Pendelreihe. Werden die Pendel nacheinander angestoßen, so entsteht

das Bild einer fortschreitenden Welle. Man bezeichnet die in gerader Linie fortschreitende Welle als *lineare Welle*, im Gegensatz zu den *Kreiswellen*, die vom Erregerpunkt in radialer Richtung fortschreiten.

Eine *Querwelle* oder *Transversalwelle* ist dadurch gekennzeichnet, daß die Teilchen *senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung* schwingen.

Durch Verstellen der oberen Leiste der Wellenmaschine können die Schwingungsebenen der Pendel um 90° gedreht werden, die Pendel schwingen dann nur in der Längsrichtung der Pendelreihe hin und her.

Eine *Längswelle* oder *Longitudinalwelle* ist dadurch gekennzeichnet, daß die Teilchen *in der Fortpflanzungsrichtung* hin- und herschwingen.

Die Längswelle zeigt eine Folge von Verdichtungen und Verdünnungen, die ebenso fortschreiten wie die Berge und Täler der Querwelle.

Die Querwelle läßt sich durch Drehung der Elongation jedes Teilchens um 90° in eine Längswelle überführen.

In Bild 123 ist eine Transversalwelle gezeichnet mit Ordinaten im Abstand von je 45° . Dreht man die Ordinaten im Uhrzeigersinn um ihre Fußpunkte um je 90° , so ergeben die Endpunkte das Bild einer Longitudinalwelle.

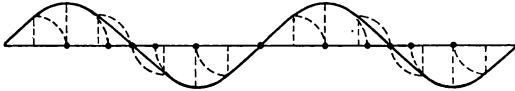


Bild 123. Überführung einer Transversalwelle in eine Longitudinalwelle

Querwellen lassen sich mit einem einseitig befestigten Seil herstellen. Die elektrischen Wellen und die Lichtwellen sind Querwellen. Längswellen lassen sich mit einer langen Schraubenfeder herstellen. Die Schallwellen sind Längswellen.

Wasserwellen stellen einen Übergang dar, an der Oberfläche schwingen die Teilchen in Kreisen senkrecht zur Ausbreitungs-

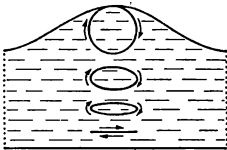


Bild 124. Schwingung der Teilchen in der Wasserwelle

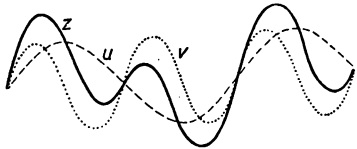


Bild 125. Überlagerung zweier Wellen

richtung der Welle (Bild 124). Diese Oberflächenschwingungen haben den Charakter der Querwellen. Die tieferen Teilchen sind durch die überlagernden behindert, sie schwingen in immer flacheren Ellipsen. An der unteren Grenze erzeugt die Schwingung eine Längswelle.

c) Überlagerung von Wellen, Reflexion

Nach dem Gesetz von der Unabhängigkeit der Bewegungen (s. S. 28) kann man die Elongationen als Vektoren zusammensetzen (Interferenz).

Bild 125 zeigt die Überlagerung zweier Wellen. Die Wellenlänge von u ist doppelt so groß wie die von v . Die resultierende Welle z entsteht durch vektorielle Addition der Elongationen von u und v . Die Resultierende ist in diesem Falle keine Sinuswelle mehr.

Interferenz im engeren Sinne:

Zwei Wellen gleicher Frequenz und gleicher Phase ergeben eine resultierende Welle gleicher Frequenz, aber doppelter Amplitude (Bild 126).

Zwei Wellen gleicher Frequenz mit der Phasendifferenz $\frac{\lambda}{2}$ löschen sich aus (Bild 127).

Schwebungen. Zwei Wellen von wenig verschiedenen Wellenlängen ergeben, solange der Phasenunterschied gering ist, Verstärkung.

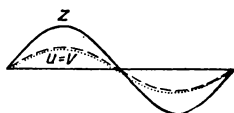


Bild 126. Interferenz gleicher Wellen:
Phasenunterschied Null

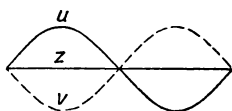


Bild 127. Interferenz gleicher Wellen:
Phasenunterschied 180°

Mit wachsendem Phasenunterschied werden die resultierenden Elongationen kleiner und wachsen dann wieder an, wenn der Pha-

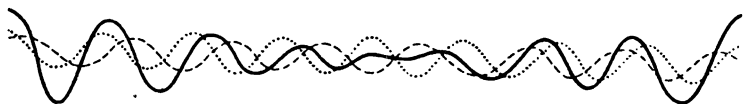


Bild 128. Entstehung von Schwebungen

senunterschied sich dem Betrag λ nähert. Dieses Ansteigen und Abflauen der Amplituden nennt man Schwebungen (Bild 128).

Die Anzahl der Schwebungen ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen

Reflexion. An einer festen Wand (Bild 129) wird eine fortschreitende Welle nach den Gesetzen des elastischen Stoßes reflektiert (vgl. I, A 3f). Ein Wellenberg wird dabei in ein Wellental verwandelt und umgekehrt.

Die Reflexion an einer festen Wand findet unter Verlust einer halben Wellenlänge statt

Bei Reflexion an einem dünneren Mittel (Bild 130), z. B. an der Grenze Wasser gegen Luft können die Teilchen an dieser Grenze

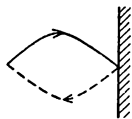


Bild 129. Reflexion am „dichteren“ Mittel

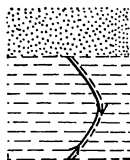


Bild 130. Reflexion am „dünneren“ Mittel

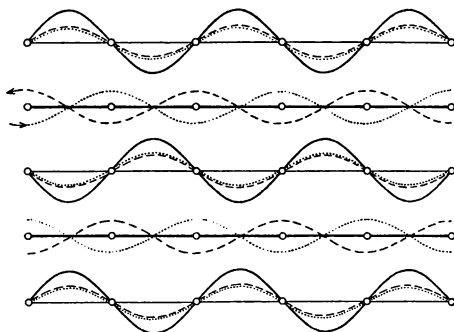


Bild 131. Entstehung einer stehenden Welle

voll ausschlagen. Ein Wellenberg kehrt als Wellenberg zurück, ein Wellental als Wellental.

Die Reflexion am dünneren Mittel geschieht gleichphasig (ohne Verlust)

In beiden Fällen kommt die reflektierte Welle mit der fortschreitenden Interferenz, es entsteht eine stehende Welle (Bild 131).

d) Stehende Wellen

Eigenschaften der stehenden Welle:

1. Sie entsteht durch Interferenz einer fortschreitenden Welle mit der reflektierten, die gleiche oder entgegengesetzte Phase, gleiche Wellenlänge, aber entgegengesetzte Fortpflanzungsrichtung hat.
2. Alle Teilchen gehen gleichzeitig durch die Ruhelage.
3. Jedem Teilchen kommt eine bestimmte, gleichbleibende Schwingungsweite zu.
4. Bestimmte Stellen, die *Knoten*, bleiben dauernd in Ruhe. Der Abstand zweier Knoten entspricht einer halben Wellenlänge der erzeugenden Wellen.

5. In der Mitte zwischen den Knoten liegen Stellen höchster Schwingungsweite, die *Schwingungsbäuche*.
6. Bei der Reflexion am dichteren Mittel (feste Wand) liegt an der Reflexionsstelle ein Knoten.
7. Bei der Reflexion am dünneren Mittel (Grenze Wasser—Luft) liegt an der Reflexionsstelle ein Schwingungsbauch, der 1. Knoten befindet sich im Abstand $\frac{\lambda}{4}$ von der Grenzfläche.

Der Stimmgabelversuch von *Melde* (Bild 132) zeigt das Bild der stehenden Welle. An einer Stimmgabelzinke ist ein Wollfaden

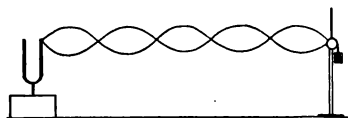


Bild 132. Stimmgabelversuch
nach *Melde*

befestigt und durch ein kleines Anhängengewicht waagrecht gespannt. Die Schwingungen der Stimmgabel übertragen sich als fortschreitende Welle auf den Faden. Diese wird am anderen Ende reflektiert und kommt mit der ankommenden Welle zur

Interferenz. Es entsteht eine stehende Welle. Bäuche und Knoten bleiben in ihrer Lage unverändert. Mit der Spannung des Fadens ändert sich die Wellenlänge und damit die Zahl der Bäuche und Knoten.

2. Schwingungen und Wellen in der Ebene und im Raum

a) Schwingungen in einer Ebene

Zwei zueinander senkrechte harmonische Schwingungen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude ergeben je nach dem Phasenunterschied als resultierende Schwingung eine lineare Schwingung, eine Kreisschwingung oder eine elliptische Schwingung. Die resultierende Schwingung läßt sich mit Hilfe der Leitkreise konstruieren. Die gleichförmige Bewegung eines Punktes auf dem Leitkreise liefert als Projektion auf den zugehörigen Durchmesser die harmonische Schwingung. In Bild 133 sind nur die äußeren Hälften der Leitkreise gezeichnet.

Bei Phasenunterschied 0 oder $\frac{\lambda}{2}$ ergibt sich als Resultierende eine Diagonale des Quadrates, bei dem Phasenunterschied $\frac{T}{4} \left(\frac{\lambda}{4} \right)$ ein

Kreis, bei anderen Phasenunterschieden Ellipsen in verschiedener Form und Lage. Die Punkte der Kurve entstehen als Schnitte der entsprechenden Vertikal- und Horizontallinien.

Sind die Frequenzen oder die Amplituden verschieden,

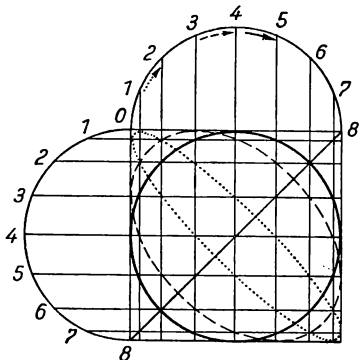


Bild 133. Überlagerung zweier zueinander senkrechter harmonischer Schwingungen

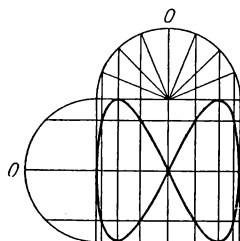


Bild 134. Lissajoussche Figur

so entstehen bei der Zusammensetzung senkrechter Schwingungen komplizierte, in sich zurückkehrende Kurven, die *Lissajousschen Figuren*.

Bild 134 stellt die Zusammensetzung zweier Schwingungen dar, deren Schwingungsdauern sich wie 1 : 2 verhalten.

Mechanisch können Lissajoussche Figuren mit Hilfe des Sandstreuers hergestellt werden (Bild 135).

Bild 135. Sandstreuer

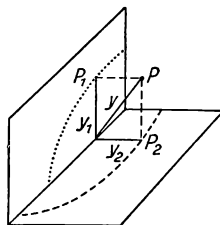
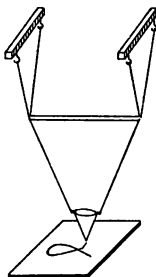


Bild 136. Lineare Wellen in senkrechten Ebenen

b) Lineare Wellen in senkrechten Ebenen

Lineare Wellen in zwei verschiedenen Ebenen lassen sich ebenfalls durch Vektoraddition der Elongationen zu einer resultierenden Welle zusammensetzen (Bild 136). Stehen die beiden Ebenen aufeinander senkrecht, so ergibt sich bei dem Phasenunterschied

Null wieder eine lineare Welle in der Diagonalebene der Komponenten. Bei dem Phasenunterschied $\frac{\lambda}{4}$ entsteht eine Zirkularwelle (Schraubenlinie auf einem Kreiszylinder), bei anderen Phasenunterschieden ergeben sich Schraubenlinien auf elliptischen Zylindern (elliptische Wellen).

c) Polarisation

Im allgemeinen liegen die Schwingungen einer Querwelle nicht in einer Ebene, sondern in allen Richtungen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung. Eine stehende Seilwelle zeigt meist eine Folge

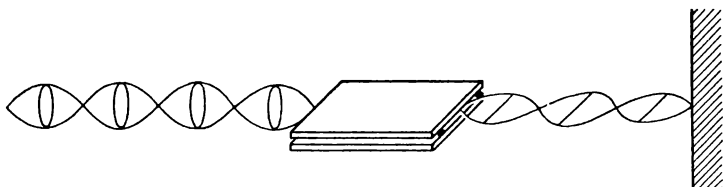


Bild 137. Modellversuch zur Polarisation

von Spindeln. Durch einen Spalt läßt sich die räumliche Schwingung in eine ebene Schwingung verwandeln. Dieser Vorgang heißt Polarisation, die Vorrichtung zur Erzeugung der ebenen Schwingung *Polarisator*. Bei der Seilwelle des Bildes 137 wird die Polarisation durch den schmalen Spalt zwischen zwei Brettern erzwungen.

Polarisation kann nur bei Querwellen auftreten

Die Verdünnungen und Verdichtungen einer Längswelle gehen ungehindert durch den Spalt, bei Längswellen gibt es keine Polarisation.

3. Das Prinzip von Huygens

a) Grundgedanke

Bei einer Wellenbewegung ist jedes bewegte Teilchen seinerseits Erreger für das Nachbar teilchen. In einem homogenen Medium muß diese Welle sich in Kugelform nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzen.

Prinzip von Huygens. Jeder von einer Welle getroffene Punkt ist selbst Erzeuger einer Elementarwelle. Die Hüllfläche der Elementarwellen stellt die neue fortschreitende Wellenfront dar (Bild 138).

Bestätigung an der Wellenwanne. Eine flache Wanne (Bild 139) ist mit Wasser gefüllt und durch eine Querwand in zwei Teile

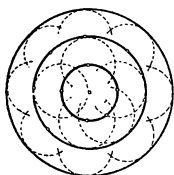


Bild 138. Zur Erklärung des Huygensschen Prinzips

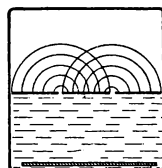


Bild 139. Ausbildung von Elementarwellen in der Wellenwanne

geteilt. Die Querwand hat einige enge Öffnungen. Durch rhythmisches Eintauchen eines Lineals werden auf der einen Seite geradlinige Wellenfronten erzeugt. Durch die Öffnungen treten sie als Kreiswellen in den anderen Raum über.

b) Reflexion

Der einfallende und der reflektierte Strahl liegen in einer Ebene. Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.

Begründung (Bild 140): $C_1C = A_1A = AD = r$; $\triangle ACD \cong \triangle ACC_1$;
 $\angle \alpha = \angle C_1AC = \angle ACD = \angle DAE = \beta$.

Einfallswinkel α = Reflexionswinkel β

c) Brechung

Der einfallende Strahl und der gebrochene Strahl liegen in einer Ebene. Der Sinus des Einfallswinkels verhält sich zum Sinus des Brechungswinkels wie die Geschwindigkeiten c_1 und c_2 in beiden Mitteln.

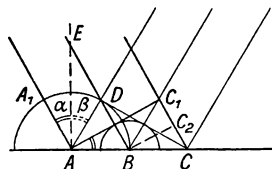


Bild 140. Zur Erklärung des Reflexionsgesetzes nach Huygens

Dieses Verhältnis heißt Brechungszahl (n).

Begründung (Bild 141). Während die Welle von C_1 nach C gelangt, breitet sich die Elementarwelle von A nach D aus. $c_1 = AC \sin \alpha$, $c_2 = AD \sin \beta$, also $\sin \alpha : \sin \beta = c_1 : c_2 = n$. n hat im allgemeinen einen konstanten Wert.

Brechungsgesetz: $\sin \alpha : \sin \beta = c_1 : c_2 = n$

Satz von Fermat. Die Fortpflanzung vom Punkte A im ersten Mittel zum Punkte B im zweiten geschieht so, daß der Wellenstrahl ein

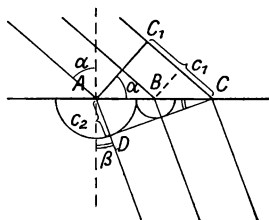


Bild 141. Zur Erklärung des Brechungsgesetzes nach *Huygens*

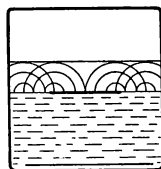


Bild 142. Wellen gehen um ein Hindernis herum

Minimum von Zeit braucht, um von A nach B zu gelangen, er legt den größeren Teilweg in dem Mittel zurück, in dem er die größere Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat.

d) Beugung

Wellen gehen um ein Hindernis herum (Bild 142). Das läßt sich in der Wellenwanne zeigen. Die ebene Welle erzeugt am Hindernis Elementarwellen, die sich hinter dem Hindernis wieder zusammenschließen. Es gelangt also Energie in den geometrischen Schattenraum.

Diese Erscheinung heißt Beugung. Beim Schall ist die Beugung eine täglich beobachtete Erscheinung, der Nachweis der Beugung beim Licht ist lange vergeblich versucht worden.

Reflexion, Brechung und Beugung sind Änderungen der Ausbreitungsrichtung von Wellen, die sich durch das Huygenssche Prinzip erklären lassen.

4. Abhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit vom Stoff

a) Feste Körper

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit hängt von den elastischen Eigenschaften des Stoffes ab, in dem die Welle sich ausbreitet. Für feste Körper gilt nach *Newton*:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\varrho}}$$

E Elastizitätsmodul in dyn/cm², ϱ Dichte in g/cm³.

b) Gase

Gase pflanzen den Druck adiabatisch fort (vgl. III, 6), deshalb hängt auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit vom Verhältnis $\frac{c_p}{c_v} = \kappa$ ab.

Formel von *Laplace*:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p}{\varrho}}; \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}.$$

p Druck in dyn, ϱ Dichte in g/cm³.

5. Schallerzeugung und Schallausbreitung

a) Schallquellen

Als Schallquellen können alle Körper dienen, die elastische Schwingungen ausführen: Metallplatten (Gong, Becken), Saiten, Stäbe (Schlagwerke von Uhren, Zinken der Stimmgabel), Luftsäulen (in Pfeifen).

Der Schall kann sich nur ausbreiten, wenn ein elastisches Medium als Träger der Schwingung vorhanden ist.

Versuch. Eine elektrische Klingel im Rezipienten der Luftpumpe wird leiser und bei fortschreitender Evakuierung schließlich unhörbar.

Schallwellen sind Längswellen

Die Schallwellen kommen dadurch zustande, daß die Schwingungen des Schallerregers Verdichtungen und Verdünnungen in der um-

gebenden Luft hervorrufen. Diese pflanzen sich fort und erregen im Ohr entsprechende Schwingungen, die wir dann als Schall empfinden.

b) Sichtbarmachen der Schallwellen

Durch Reflexion werden stehende Schallwellen erzeugt, die sich sichtbar machen lassen:

1. *Kundtsche Staubfiguren* (Bild 143): Ein Glasstab ragt in eine einseitig geschlossene Röhre. Er wird durch Reiben in Schwingung versetzt, die Schwingung überträgt sich auf den Luftraum



Bild 143. Kundtsche Staubfiguren

und wird an der Gegenwand reflektiert. Das Korkmehl in der Röhre wird an den Schwingungsbäuchen aufgewirbelt, an den Knotenpunkten bleibt es ungestört. Durch Ausmessen der Knotenabstände ergibt sich die Wellenlänge.

2. *Glühdrahtröhre*. An den Knotenpunkten entsteht keine Luftbewegung, der Draht glüht, an den Bäuchen wird der Draht durch die starke Luftbewegung gekühlt, es entstehen bei Einsetzen der Schallschwingungen dunkle Stellen. Die Glühdrahtröhre kann zum Nachweis von Ultraschallwellen dienen (Galtonpfeife).

c) Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit in Luft wurde 1822 von *A. v. Humboldt*, 1832 von *Arago* bestimmt, sie hängt nur von der Temperatur ab.

$$c = 331,3 \sqrt{1 + \gamma t} \quad [\text{m/s}]$$

Hier bedeutet γ den Ausdehnungskoeffizienten der Gase ($\frac{1}{273}$) und t die Temperatur in Celsiusgraden.

Für Luft von 15°C ergibt sich rund:

$c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$

Die Geschwindigkeit des Schalles in Wasser ist von *Colladon* und *Sturm* im Genfer See bei 8° C mit 1435 m/s bestimmt worden.

$$c_{\text{Wasser}} = 1450 \text{ m/s}$$

Die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern ist noch höher, für Eisen beträgt sie rund 5000 m/s.

Die Schallgeschwindigkeit in Gasen läßt sich mit den Kundtschen Staubfiguren bestimmen.

Die stehenden Wellen im Kundtschen Rohr können mit Hilfe eines Summers bekannter Frequenz erzeugt werden. Die Röhre wird mit Gas beschickt und der durchschnittliche Knotenabstand gemessen.

<i>Schallgeschwindigkeiten</i>	m/s		m/s
Kohlensäure	260	Kautschuk (!)	35
Luft	340	Messing	3400
Wasserdampf	410	Holz	rund 4000
Leuchtgas	490	Eisen	rund 5000
Wasserstoff	1270	Glas	rund 5200
Wasser	1450		
Seewasser	1475		

6. Tonhöhe und Tonerreger

a) Frequenz und Intervall

Das menschliche Ohr nimmt Schallwellen zwischen den Frequenzen 16 und 20000 Hz wahr. Der Frequenz 16 Hz entspricht die untere Hörgrenze, die obere Hörgrenze schwankt, sie wird im Alter niedriger. Druckwellen unterhalb 16 Hz bezeichnet man als Infraschall, hierzu gehören Bodenerschütterungen, Erdbeben und dgl. Schallwellen oberhalb 20000 Hz bezeichnet man als *Ultraschall*.

Einfachste Form der Erzeugung: Hochfrequente elektrische Schwingungen werden durch einen Schwingquarz als elastische Schwingungen auf Paraffinöl übertragen. Die Versuchsobjekte befinden sich in einem Glasröhrchen in Öl (Bild 144).

Frequenzen von 100 000 ... 700 000 Hz.

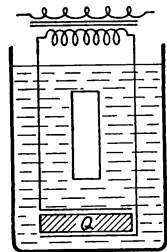


Bild 144
Erzeugung von
Ultraschallwellen

Anwendungen des Ultraschalls. Entgasung von Flüssigkeiten, Herstellung von Emulsionen, Materialprüfung, Reizung von Muskelgeweben.

Musikalisch verwendet werden die Frequenzen

16,4 ... 8372 Hz bei der Orgel,

27,5 ... 3520 Hz beim Klavier.

Intervall bedeutet in der Musik das Zahlenverhältnis zweier Frequenzen. Je einfacher das Intervall ist, um so angenehmer wird die Tonfolge empfunden.

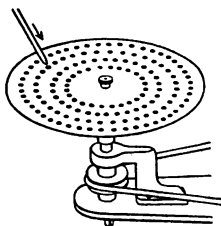


Bild 145. Lochsirene

Einfachste Intervalle: Oktave 1 : 2, Quinte 2 : 3, Quarte 3 : 4, große Terz 4 : 5, kleine Terz 5 : 6.

Schwingungszahlen (Frequenzen) lassen sich mit der Lochsirene bestimmen (Bild 145).

Der Luftstrom wird durch die rotierende Lochscheibe rhythmisch unterbrochen.

Hinter der Scheibe entstehen Luftverdichtungen und Verdünnungen, die wir als Ton empfinden.

b) Die Tonleitern

Diatonische Tonleiter

Prime	Sekunde	Terz	Quarte	Quinte	Sexte	Septime	Oktave	
c.	d	e	f	g	a	h	c	
1	9 : 8	5 : 4	4 : 3	3 : 2	5 : 3	15 : 8	2 : 1	Intervalle
	9 : 8	10 : 9	16 : 15	9 : 8	10 : 9	9 : 8	16 : 15	Teilintervalle

Das Intervall 9 : 8 heißt großer, ganzer Ton; 10 : 9 kleiner, ganzer Ton; 16 : 15 halber Ton. 2 halbe Töne ergeben ungefähr einen ganzen Ton: $\frac{16}{15} \cdot \frac{16}{15} = \frac{256}{225} \approx \frac{9}{8}$.

Die *chromatische Tonleiter* entsteht durch Zwischenschalten von je einem halben Ton in ein ganzes Tonintervall. Geschieht dies, vom tieferen Ton ausgehend, so erhält man als Halbtöne: cis, dis, fis, gis, ais, vom höheren Ton ausgehend, des, es, ges, as und b. Die chromatische Tonleiter eignet sich nicht für Instrumente mit fester Stimmung (Klavier). Hier benutzt man seit *Bach* die *gleichschwebende Stimmung*: Alle 12 Teilintervalle (i) sind gleich. Es ist

also $i^{12} = 2$, jedes Teilintervall $i = \sqrt[12]{2} = 1,059$; nur die Oktaven sind rein gestimmt.

Als Grundton der Stimmung für Instrumente gilt seit 1939:

Kammerton $a' = 440 \text{ Hz}$

Frequenz und Wellenlänge bei 15°C :

	$\nu [\text{Hz}]$	$\lambda [\text{cm}]$
Untere Hörbarkeitsgrenze	16	2100
Tiefster Klavierton	27,5	1240
Kammerton	440	77,4
Höchster Klavierton	3520	9,7
Obere Hörbarkeitsgrenze	20000	1,7

Die Umrechnung erfolgt nach der Formel $c = \lambda \nu$ (vgl. 1b).

c) Tonerreger

Töne gleicher Schwingungszahl haben bei den einzelnen Instrumenten verschiedenen Klang. Die *Klangfarbe* wird durch Zahl und Stärke der mitschwingenden Obertöne bestimmt. Die Obertöne entsprechen den ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz.

Stäbe können in Transversalschwingungen und in Longitudinalschwingungen versetzt werden. Die davon ausgehenden Schallwellen sind immer longitudinal.

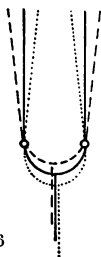


Bild 146

Schwingende Stimmgabel

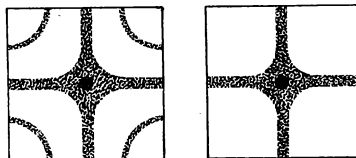


Bild 147. Chladnische Klangfiguren

Die *Stimmgabel* hat an den Enden der Zinken Schwingungsbäuche, ebenso in der Mitte der Rundung am Griff (Bild 146).

Schwingende Platten bleiben längs bestimmter Linien in Ruhe (Knotenlinien), dazwischen liegen Stellen höchster Schwingungsweite. Aufeinanderfolgende Felder schwingen entgegengesetzt. Sichtbarmachen der Knotenlinien mit Hilfe von Sand:

Chladnische Klangfiguren (Bild 147).

Saiten. Die Frequenz hängt ab von der Länge der Saite, der Masse und der Spannung:

$$v = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{P}{m}}$$

l Länge in cm, P Spannung in dyn, m Masse der Längeneinheit.
Zur Bestätigung der Gesetze dient das *Monochord* (Bild 148).

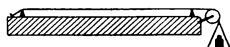


Bild 148. Monochord

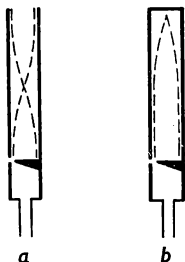


Bild 149. a offene, b gedeckte Lippenpfeife



Bild 150. Zungenpfeife

Pfeifen

1. Lippenpfeifen, offene und gedeckte Pfeifen (Bild 149)

In offenen Pfeifen kann die Luft unten an der Lippe und oben am offenen Ende frei schwingen. Hier entstehen Bäuche. Dazwischen können 1, 2, 3 oder mehr Knoten liegen $\left(l = \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots\right)$. Dadurch entsteht die volle Zahl der Obertöne.

In gedeckten Pfeifen liegt an der Lippe ein Bauch, am oberen geschlossenen Ende ein Knoten $\left(l = \frac{\lambda}{4}\right)$. Tritt ein weiterer Knoten dazwischen auf, so ist $l = \frac{3\lambda}{4}$, bei zwei Knoten $l = \frac{5\lambda}{4}$. Die gedeckte Pfeife gibt nur die ungeraden Obertöne. Ihr Grundton liegt eine Oktave unter dem der gleich langen offenen Pfeife.

2. Zungenpfeifen (Bild 150)

Die eingeblasene Luft bringt eine verstellbare Zunge zum Schwingen (Klarinette, Oboe, Fagott).

3. Polsterpfeifen (Bild 151)

Die beiden Polster werden durch den Luftstrom auseinandergetrieben, durch die Federn wieder zusammengedrückt. Die Polsterpfeife erklärt die Wirkung der Stimmbänder. Zu den Polsterpfeifen gehören Horn, Posaune, Trompete. Das Polster wird hier durch die Lippen des Bläasers gebildet.

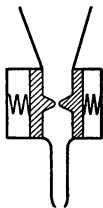


Bild 151
Polsterpfeife

d) Schallstärke und Lautstärke

Weber-Fechnersches Gesetz. Wenn die Reizstärke in geometrischer Reihe zunimmt, wächst die Empfindungsstärke in arithmetischer Reihe.

Von der objektiven Schallstärke ist die subjektiv empfundene Lautstärke zu unterscheiden. Bei Verdoppelung der Reizstärke (objektive Schallstärke) empfinden wir den Ton nicht doppelt so laut. Erst wenn die Reizstärke die zweite Potenz erreicht, empfinden wir die doppelte Lautstärke.

Zur Messung der Lautstärke dient die *Phonskala*:

$$n_{\text{Phon}} = 10 \lg \frac{J'}{J}, \quad J' \text{ und } J \text{ sind die Schallstärken.}$$

Die Schallstärken sind den Quadraten der Schalldrücke proportional.

$$n_{\text{Phon}} = 10 \lg \left(\frac{P'}{P} \right)^2 = 20 \lg \frac{P'}{P}$$

Zur absoluten Schallstärkenmessung dient die Festsetzung:

Ein Ton von 1000 Hz, der auf das Ohr den Schalldruck 1 dyn/cm² (1 µb) ausübt, hat die Lautstärke 70 Phon.

Phonskala: 0 Phon: Hörschwelle, 20 Phon: Flüstersprache, 40 Phon: normale Unterhaltung, 60 Phon: Lautsprechermusik, 80 Phon: Schreien, 100 Phon: Nieten, 130 Phon: Fühlschwelle (Schmerzempfindung).

7. Interferenz und Resonanz

a) Reflexion

Das Echo entsteht durch senkrechte Reflexion von Schallstrahlen an einer entfernten Wand (Felsen, Waldrand). Das Ohr kann in der Sekunde 10 Silben getrennt aufnehmen. Damit ein Echo zustande kommt, muß die reflektierende Wand so weit entfernt sein, daß zwischen der gesprochenen Silbe und der reflektierten Silbe (dem Echo) mindestens $\frac{1}{10}$ Sekunde liegt. Daraus ergibt sich die Mindestentfernung von 17 m.

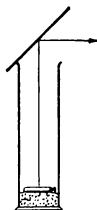


Bild 152
Reflexion von
Schallwellen

Für Schallstrahlen gilt das *Reflexionsgesetz*: Der einfallende Strahl bildet mit dem Einfallslot den gleichen Winkel wie der reflektierte Strahl.

Versuch: Taschenuhr am Boden eines Standzylinders, Reflexion der Schallwellen in gewünschter Richtung durch eine schräg gehaltene Glasplatte (Bild 152).

b) Interferenzerscheinungen

Zwei nahe beieinander liegende Töne ergeben als Interferenzerscheinung Schwebungen (s. S. 76), Bild 153.

Schallwellen vom Gangunterschied $\frac{\lambda}{2}$ löschen sich aus.

Nachweis mit dem Posaunenrohr nach *Quincke* (Bild 154). Der Summer erzeugt einen Ton bekannter Frequenz, die Schallwellen gehen auf zwei Wegen durch das Posaunenrohr und kommen bei ihrer Wiedervereinigung zur Interferenz. Der Glasansatz des Gummischlauches wird in das Ohr eingeführt.

Der Ton erlischt, wenn die beiden Teilwege sich um

$$\frac{\lambda}{2}, \quad \frac{3\lambda}{2}, \quad \frac{5\lambda}{2}, \dots$$

unterscheiden, volle Tonstärke entspricht einem Wegunterschied

$$0, \quad \lambda, \quad 2\lambda, \quad 3\lambda, \dots$$

c) Dopplersches Prinzip

Nach dem Prinzip der Unabhängigkeit der Bewegungen muß sich bei bewegter Schallquelle oder bewegtem Beobachter diese Ge-

schwindigkeit vektoriell zur Schallgeschwindigkeit addieren. Wenn die Schallquelle sich nähert, dann treffen mehr Schallschwingungen in der Zeiteinheit das Ohr des Beobachters, der Ton wird als höher empfunden; bei einer sich entfernenden Schallquelle empfängt der Beobachter weniger Schallwellen

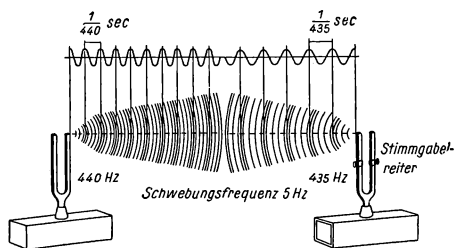


Bild 153
Schwebungen zweier Stimmgabelschwingungen

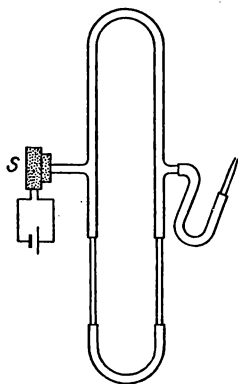


Bild 154
Posaunenrohr nach Quincke

in der Zeiteinheit als bei ruhender Schallquelle. Der Ton wird daher tiefer empfunden, als er in Wirklichkeit ist. Nur der mit der Schallquelle fahrende Beobachter hört den „richtigen“ Ton.

Bei sich nähernder Schallquelle (Geschwindigkeit v) kommen ν Schwingungen auf die Strecke $c - v$. Wenn ν Schwingungen nicht auf die Strecke c kommen, sondern auf die kürzere Strecke $c - v$ kommen, verkürzt sich die Wellenlänge, die Frequenz wird höher.

$$\lambda' = \lambda - \delta. \text{ Nun ist aber } c = \lambda \nu = \lambda' \nu', \quad \nu = \delta \nu, \text{ also } \nu' = \frac{c}{\lambda'} \\ = \frac{c}{\lambda - \delta} = \frac{c \nu}{\lambda \nu - \delta \nu} = \nu \frac{c}{c - v}.$$

Bei Entfernung erscheint der Ton niedriger: $\nu' = \nu \frac{c}{c + v}$.

Bewegter Beobachter. Dem Weg v des Beobachters in der Zeiteinheit entsprechen $\frac{v}{\lambda} = \frac{\nu}{c} v$ Schwingungen. Diese Schwingungen kommen zu den ν Schwingungen, die der ruhende Beobachter empfängt, hinzu, also ist

$$\nu' = \nu \pm \frac{\nu v}{c} = \nu \frac{c \pm v}{c}.$$

d) Resonanz

Als Resonanz bezeichnet man das freiwillige Mitschwingen eines schwingungsfähigen Gebildes, das auf die gleiche Frequenz abgestimmt ist.

Beispiel: Mitklingen einer Klaviersaite bei gedrücktem Pedal, wenn der entsprechende Ton erklingt.

Luftsäulen tönen mit, wenn die Höhe der Luftsäule $\frac{1}{4}, \frac{3}{4} \dots$ der Wellenlänge λ des Tones beträgt.

Versuch. Stimmgabel über verschiebbarer Röhre (Bild 155). Wenn die Länge der Luftsäule $\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}$ usw. beträgt, wird die Luft zum Mitschwingen erregt, der Stimmgabelton wird verstärkt.

Resonanzkästen der Stimmgabeln haben die Länge $\frac{\lambda}{4}$.

Versuch. Mitklingen einer zweiten gleichen Stimmgabel (Bild 156). Wird die linke Stimmgabel erregt, so überträgt sich die Schwingung

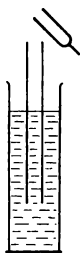


Bild 155

Resonanzversuch

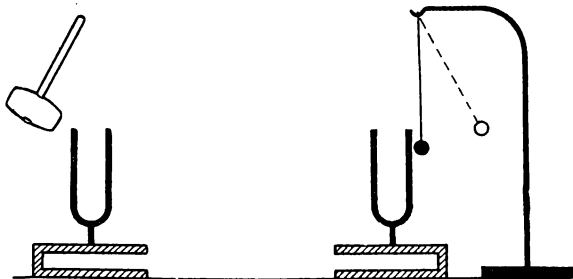


Bild 156. Resonanz einer zweiten Stimmgabel

durch die Luft auf die rechte. Das Pendel wird von der Zinke weggestoßen. Bringt man die erste Stimmgabel durch Berühren zum Schweigen und gibt sie wieder frei, so wandert die Schwingungsenergie von der zweiten zurück zur ersten. Das Pendel schwingt langsamer und kommt schließlich zur Ruhe, während die erste Stimmgabel lauter wird. Der Vorgang wiederholt sich, bis die Energie verbraucht ist.

Von der Resonanz zu unterscheiden ist das *erzwungene Mitschwingen*: Beim Aufsetzen einer Stimmgabel auf die Tischplatte schwingt

diese mit und verstärkt den Ton. Hier findet keine Auswahl der Frequenzen statt.

Membranen sollen in jeder Frequenz schwingen, hierbei muß der Resonanzpunkt besonders vermieden werden, er muß außerhalb des gewünschten Frequenzbereichs liegen (Kopfhörer und Mikrofonmembranen).

Resonanzschwingungen sind in der Technik gefürchtet (Motorenwellen, mitschwingende Fußböden), während sie in anderen Fällen erwünscht oder beabsichtigt sind (bei der Abstimmung von Funkgeräten, in der Akustik).

III. Wärmelehre

1. Wärmeausdehnung fester, flüssiger und gasförmiger Körper

Unsere Wärmeempfindung beruht auf dem Tastsinn und ist ziemlich unsicher. Ein einigermaßen sicheres Gefühl haben wir nur für den Unterschied von Wärmezuständen, dagegen fehlt uns jedes Empfinden für den Wärmeinhalt eines Körpers. Als Maß für den Wärmezustand dient die Temperatur. Um aber ein Stück Eisen auf eine bestimmte Temperatur zu erwärmen, brauchen wir eine viel kleinere Wärmemenge als zur Erwärmung der gleichen Masse Wasser auf die gleiche Temperatur. Wir müssen daher streng trennen zwischen dem Wärmezustand, d. h. der Temperatur, und dem Wärmeinhalt, d. h. der Wärmemenge, die notwendig ist, um diese Temperatur zu erzielen.

a) Thermometer und Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung dienen die Thermometer. Wir verwenden überwiegend die Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten zur Temperaturanzeige (Flüssigkeitsthermometer mit Quecksilber oder Alkohol). Auch die verschiedene Wärmeausdehnung zweier Metalle kann zur Temperaturmessung dienen (Metallthermometer, vgl. 1 b) oder die elektrische Spannung, die an der Lötstelle zweier Metalle entsteht, wenn diese erwärmt wird, während die freien Enden des Thermoelements auf niedriger Temperatur gehalten werden (vgl. Thermoelement S. 167).

Zur Eichung der Flüssigkeitsthermometer dienen zwei *Fixpunkte* (Fundamentalphunkte): die Temperatur des schmelzenden Eises (Gefrierpunkt) und die Temperatur des siedenden Wassers (Siedepunkt) bei Normaldruck (760 mm QS). Der Abstand beider Punkte ist in der Réaumur-Skala in 80 Teile, in der Celsius-Skala in 100 Teile geteilt. In der Fahrenheit-Skala liegt der Gefrierpunkt bei dem Teilstrich 32, der Siedepunkt bei dem Teilstrich 212, sie weist also 180 Teilstriche zwischen den Fundamentalphunkten auf.

Umrechnung der Temperaturskalen

$$n^{\circ} \text{C} = \frac{4}{5} n^{\circ} \text{R} = \left(\frac{9}{5} n^{\circ} + 32^{\circ} \right) \text{F}$$

$$n^{\circ} \text{R} = \frac{5}{4} n^{\circ} \text{C} = \left(\frac{9}{4} n^{\circ} + 32^{\circ} \right) \text{F}$$

$$n^{\circ} \text{F} = \frac{5}{9} (n^{\circ} - 32^{\circ}) \text{C} = \frac{4}{9} (n^{\circ} - 32^{\circ}) \text{R}$$

Für Temperaturen unter -20°C wird als Thermometerflüssigkeit Alkohol, Toluol oder Penthan verwendet, für Temperaturen über 300°C sind Quecksilberthermometer aus Quarzglas mit Stickstofffüllung in Gebrauch (bis 750°C).

b) Ausdehnung fester Körper

Bei Erwärmung dehnen sich die Körper nach allen Seiten hin aus, stabförmige Körper vor allem nach der Länge. Der Längenzuwachs läßt sich leicht messen.

Grundversuche:

Kugel und Ring (Bild 157). Bei gleicher Temperatur gleitet die Kugel gerade durch den Ring. Erhitzt man die Kugel, so bleibt sie infolge ihrer Wärmeausdehnung so lange stecken, bis nach erfolgtem Temperaturausgleich Kugel und Ring wieder gleiche Temperatur angenommen haben.

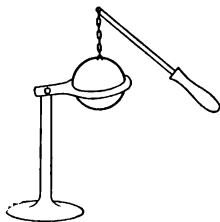


Bild 157. Kugel und Ring

Stahlstab und Bolzen (Bild 158). Der Stahlstab hat an dem einen Ende eine Bohrung, durch die ein Bolzen aus Grauguß oder ein dicker Nagel gesteckt wird. Das andere Ende des Stabes trägt ein Gewinde mit Mutter. Bei Zimmertemperatur wird der Stab in die Lager fest eingespannt und dann in der Mitte erhitzt. Infolge der Längenausdehnung durch die Erwärmung läßt sich die Schraube weiter anziehen. Beim Erkalten zieht sich der Stahlstab mit solcher Gewalt zusammen, daß der Eisenbolzen zersprengt wird.

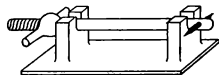


Bild 158
Stahlstab und Bolzen

Messung der Längenausdehnung (Bild 159). Durch ein etwa 1 m langes Rohr aus dem zu untersuchenden Material wird Wasser-

dampf geleitet. Vor dem Versuch ist das Rohr auf der einen Seite fest eingeklemmt worden, auf der anderen nur aufgelegt. Am Ende des Rohres ist ein Fühlhebel angebracht, dessen Zeigerstellung bei der Anfangstemperatur abgelesen worden ist. Der durchströmende Dampf erhitzt das Rohr auf nahezu 100°C , es dehnt sich aus und drückt gegen den Fühlhebel. Die neue Zeigerstellung wird abgelesen. Der Fühlhebel muß vor der Messung nach einer bekannten Längenausdehnung geeicht werden (z. B. $1^\circ \triangleq \frac{1}{20} \text{ mm}$).

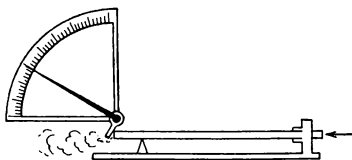


Bild 159. Längenausdehnung eines Rohres

Der durchströmende Dampf erhitzt das Rohr auf nahezu 100°C , es dehnt sich aus und drückt gegen den Fühlhebel. Die neue Zeigerstellung wird abgelesen. Der Fühlhebel muß vor der Messung nach einer bekannten Längenausdehnung geeicht werden (z. B. $1^\circ \triangleq \frac{1}{20} \text{ mm}$).

Die auf die Längeneinheit bezogene Ausdehnung eines Stabes bei 1° Erwärmung heißt *linearer Ausdehnungskoeffizient* (α).

Δl bedeutet den Längenzuwachs, l_0 die Länge bei 0°C , l_t die Länge bei t° .

$$\Delta l = l_t - l_0 = l_0 \alpha \Delta t \quad \text{oder} \quad l_t = l_0 (1 + \alpha t)$$

Umkehrung: $l_0 = l_t \frac{1}{1 + \alpha t} \approx l_t (1 - \alpha t)$, weil α sehr klein ist und Glieder höherer Ordnung deshalb vernachlässigt werden können.

$$\begin{array}{r} 1 : (1 + \alpha t) = 1 - \alpha t + \alpha^2 t^2 - + \dots \\ \hline 1 + \alpha t \\ - \alpha t \\ \hline - \alpha t - \alpha^2 t^2 \\ \hline + \alpha^2 t^2 \end{array}$$

Für die *Raumausdehnung* eines Würfels ergibt sich dann

$$\Delta V = l_t^3 - l_0^3$$

oder

$$l_t^3 = l_0^3 (1 + \alpha t)^3 = l_0^3 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3).$$

Da α eine sehr kleine Zahl ist, dürfen bei mäßigen Temperaturunterschieden die beiden letzten Glieder der Klammer vernachlässigt werden. Daraus folgt:

$$V_t = V_0 (1 + \gamma t); \quad \gamma = 3\alpha$$

Der *Raumausdehnungskoeffizient* γ ist gleich dem dreifachen Betrag der Längenausdehnungskoeffizienten.

Anwendungen. Auf der verschieden großen Ausdehnung der Metalle beruhen das Rostpendel der Uhr (Bild 160) und das Metallthermometer (Bild 161).

Das *Rostpendel* (am „Regulator“) besteht meist aus 3 Messingstäben und 2 dazwischenliegenden Zinkstäben. Die Ausdehnung der Messingstäbe wird durch die entgegengesetzte Ausdehnung der Zinkstäbe ausgeglichen.

Das *Metallthermometer* hat eine Spirale aus zwei miteinander verschweißten Streifen verschiedenen Metalls. Das eine Metall dehnt sich bei Erwärmung stärker aus als das andere. Die Spirale öffnet sich infolge der einseitigen Dehnung, der Zeiger rückt nach rechts. Bei Abkühlung zieht sich die Spirale wieder zusammen, der Zeiger rückt nach links. Die Skala wird mit Hilfe bekannter Temperaturen geeicht.

Auch in der Technik muß auf die Wärmeausdehnung Rücksicht genommen werden: Schienenstöße, Brückenlager, Stromzuführung bei Glühlampen, Eisenbeton (Eisen und Beton haben gleiche Ausdehnungskoeffizienten), Ausdehnung elektrischer Leitungen durch Stromwärme.



Bild 160
Rostpendel

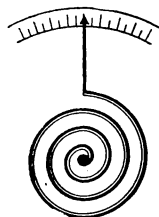


Bild 161
Metallthermometer

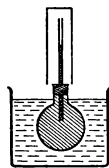


Bild 162
Wärmeausdehnung
einer Flüssigkeit

c) Ausdehnung flüssiger Körper

Grundversuch (Bild 162). Ein Glaskolben wird mit gefärbter Flüssigkeit gefüllt. Durch den Stopfen ist ein Glasrohr geführt. Bei Zimmertemperatur steht die Flüssigkeit wenige Millimeter über dem Stopfen. Bringt man den Kolben in ein Wasserbad von höherer Temperatur, so steigt die Flüssigkeit im Röhrchen und zeigt damit, daß die Flüssigkeit eine größere Ausdehnung hat als das Glas.

Messung (Bild 163). Das Steigrohr ist rechteckig gebogen und bei Versuchsbeginn vollständig mit Flüssigkeit gefüllt. Die bei Erwärmung ausfließende Menge wird im Meßzylinder aufgefangen,

sie gibt ΔV . Die Flüssigkeitsmenge V_1 bei vollständiger Füllung von Kolben und Ansatzrohr ist vor dem Versuch zu bestimmen.

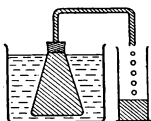


Bild 163
Bestimmung des
Ausdehnungs-
koeffizienten

Die Messung ergibt die Differenz zwischen dem Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit und dem des Glases.

Flüssigkeiten dehnen sich bei Erwärmung aus, mit Ausnahme des Wassers. Wasser zieht sich bei Erwärmung von 0° auf 4°C zusammen und dehnt sich bei weiterer Erwärmung wieder aus, bei $7,5^\circ$ erreicht es das gleiche Volumen wie bei 0° .

Anomalie¹ des Wassers (Bild 164). Das Wasser hat bei 4°C seine größte Dichte. Es zeigt auch unterhalb 0°C als Eis ein abweichendes Verhalten.

Bedeutung der Anomalie in der Natur: Gefrieren der Seen von oben nach unten, Ausdehnung beim Gefrieren, Spaltenfrost, Lockerung des Gesteins, Sprengwirkung gefrierenden Wassers.

d) Ausdehnung gasförmiger Körper

Grundversuch (Bild 165). Kolben und Steigrohr sind mit Luft gefüllt, das Rohr taucht in Wasser. Erwärmt man den Kolben mit

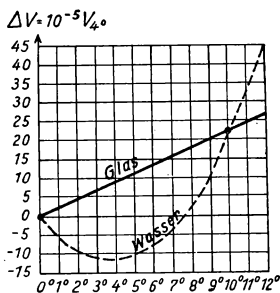


Bild 164. Anomalie des Wassers

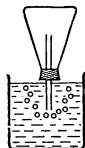


Bild 165. Wärmeausdehnung
eines Gases

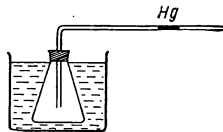


Bild 166. Bestimmung des
Ausdehnungskoeffizienten

¹ *nómos*, griech., das Gesetz, *a* = Vorsilbe der Verneinung, also nicht gesetzmäßiges Verhalten.

der Hand, so zeigen die aufsteigenden Luftblasen die Ausdehnung der Luft an. Bei Abkühlung des Kolbens steigt das Wasser in dem Röhrchen.

Messung (Bild 166). Das Steigrohr ist länger und rechtwinklig umgebogen. Die Luftmenge wird durch einen Quecksilbertropfen abgesperrt. Bei Eintauchen des Kolbens in lauwarmes Wasser bewegt sich der Quecksilbertropfen infolge der Ausdehnung der abgesperrten Luft mehrere Zentimeter nach rechts. Das Volumen des Kolbens und das des Rohres müssen vor dem Versuch genau bestimmt werden.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient γ ist für alle (idealen) Gase gleich, $\gamma = \frac{1}{273}$ des Volumens bei 0°C unter der Voraussetzung, daß die Erwärmung bei gleichbleibendem Druck erfolgt.

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right)$$

Wärmeausdehnungskoeffizienten

Linearer Ausdehnungskoeffizient		Kubischer Ausdehnungskoeffizient	
Beton	0,000 012	Äther	0,001 630
Eisen	0,000 012	Alkohol	0,001 100
Glas	0,000 009	Petroleum	0,000 96
Invar	0,000 001	Quecksilber	0,000 181
Messing	0,000 018	Gase $\frac{1}{273} =$	0,003 67
Quarzglas	0,000 005	des Volumens bei 0°C	
Kupfer	0,000 016		
Zink	0,000 036		
Aluminium	0,000 024		

2. Die Gasgesetze

a) Absolute Temperatur

Unter der Annahme, daß das Wärmeausdehnungsgesetz $V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right)$ auch für tiefe Temperaturen Gültigkeit hat, was jedoch nicht ohne Einschränkung zutrifft, ergibt sich zunächst rein rechnerisch: Für $t = -273^\circ \text{C}$ wird V_t gleich Null.

Der absolute Nullpunkt liegt bei $-273,16^\circ \text{C}$.

Absolute Temperatur (Kelvin¹-Skala) $T^\circ = 273^\circ + t^\circ \text{C}$

¹ Benannt nach dem engl. Physiker *Lord Kelvin* (1824 bis 1907).

b) Gesetz von Gay-Lussac

Aus der Ausdehnungsformel folgt: Bei gleichbleibendem Druck verhalten sich die Volumina einer Gasmenge wie die absoluten Temperaturen.

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2 ; \quad \text{Gesetz von Gay-Lussac}^1$$

Begründung: $V_1 = V_0 \left(1 + \frac{t_1}{273} \right); \quad V_2 = V_0 \left(1 + \frac{t_2}{273} \right);$

$$V_1 : V_2 = \frac{273 + t_1}{273} : \frac{273 + t_2}{273} = T_1 : T_2$$

c) Gesetz von Boyle-Mariotte

Das Gesetz erklärt das Verhalten der Gase bei gleichbleibender Temperatur, aber wechselndem Druck. Der Druck einer abgeschlossenen Gasmenge wird bestimmt durch die Höhe der Quecksilbersäule, die von der Gasmenge getragen wird, vermehrt um den äußeren Luftdruck.

$$76 \text{ cm}^3 \text{ Hg wiegen } 76 \cdot 13,6 \text{ p} = 1033 \text{ p}.$$

Bei konstanter Temperatur verhalten sich die Volumina einer Gasmenge umgekehrt wie ihre Drücke.

$$V_1 : V_2 = p_2 : p_1 \text{ oder } pV \text{ ist konst., wenn } t \text{ unverändert bleibt;} \\ \text{Gesetz von Boyle-Mariotte}^2$$

Zur experimentellen Bestätigung des Gesetzes dient das *Schlauchmanometer* (Bild 167). An einem über 2 m hohen Stativ sind zwei Glasrohre verschiebbar angebracht und durch einen dickwandigen Kautschukschlauch verbunden. Das linke Rohr ist durch einen Hahn verschließbar, das rechte offen. Bei offenem Hahn steht das Quecksilber in beiden Rohren gleich hoch. Durch Schließen des Hahns wird links ein bestimmtes Volumen abgeschlossen. Hebt man den rechten Manometerschenkel, so wird links die Luft zusammengedrückt. Der Höhenunterschied der Quecksilberkuppen,

¹ Franz. Chemiker und Physiker, 1778 bis 1850.

² 1660 von dem engl. Physiker *Boyle* gefunden, 1676 von dem franz. Physiker *Mariotte* näher untersucht.

vermehrt um den Luftdruck, ergibt den Druck, unter dem das abgesperrte Volumen steht.

Durch Kombination beider Gesetze nach der Dreisatzrechnung ergibt sich:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}; \text{ Zustandsgleichung der idealen }^1 \text{ Gase}$$

Setzt man in der Zustandsgleichung $V_1 = V_2$, so folgt:

$$p_1 : p_2 = T_1 : T_2$$

Anwendung. Luftthermometer von Jolly (Bild 168). Die Ablesung ist die gleiche wie beim Schlauchmanometer. Das konstante Luft-

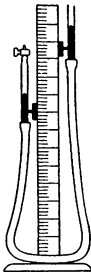


Bild 167. Schlauchmanometer

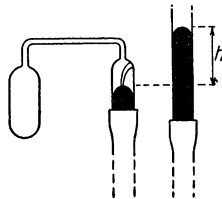


Bild 168. Luftthermometer

volumen läßt sich mit Hilfe einer in das Rohr eingeschmolzenen Glasspitze sehr genau einstellen. Durch Eintauchen des Kolbens in Eiswasser wird die Nullstellung bestimmt, der rechte Schenkel ist so hoch zu heben oder so tief zu senken, daß die Glasspitze die Quecksilberkuppe gerade berührt. Beim Eintauchen in eine Flüssigkeit unbekannter Temperatur ist wieder das gleiche Volumen herzustellen; dabei erhält man einen meßbaren Überdruck, aus dem sich T_2 berechnen läßt. Bei allen diesen Messungen ist zur Differenz der Quecksilberstände der äußere Luftdruck hinzuzurechnen.

¹ „ideal“ heißen Gase, die vom Sättigungspunkte so weit entfernt sind, daß die Gasgesetze gelten. Über Sättigungspunkt und Sättigungsdruck vgl. 4e.

d) Änderung der Wichte und der Dichte mit der Temperatur

Aus der Volumenänderung bei Erwärmung folgt, daß Wichte und Dichte von der Temperatur abhängig sind. In den Tabellen werden beide Größen meist für 0° C und 760 mm QS angegeben.

$$G = V_0 \gamma_0 = V_t \gamma_t = V_0 (1 + \gamma t) \gamma_t; \quad \gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \gamma t} \approx \gamma_0 (1 - \gamma t)^1$$

$$M = V_0 \varrho_0 = V_t \varrho_t = V_0 (1 + \gamma t) \varrho_t; \quad \varrho_t = \frac{\varrho_0}{1 + \gamma t} \approx \varrho_0 (1 - \gamma t)$$

Reduktion einer Gasmenge auf Normalvolumen:

$$V_0 = \frac{V p}{760} \cdot \frac{273}{T}$$

Gasgewicht: $G = V_0 \gamma_0 = V \frac{p}{760} \cdot \frac{273}{T} \cdot \gamma_0$

3. Messung der Wärmemenge (Kalorimetrie)

Das Thermometer mißt den Wärmezustand eines Körpers. Der gleiche Wärmezustand kann aber bei Körpern aus verschiedenen Stoffen durch sehr verschiedene Wärmemengen herbeigeführt werden. Die Einheit der Wärmemenge ist die Kalorie.

1 *Kilogrammkalorie* (kcal) ist die Wärmemenge, die 1 kg Wasser um 1° C, von 14,5° auf 15,5° C, erwärmt.

1 *Grammkalorie* (cal) ist die Wärmemenge, die 1 g Wasser um 1°, von 14,5° auf 15,5° C, erwärmt.

In der praktischen Kalorimetrie setzt man die Gewichte statt der Massen. Unterschiede entstehen daraus nicht, weil die meisten Wägungen ein Vergleichen von Massen sind.

Die Wärmemenge stellt einen Energiebetrag dar; denn Wärme ist eine Energieform (vgl. III, 6).

¹ Nach den DIN-Vorschriften sind die Wichten mit γ zu bezeichnen, aber auch der Ausdehnungskoeffizient der Gase. In der Formel $\gamma_t = \gamma_0 (1 - \gamma t)$ bedeuten γ_t und γ_0 die Wichten, γ den Ausdehnungskoeffizienten der Gase.

1 g Wasser erfordert zur Erwärmung um 1° 1 cal, 1 g eines anderen Stoffes braucht eine andere, meist geringere Wärmemenge zur gleichen Erwärmung.

Die *spezifische Wärme* eines Stoffes ist die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 g des Stoffes um 1° zu erwärmen.

$$\text{Wärmemenge} = \text{Masse} \times \text{spez. Wärme} \times \text{Temperaturänderung}$$

$$Q = m c (t_2 - t_1) \text{ cal oder kcal}$$

Spezifische Wärme c in cal/g oder kcal/kg

Platin, Gold, Blei . . .	0,03	Quecksilber	0,03
Kupfer, Zink, Messing .	0,09	Petroleum	0,50
Eisen, Nickel	0,11	Alkohol	0,57
Glas, Gestein	0,20	Wasser	1
Eis	0,50		

Zur Messung von Wärmemengen dienen die Kalorimeter (Bild 169).

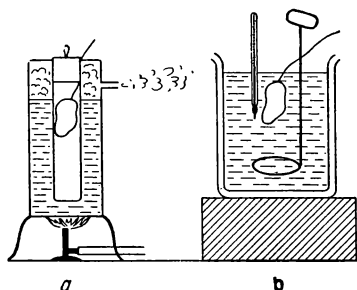


Bild 169. Bestimmung der spezifischen Wärme

Für die Berechnung gilt die *Richmannsche Regel*:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Wärmeverlust} \\ \text{des wärmeren Körpers} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Wärmegewinn} \\ \text{des kühleren Körpers} \end{array} \right.$$

Dabei ist die Wärmeaufnahme des Kalorimetergefäßes mit zu berücksichtigen (Wasserwert des Kalorimeters). Das Kalorimetergefäß wiege $m_k p$ (hier m_k g), das Kalorimetermaterial habe die spezifische Wärme c_k , dann ist der Wasserwert $W = m_k c_k$.

Bestimmung der spez. Wärme eines Stoffes im Wasserbad ($c = 1$), Mischtemperatur t_m :

$$m_1 x (t_1 - t_m) = m_2 l (t_m - t_2)$$

m_2 setzt sich zusammen aus der Masse des Wassers und dem Wasserwert des Kalorimeters $W = m_k c_k$. Das Kalorimeter kann auch zur Bestimmung hoher Temperaturen von kleinen Körpern benutzt werden, z. B. der Temperatur der Rotglut bei einer Eisenkugel. Über die spezifischen Wärmen von Gasen s. S. 115.

4. Änderung des Aggregatzustandes

a) Wärme als Molekularbewegung

Die Wärmezustände lassen sich einheitlich durch die Annahme erklären, daß die Wärme durch die Bewegungen der Molekeln bedingt wird, aus denen die Körper aufgebaut sind. In den festen Körpern sind die Molekeln durch Kohäsionskräfte (vgl. S. 22 und S. 60) stärker gebunden als in flüssigen Körpern. Die Molekeln führen bei Erwärmung immer raschere Schwingungen um eine Ruhelage aus. Der umgekehrte Fall tritt bei Abkühlung ein, und bei Erreichen des absoluten Nullpunktes würde die Molekularbewegung völlig zur Ruhe kommen. Der Übergang vom festen zum flüssigen Zustand (Schmelzen) besteht danach in einer Lockerung des Zusammenhaltes der Molekeln. Beim Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustand (Verdampfen) wird der Zusammenhalt so weit vermindert, daß die Kohäsionskräfte vollkommen überwunden werden. Das Gas erfüllt jeden ihm gebotenen Raum.

b) Schmelzen und Erstarren

Das Schmelzen setzt für jeden Stoff bei einer bestimmten Temperatur ein. Während des Schmelzens steigt die Temperatur trotz gleichmäßiger Wärmezuführung nicht, bis der letzte Rest geschmolzen ist. Der gleiche Vorgang in umgekehrter Reihenfolge läßt sich beim Erstarren einer Flüssigkeit beobachten.

$$\text{Schmelzpunkt} = \text{Erstarrungspunkt}$$

Der Schmelzpunkt von Lösungen und Legierungen liegt im allgemeinen tiefer als der der einzelnen Bestandteile. Weichlot hat als

Schmelzpunkt etwa 180°C , die Bestandteile Blei 327°C und Zinn 231°C . Die *Woodsche Legierung* schmilzt schon bei etwa 70°C . Beim Schmelzen findet in der Regel eine Volumenvergrößerung statt. Wasser bildet hierbei eine Ausnahme. Beim Erstarren des Wassers zu Eis nimmt das Volumen um etwa $\frac{1}{10}$ zu (Sprengwirkung des Eises).

Der Schmelzpunkt hängt vom äußeren Druck ab

Bei den meisten Körpern steigt der Schmelzpunkt mit wachsendem Druck, bei Eis wirkt der Druck sich in einer Herabsetzung des Schmelzpunktes aus: Erscheinung der Regelation bei Gletschern (Tauen unter Druck und Wiedergefrieren bei Druckentlastung). Versuch mit Eisblock und beschwertem Drahtbügel (Bild 170): Der Druck des Drahtes bringt das Eis unter dem Draht zum Schmelzen. Nach Druckentlastung frieren die beiden Teile des Blockes sofort wieder zusammen.

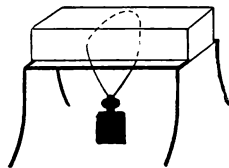


Bild 170. Regelation

Schmelzwärme ist die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg eines Stoffes aus dem festen in den flüssigen Zustand (gleicher Temperatur) überzuführen.

Schmelzwärme = Erstarrungswärme

Schmelzpunkte und Schmelzwärmen

Schmelzpunkt $^{\circ}\text{C}$	Schmelzwärme cal/g	Schmelzpunkt $^{\circ}\text{C}$	Schmelzwärme cal/g
Blei 327	5,92	Alkohol . . - 114	25,8
Eisen 1539	64	Quecksilber - 38,83	2,7
Platin 1773	24,1	Wasser . . . 0	79,7
Quarzglas . . 1700	—		

Lösungswärme. Beim Auflösen eines festen Stoffes in einer Flüssigkeit findet ebenfalls eine Lockerung des molekularen Zusammenhalts statt. Dazu wird Wärme verbraucht, die dem Lösungsmittel entzogen wird. Das Auflösen ist mit einem Sinken der Temperatur

verbunden. Ein Beispiel hierfür ist die Kältemischung: 4 Teile Eis, 1 Teil Salz ergeben eine Temperatur von etwa -20°C .

c) Verdampfen und Kondensieren

Verdunsten nennt man den Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand unterhalb des Siedepunktes. Die Wärme zur Lockerung des Molekulargefüges wird der Flüssigkeit entzogen; diese kühlt sich ab. Kühlwirkung poröser angefeuchteter Tongefäße.

Verdampfen heißt die Überführung vom flüssigen in den gasförmigen Zustand unter äußerer Wärmezufuhr durch Sieden. Der Siedepunkt steigt mit dem äußeren Druck, weil die Molekeln den äußeren Druck überwinden müssen, um die Flüssigkeit verlassen zu können.

In den Tabellen werden die Siedepunkte für den Normaldruck 760 mm QS angegeben.

Normalsiedepunkte

Alkohol	78,4° C	Glycerin	290° C
Äther	34,7° C	Quecksilber	357° C
Benzol	80,1° C	Kohlendioxyd	— 78,5° C
Wasser	100° C	Ammoniak	— 33,4° C

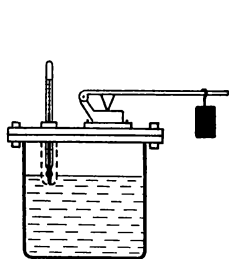


Bild 171
Papinscher Topf

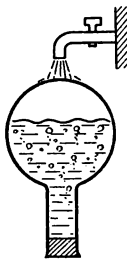


Bild 172
Sieden bei Unterdruck

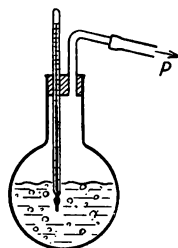


Bild 173
Sieden bei Unterdruck

Das Steigen des Siedepunktes mit wachsendem äußerem Druck zeigt der *Papinsche Topf* (Bild 171) (Kochkessel mit Schraubverschluß). Herabsetzen des Druckes setzt den Siedepunkt herab.

Sieden bei Unterdruck. Versuch: Heißes Wasser in verschlossener Kochflasche fängt erneut an zu siedeln, wenn der Dampfraum abgekühlt wird (Bild 172). (Vorsicht!)

Sieden ohne äußere Wärmezufuhr durch Abpumpen des Dampfes über der Flüssigkeit (Bild 173). Der Kolben wird bei Beginn des Versuchs mit nahezu kochendem Wasser gefüllt. An das Dampfrohr ist die Wasserstrahlluftpumpe angeschlossen.

Abhängigkeit des Siedepunktes des Wassers vom äußeren Druck [b]

in mm QS	in °C	in mm QS	in °C	in mm QS	in °C
690	97,31	730	98,87	770	100,37
700	97,71	740	99,25	780	100,73
710	98,10	750	99,63	790	101,01
720	98,49	760	100	800	101,44

Die Tabelle kann auch umgekehrt bei der Messung des Luftdrucks mit dem Siedethermometer angewendet werden.

Druck in at = kp/cm² und Siedepunkt [t° C]

p	t	p	t	p	t
1	99,09	4	142,92	7	164,17
2	119,62	5	151,11	8	169,61
3	132,88	6	158,08	9	174,53
				10	179,04

Verdampfung tritt bei einigen festen Körpern auf, ohne daß vorher ein Schmelzen stattfindet: *Sublimieren* (Trockeneis = festes Kohlendioxyd).

Die Umkehrung des Verdampfungsvorganges ist das *Kondensieren*.

Verdampfungswärme ist diejenige Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg eines Stoffes aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand zu überführen. Während des Verdampfungsvorganges ändert sich die Temperatur nicht (gleichbleibende Siedetemperatur).

Verdampfungswärme = Kondensationswärme
--

Experimentell einfacher ist die Bestimmung der Kondensationswärme (Bild 174).

Der Dampf aus dem Kolben gelangt durch ein rechteckig gebogenes Rohr in das Kühlwasser und kondensiert hier. Anfangsmenge des Kühlwassers und Anfangstemperatur werden gemessen. Aus der Endtemperatur des Kühlwassers und der Mengenzunahme läßt sich die kondensierte Dampfmenge und die erfolgte Wärmeabgabe ermitteln.

Verdampfungswärme am Normalsiedepunkt

Wasser	539 cal
Alkohol	207 cal
Äther	88,4 cal

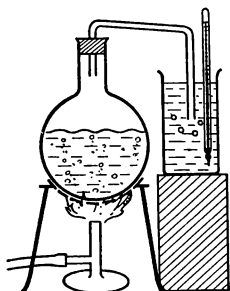


Bild 174. Bestimmung der Kondensationswärme

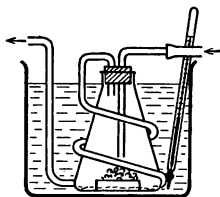


Bild 175. Bestimmung der Verbrennungswärme

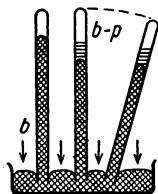


Bild 176 Dampfdruck

d) Verbrennungswärme (Heizwert)

Die Verbrennungswärme ist die Wärmemenge, die beim Verbrennen von 1 kg eines festen Stoffes oder 1 m³ eines Gases frei wird. Bild 175. Die Verbrennung geschieht unter Sauerstoffzufuhr am Boden eines Glaskolbens. Die Verbrennungsgase werden durch ein Schlangenrohr geleitet und geben ihre Wärme an das Kalorimeter ab.

Heizwerte einiger Brennstoffe in cal/g

Steinkohle	7100 ... 7800	Holz	3600 ... 4000
Gaskoks	7800	Spiritus	7000
Braunkohlenbrikett	6500	Benzin	10400
Rohbraunkohle	4500	Leuchtgas	4400 ... 5000

e) Gesättigter und ungesättigter Dampf

Dampfbildung im Vakuum. Bringt man einen Tropfen Wasser in den luftleeren Raum einer Barometerröhre, so verdampft er, die Queck-

silbersäule wird herabgedrückt (Bild 176). Bei Neigen der Röhre, also Verkleinern des Dampftraumes, findet Kondensation statt. Dampfdruck und Quecksilbersäule stehen im Gleichgewicht. Alkohol und Äther zeigen stärkere Dampfdrücke als Wasser. Weitere Verdampfung läßt sich durch Erwärmen, Kondensation durch Abkühlen der Barometerröhre erreichen.

Ein Raum ist mit Dampf gesättigt, wenn außer dem Dampf noch Flüssigkeit vorhanden ist. Beide stehen im dynamischen Gleichgewicht.

Der Sättigungsdruck ist der größte Druck, den der Dampf bei einer bestimmten Temperatur haben kann. Der Sättigungsdruck steigt mit der Temperatur, ihm entspricht eine bestimmte *Sättigungsmenge*.

Erwärmt man den gesättigten Dampf im oberen Teil einer Barometerröhre weiter, so fällt das Quecksilber. Der dadurch vergrößerte Raum ist nicht mehr mit Dampf gesättigt, dieser ungesättigte Dampfgehört den Gasgesetzen.

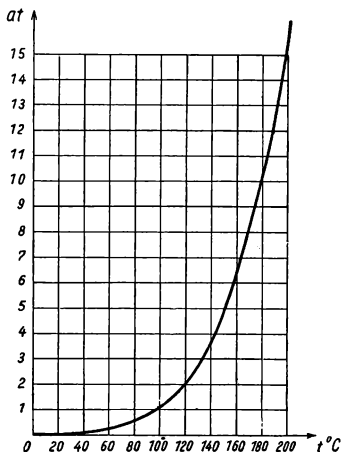


Bild 177. Dampfdruckkurve

Ungesättigte Dämpfe verhalten sich wie Gase, die Gasgesetze gelten aber nicht mehr in der Nähe des Kondensationspunktes.

Dampfbildung im luftgefüllten Raum

Sättigungsdruck und Sättigungsmenge sind unabhängig davon, ob im Raum noch andere Gase vorhanden sind (z. B. Luft).

Gesetz von Dalton: In einem Gasgemisch ist der Gesamtdruck gleich der Summe der Teildrücke.

Die Spannkraft (Sättigungsdruck) des Wasserdampfes bei den Temperaturen 0 bis 200°C zeigt das Diagramm (Bild 177).

Sättigungsdruck p in mm QS und Sättigungsmenge m in g/cm³ für gesättigten Wasserdampf

t°	p	m	t°	p	m	t°	p	m
-10	2	2,1	11	9,8	10,0	21	18,6	18,3
-5	3	3,2	12	10,5	10,7	22	19,8	19,4
0	4,6	4,8	13	11,2	11,4	23	21,1	20,6
+1	4,9	5,2	14	12,0	12,1	24	22,4	21,8
2	5,3	5,6	15	12,8	12,8	25	23,8	23,0
3	5,7	6,0	16	13,6	13,6	26	25,2	24,4
4	6,1	6,4	17	14,5	14,5	27	26,7	25,8
5	6,5	6,8	18	15,5	15,4	28	28,3	27,2
6	7,0	7,3	19	16,5	16,3	29	30,0	28,7
7	7,5	7,8	20	17,5	17,3	30	31,8	30,3
8	8,0	8,3						
9	8,6	8,8						
10	9,2	9,4						

Sättigungsdrücke einiger Flüssigkeiten (p in mm QS)

Temperatur	Wasser	Alkohol	Äther
-10	2,0	6,5	113
0	4,6	12,5	185
+10	9,2	24,1	286
20	17,4	44,1	440
30	31,5	78,4	636
40	55,0	133,5	924
50	92,0	215,0	1270
60	149,2	351,0	1740
70	233,1	541,2	2302
80	354,6	812,0	3000
90	525,5	1188,4	3898
100	760,0	1692,0	4952

In der Wetterkunde spielen folgende Begriffe eine Rolle:

Absolute Feuchtigkeit = tatsächlicher Wasserdampfgehalt der Luft

Relative Feuchtigkeit = $\frac{\text{tatsächliche Wasserdampfmenge}}{\text{mögliche Wasserdampfmenge}}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{bei gegebe-} \\ \text{ner Tem-} \\ \text{peratur} \end{array} \right.$

Die tatsächliche Wasserdampfmenge wird mit dem *Taupunktzeiger* (Bild 178) bestimmt. Durch Verdunstung kann die Temperatur des Metallspiegels an der Vorderseite des mit Äther gefüllten Gefäßes so weit herabgedrückt werden, daß hier Kondensation eintritt (Beschlagen). Die zugehörige Temperatur wird an einem Thermometer abgelesen, das in das mit Äther gefüllte Gefäß taucht. Aus der Tabelle läßt sich die zu dieser Temperatur gehörige Sättigungsmenge entnehmen. Die relative Feuchtigkeit wird in Prozenten angegeben.

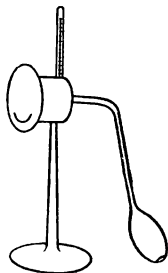


Bild 178
Taupunktzeiger

f) Verflüssigung der Gase

Da ungesättigte Dämpfe sich wie Gase verhalten, müssen umgekehrt Gase durch Steigern des Drucks oder durch Herabsetzen der Temperatur sich in Dampf und Flüssigkeit überführen lassen. Für jedes Gas gibt es aber eine bestimmte Temperatur, oberhalb welcher eine Verflüssigung trotz Anwendung höchster Drücke nicht möglich ist. Diese Temperatur heißt *kritische Temperatur*, der bei der kritischen Temperatur zur Verflüssigung nötige Druck *kritischer Druck*.

Kritische Temperatur, kritischer Druck und Normalsiedepunkt

	$t^{\circ}\text{C}$	$p_k[\text{at}]$	$\text{Sp}^{\circ}\text{C}$		$t^{\circ}\text{C}$	$p_k[\text{at}]$	$\text{Sp}^{\circ}\text{C}$
Wasserdampf	374°	217	100°	Sauerstoff	-119°	50	-183°
Ammoniak	132°	112	-33°	atm. Luft	-141°	37	-193°
Kohlendioxyd	+31°	73	-78,5°	Stickstoff	-147°	33,5	-196°
				Wasserstoff	-240°	12,8	-253°

Die Verdampfung verflüssigter Gase bei Druckverminderung geht rasch vor sich, die dazu nötige Wärme wird der Umgebung entzogen. Ausströmendes flüssiges Kohlendioxyd bildet infolge der Abkühlung Kohlendioxydschnee.

Auf dem Wärmeentzug bei rascher Verdampfung (Expansion) beruhen die *Kältemaschinen* (Bild 179). Sie arbeiten mit verflüssigtem Schwefeldioxyd, verflüssigtem Ammoniakgas, Kohlendioxyd oder Frigen.

Die aus dem Reduzierventil (R) ausströmende Flüssigkeit verdampft in einem Röhrensystem, das die Kühlflüssigkeit (Salz-

lösung) durchzieht. Nach der Expansion wird das Gas erneut komprimiert und vorgekühlt.

Linde-Verfahren zur Verflüssigung von Luft (1895) (Bild 180):
Ein Kompressor drückt verdichtete Luft durch einen Kühlapparat.

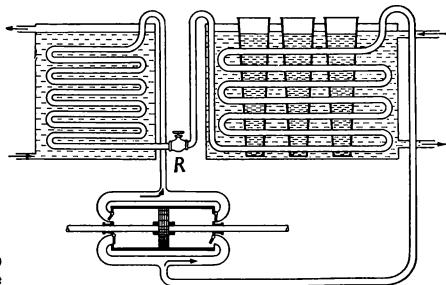


Bild 179
Kältemaschine

Die vorgekühlte Luft passiert das Reduzierventil (R) und expandiert. Dabei tritt weitere Abkühlung ein. Die abgekühlte Luft geht durch den Gegenstromapparat (G) zum Kompressor zurück. Im Gegen-

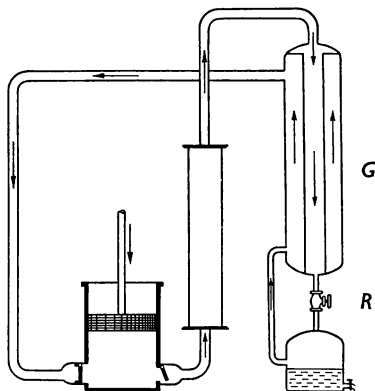


Bild 180
Verflüssigung
der Luft,
Linde-Verfahren

stromapparat kühlt sich die zum Reduzierventil fließende Luft weiter ab. Die stufenweise Abkühlung führt unter die kritische Temperatur und dann zur Verflüssigung.

5. Wärmeübertragung

Wärme wird übertragen durch Leitung, Strömung und Strahlung.

a) Wärmeleitung

Die besten Wärmeleiter sind die Metalle. Zwischen Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Leitfähigkeit besteht ein Zusammenhang.

Das Wärmeleitvermögen wird aus der Anzahl der transportierten Kalorien bestimmt. Die beste Leitfähigkeit zeigt Silber. Setzt man die *Leitfähigkeit* von Silber gleich 100, so folgen für die anderen Metalle die relativen Wärmeleitfähigkeiten.

Kupfer 90, Zink 27, Eisen 14 bis 17, Zinn 15, Blei 8, Neusilber 6.

Schlechte Wärmeleiter sind Glas (0,2) und Holz, die schlechtesten ruhende Gase. Wärmeisolierstoffe sind porös, die in den Poren ent-



Bild 181. Flüssigkeiten sind schlechte Wärmeleiter

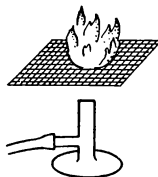


Bild 182. Ableitung der Wärme durch das Drahtnetz

haltene Luft dient als Isolationsmittel. Auch ruhende Flüssigkeiten sind schlechte Wärmeleiter.

Versuche:

1. Ein beschwertes Eisstückchen im Probierglas schmilzt nicht, wenn das darüber befindliche Wasser oben bis zum Sieden erhitzt wird (Bild 181).
2. Eine Gasflamme brennt über dem Drahtnetz, solange dieses die Wärme ableitet. Das Gas unterhalb des Netzes erreicht die Entzündungstemperatur nicht (Bild 182).

b) Wärmerörmung

Der Wärmeausgleich in Flüssigkeiten und Gasen geschieht aber vorwiegend durch Strömung (Konvektion). Eine Wärmerörmung kann sich nur ausbilden, wenn die Flüssigkeit von unten her erwärmt oder von oben her abgekühlt wird.

Grundversuch. Erwärmen des rechteckigen Röhrensysteins an einer unteren Ecke. Durch Einstreuen von Farbstoff läßt sich die Strömung sichtbar machen (Bild 183).

c) Wärmestrahlung

Heiße Körper strahlen Wärme aus, das Zwischenmittel Luft oder das Vakuum wird dabei ohne merkliche Erwärmung durchsetzt. Die Sonnenstrahlen gehen durch den kalten Weltraum und liefern je cm^2 senkrecht bestrahlter Fläche bis zu 2 cal/min (*Solar-*

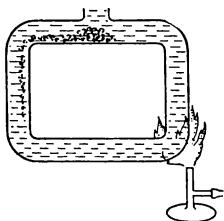


Bild 183. Wärmerörmung

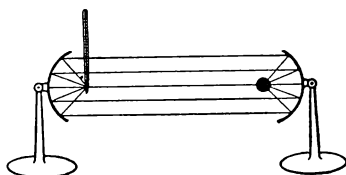


Bild 184. Wärmestrahlung

konstante). Je nach der Oberflächenbeschaffenheit absorbiert der bestrahlte Körper die Wärme mehr oder weniger. Körper, die die Wärmestraahlen stark absorbieren, strahlen auch selbst große Wärmemengen aus (rauhe schwarze Oberflächen!). Für die Wärmestraahlen gelten die gleichen Gesetze der Reflexion und Brechung wie für Lichtstrahlen (vgl. IV, 3 und 4).

Versuch. Eine heiße Metallkugel befindet sich im Brennpunkt eines Hohlspiegels. Die gestrahlte Wärme konzentriert sich im Brennpunkt des zweiten Spiegels, der Zwischenraum bleibt kühl (Bild 184). Näheres über Wärmestrahlung vgl. Abschnitt über Strahlung.

6. Arbeit und Wärme

Wärme ist eine Form der Energie. Beispiele für die Umsetzung mechanischer Arbeit in Wärme bieten das Sägen, Feilen, Bohren.

Robert Mayer¹ hat als erster ausgesprochen, daß die Umwandlung von Arbeit in Wärme in einem bestimmten Maßverhältnis stattfindet.

$$427 \text{ kpm} \cong 1 \text{ kcal}; \text{ Mechanisches Wärmeäquivalent}$$

Erster Hauptsatz der Wärmelehre: Arbeit und Wärme sind verschiedene Formen der Energie. Einer Arbeit von 427 kpm entspricht die Wärmemenge 1 kcal.

Bei der Bestimmung des Wärmeäquivalents nach *Wildermuth* (Bild 185) wird die Reibungsarbeit des Bremsbandes in Erwärmung des Kupferzylinders umgesetzt.

Gase haben zwei verschiedene Werte der spezifischen Wärme, je nachdem die Erwärmung bei konstantem Druck (c_p) oder bei kon-

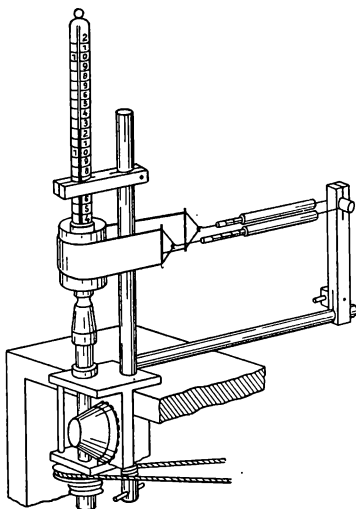


Bild 185. Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents nach *Wildermuth*

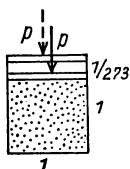


Bild 186. Berechnung des Wärmeäquivalents durch Robert *Mayer*

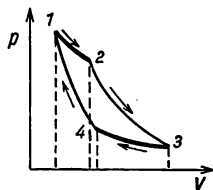


Bild 187. Kreisprozeß

stantem Volumen (c_v) stattfindet. Erwärmt man eine Gasmenge unter konstantem Druck (beweglicher Stempel), so wird ein Teil

¹ 1814 bis 1878, Arzt und Naturforscher in Heilbronn.

der zugeführten Wärme dazu gebraucht, um gegen den Luftdruck den Stempel zu heben, nur ein Teil steigert die Bewegung der Gasmolekeln, ergibt also eine Temperaturerhöhung. Bei einer fest abgeschlossenen Gasmenge wird die gesamte zugeführte Wärme in Bewegungsenergie der Molekeln verwandelt, die Temperatur steigt höher.

$$c_p > c_v; \quad \frac{c_p}{c_v} = \kappa \text{ hat für zweiatomige Gase den Wert } 1,41.$$

Aus den Beträgen für c_p und c_v hat *Robert Mayer* das mechanische Wärmeäquivalent errechnet (Bild 186).

Die Umwandlung von Wärme in Arbeit gelingt nie restlos, immer geht dabei ein Teil der Wärme unverwandelt von einem Körper höherer Temperatur (Kessel) auf einen Körper niedriger Temperatur (Kühler) über. Das Gedankenexperiment von *Carnot* führt auf einen Kreisprozeß, bei dem ein Gas oder eine Flüssigkeit zum Zwecke der Arbeitsgewinnung Druck- und Temperaturänderungen ausgesetzt wird und am Schluß wieder in den Anfangszustand zurückkehrt.

Der *Kreisprozeß* (Bild 187) setzt sich aus 2 Isothermen¹ und 2 Adiabaten² zusammen. Trägt man in einem Diagramm als Ordinaten die Werte für p und als Abszissen die Werte für V ein, die sich aus dem *Boyle-Mariotteschen* Gesetz ergeben, so erhält man als Bildkurve einen Ast einer gleichseitigen Hyperbel. Diese Kurve heißt *Isotherme*. Bei einer isothermen Änderung wird die zugeführte Wärme voll in Arbeit umgewandelt (Volumenvergrößerung), oder es wird umgekehrt bei Volumenverkleinerung Wärme frei. Es ist $p_1 : p_2 = V_2 : V_1$ (*Boyle-Mariotte*).

Für adiabatische Änderungen (rasche Kompression oder Expansion) gilt das Gesetz von *Poisson*:

$$p_1 : p_2 = V_2^\kappa : V_1^\kappa, \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} \text{ oder } T_1 : T_2 = p_1 V_1 : p_2 V_2 = (V_2 : V_1)^{\kappa-1}.$$

Hierbei wird innere Energie in Arbeit umgewandelt, bei Expansion kühlt sich das Gas ab, bei Kompression erwärmt es sich ent-

¹ isos, griech., gleich, thermos, griech., Wärme.

² a griech. Vorsilbe der Verneinung, diabeinein hindurchgehen. Der Vorgang, der durch die Adiabate dargestellt wird, verläuft so rasch, daß ein Temperatúrausgleich nicht stattfinden kann.

sprechend. Auf die äußere Arbeit sind die Adiabaten ohne Einfluß, sie verlaufen wegen des Exponenten κ steiler als die Isothermen. Die geleistete Arbeit ist $Q_1 - Q_2$, wenn Q_1 die auf der Isotherme 1 2 aufgenommene Wärmemenge, Q_2 die auf der Isotherme 3 4 abgegebene Wärmemenge bedeuten. Daraus ergibt sich der thermische Wirkungsgrad $= \frac{\text{gewonnene Arbeit}}{\text{zugeführte Wärme}}$.

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Der thermische Wirkungsgrad kann den Höchstwert 1 nur dann erreichen, wenn T_2 auf den absoluten Nullpunkt gebracht wird.

Bei einer Dampfmaschine mit der Kesseltemperatur 180°C und der Kühlwassertemperatur 50°C ist $\eta = \frac{130}{453} = 29\%$. Wegen der Reibungswärme und Kesselstrahlung erreicht eine Dampfmaschine aber kaum über 25%.

Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre: Die Verwandlung von Wärmeenergie in Arbeit ist stets nur zum Teil möglich, der andere Teil geht als Wärme in Körper geringerer Temperatur über.

Fassung von Planck. Es ist keine Maschine möglich, die einem Wärmebehälter Wärme entzieht und in Arbeit umwandelt, ohne daß dabei noch andere Veränderungen vorgehen.

Die bei allen Bewegungsvorgängen durch Reibung entstehende Wärme und die dem Kühlwasser zugeführten Wärmemengen führen zu Energieformen, die nicht weiter nutzbar gemacht werden können. Als Maß dieser Entwertung der Energie hat *Clausius* den Begriff der *Entropie* eingeführt:

Die Entropie bleibt unverändert bei umkehrbaren Prozessen (Kreisprozeß). Jeder natürliche Prozeß verläuft aber so, daß die Entropie wächst.

7. Wärmekraftmaschinen

a) Dampfmaschinen

Der Druck von Dämpfen, die mit der Stammflüssigkeit in Verbindung stehen, steigt mit zunehmender Temperatur rasch an

Kühlwasserbehälter. Im ersten Fall muß er den äußeren Luftdruck überwinden, dadurch geht 1 at für die Arbeit verloren. Bei der Arbeitsberechnung ist von dem im Zylinder herrschenden Dampfdruck 1 at zur Überwindung des Außendrucks abzuziehen. Im zweiten Fall wird der Dampf im Kühlwasser kondensiert, der Druck sinkt auf nahezu Null, jetzt ist der volle Dampfdruck bei der Arbeitsberechnung zu berücksichtigen.

Die *Expansionsmaschinen* sind Sparmaschinen; der Dampf wird nach $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ des Kolbenweges abgesperrt. Durch die Expansion des im Zylinder abgesperrten Dampfes wird der Kolben weiter bis an das Ende des Zylinders getrieben. Dabei sinkt der Dampfdruck stärker, als die Gasgesetze es ergeben würden (adiabatisch). Während der vollen Dampfwirkung berechnet sich die Arbeit wie bei der Volldruckmaschine, nur beträgt der Weg $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ des Kolbenhubs. Nach Absperren der Dampfzufuhr leistet der im Zylinder eingeschlossene Dampf durch seine Expansion noch zusätzliche Arbeit. Die Gesamtleistung einer Sparmaschine ist geringer als die einer Volldruckmaschine gleichen Ausmaßes, aber ihr Betrieb ist wirtschaftlicher, weil je geleistete PS nur $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ des Dampfes gebraucht wird.

Der Wirkungsgrad η der Dampfmaschinen erreicht höchstens 25%. Den geringen Wirkungsgrad läßt die folgende Überschlagsrechnung erkennen. 1,1 kp Kohle vom Heizwert 5500 kcal liefert erfahrungsgemäß eine Stunde lang 1 PS. Das entspricht einer Arbeit von $75 \cdot 3600 \text{ kpm} = 270000 \text{ kpm}$. Die aufgewendete Kohle hat aber einen Arbeitswert von $1,1 \cdot 5500 \cdot 427 \text{ kpm} = 2583350 \text{ kpm}$. Die gewonnene Arbeit beträgt nur 10,4% der aufgewendeten Energie. Durch technische Verbesserungen hat sich der Nutzeffekt nur wenig steigern lassen. Der größte Teil der Wärme geht mit den Feuerungsgasen durch den Schornstein in die Luft, ein weiterer Teil geht durch Wärmestrahlung verloren, ein nicht unwesentlicher Teil bei der Kondensation des Abdampfes, ein geringer Teil dient außerdem zur Überwindung der Reibungskräfte.

b) Dampfturbinen

In der Dampfturbine wird der Dampfdruck direkt in Drehbewegung umgesetzt. Ähnlich wie bei der *Pelton*-Wasserturbine strömt der Dampf aus einer Düse gegen ein Schaufelrad und setzt dieses in Umdrehung. Gleichzeitig mit der Wucht des ausströmenden Dampf-

fes wirkt die Expansion. Der weiterströmende Dampf wird von festen Leiträdern dem nächsten Laufrad zugeführt (Bild 189). Bei abnehmendem Druck nimmt das Dampfvolumen zu. Deshalb sind die auf gleicher Achse montierten Laufräder stufenweise größer. Die Turbinen sind den Dampfmaschinen wegen ihres ruhigen Ganges und des höheren Wirkungsgrades (bis 30%) überlegen. Ein Nachteil liegt in der hohen Drehzahl, die durch Zahnradgetriebe herabgesetzt werden muß. Turbinen werden vor allem zum Antrieb von Generatoren in Kraftwerken und als Schiffsturbinen verwendet. 1924 hat Zoelly eine Turbinenlokomotive konstruiert.

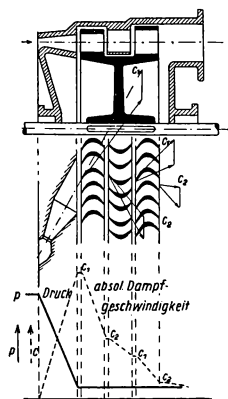


Bild 189. Curtis-Turbine

c) Verbrennungskraftmaschinen

Im *Explosionsmotor* (Otto und Langen, 1865) wird die Verbrennung des Kraftstoffes in den Zylinder verlegt. Dadurch werden die Wärmeverluste, die die Dampfmaschine so unrationell machen, vermieden, dafür steigen aber die Anforderungen an Zylinder- und Kolbenmaterial. Als Kraftstoff dient Gas oder ein Gemisch von Luft und Leichtöl, das aus dem Vergaser in den Zylinder gesaugt oder bei Hochleistungsmotoren durch eine Pumpe eingepreßt wird. Gas oder Brennstoffgemisch werden im Augenblick der stärksten Kompression durch elektrische Zündung zur Explosion gebracht und ergeben den Kraftstoß auf den Kolben.

Zwei Formen von Motoren sind zu unterscheiden:

1. Viertaktmotor (Bild 190):

1. Takt, *Ansaugtakt*. Durch das Schwungrad wird der Kolben durch Vermittlung von Kurbel und Pleuelstange nach unten gezogen. Der Zylinderraum wird größer, der Unterdruck saugt durch das Einlaßventil das Brennstoffgemisch in den Zylinder.

2. Takt, *Verdichtung*. Einlaß- und Brennstoffventil sind geschlossen. Das Gemisch wird durch den hochgehenden Kolben komprimiert.

eingespritzte flüssige Schweröl sofort verbrennt. Der Druck der Verbrennungsgase treibt den Kolben zurück.

Dieselmotoren werden meist als Viertaktmotoren gebaut. Der Vorteil des Dieselmotors liegt in der Verwendung des billigeren Schweröls und im Fortfall der komplizierten Zündvorrichtung.

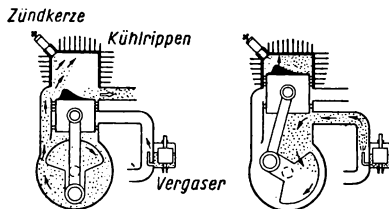


Bild 191. Zweitaktverfahren

Dieselmotoren haben sich vor allem als Lastwagenmotoren und als Schiffsmotoren bewährt. Sie sind bedeutend schwerer als Explosionsmotoren gleicher Leistung.

Der Wirkungsgrad der Motoren liegt bei etwa 35%. Bei allen Motoren ist durch äußeren Antrieb des Schwungrades (Anlasser) der Explosionsvorgang einzuleiten. Bei Dieselmotoren macht das Anlassen mehr Schwierigkeiten, weil die komprimierte Luft erst dann die zur Verbrennung notwendige Hitze erreicht, wenn der Zylinder warm geworden ist.

IV. Optik

A. Geometrische Optik

1. Lichtausbreitung

a) Lichtquellen

Licht ist Energie, die sich durch Strahlung fortpflanzt. Im Gegensatz zum Schall geht das Licht auch durch den leeren Raum. Lichtquellen sind meist Körper hoher Temperatur (Kohlenstifte der Bogenlampe, glühender Draht in der Glühlampe, Sonne, Fixstern), doch kommen auch Lichterscheinungen bei niederen Temperaturen vor (Entladung in gasgefüllten Röhren, Neonlicht, Leuchten von Phosphor- und Uranpräparaten).

Die geometrische Optik umfaßt die Gebiete, in denen die Lichtausbreitung als geradlinig gelten kann. Diese geradlinige Aus-

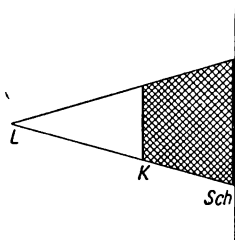


Bild 192. Kernschatten

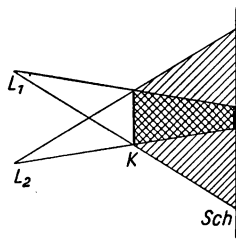


Bild 193. Kernschatten und Halbschatten

breitung läßt der Kernschatten und Halbschatten erkennen. Bei punktförmiger Lichtquelle entsteht hinter dem undurchsichtigen Körper ein Kernschattengebiet (Bild 192), bei zwei oder mehreren Lichtquellen Kernschatten und Halbschatten (Bild 193).

b) Lichtgeschwindigkeit

Das Licht als Energiestrahlung braucht zu seiner Ausbreitung eine gewisse Zeit. Das ist erst im 17. Jahrhundert erkannt worden; bis

dahin hielt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit für unmeßbar groß.

Lichtgeschwindigkeit $c = 300\,000 \text{ km/s}$
--

Genauere Werte (*Michelson* 1927): $299\,796 \text{ km/s} \pm 4 \text{ km/s}$
 (*Pease* und *Pearson*): $299\,774 \text{ km/s} \pm 4 \text{ km/s}$

Astronomische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

1. *Olaf Römer*, ein dänischer Astronom, hat beobachtet (1676), daß die Umlaufzeit des 1. Jupitermondes nicht konstant zu sein scheint. Die Berechnung der Umlaufzeit ergibt $42\frac{1}{2}$ Stunden. Befindet sich die Erde in der Stellung E_1 oder E_3 , so stimmen beobachtete und berechnete Zeit überein. Auf dem Wege von E_1 über

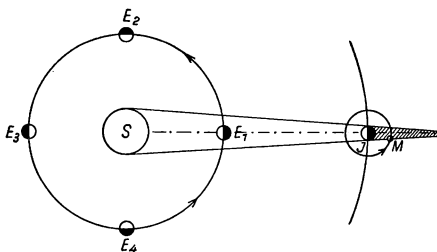


Bild 194. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach *Olaf Römer*

E_2 nach E_3 entfernt sich die Erde vom Jupiter, die beobachtete Umlaufzeit nimmt zu, weil der Lichtweg durch die wachsende Entfernung von der Erde zwischen zwei Verfinsterungen des Jupitermondes zunimmt. Auf dem Wege von E_3 über E_4 nach E_1 nähert sich die Erde dem Jupiter, die beobachtete Umlaufzeit ist kleiner als die errechnete, weil jetzt die Erde dem Licht entgegen-eilt. Aus der Summe dieser Differenzen während der Zeit, in der die Erde von E_1 nach E_3 gelangt, hat *Olaf Römer* die Zeit berechnet, die das Licht braucht, um die Erdbahn zu durchqueren (Bild 194).

2. *Bradley* bestimmte 1728 die Lichtgeschwindigkeit aus der Aberration¹ des Fixsternlichtes. Infolge der Bewegung der Erde um

¹ aberrare, lat., abirren, abweichen.

die Sonne beschreibt ein senkrecht über der Erdbahn stehender Stern im Laufe eines Jahres scheinbar einen Kreis, ein unter geringerem Winkel über der Erdbahn stehender Stern eine Ellipse. Kreishalbmesser und große Halbachse der Ellipse erscheinen unter dem gleichen Sehwinkel $20,6''$. Dieser Winkel bestimmt das Verhältnis der Erdgeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit (Vergleich mit der Schrägstellung des Dampferschornsteins).

Terrestrische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

3. Die Bestimmung nach *Fizeau* benutzt die senkrechte Reflexion eines Lichtstrahls, der durch Rotation eines Zahnrades (*Z*) kurzfristig unterbrochen werden kann. Bei wachsender Drehgeschwindigkeit des Zahnrades verdunkelt sich das Gesichtsfeld, weil der reflek-

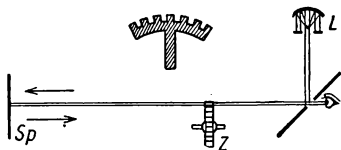


Bild 195. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach *Fizeau*

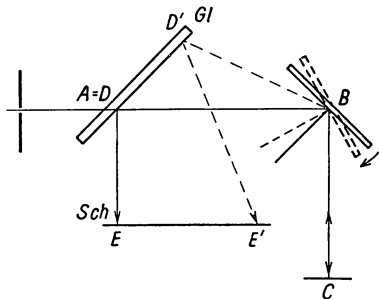


Bild 196. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach *Foucault*

tierte Strahl, der auf dem Hinweg durch eine Lücke gegangen ist, beim Rückweg auf einen Zahn des Rades trifft. Aus der Rotationsgeschwindigkeit des Zahnrades und der Entfernung des reflektierenden Spiegels läßt sich die kurze Zeit für den Hin- und Rückweg und die Lichtgeschwindigkeit bestimmen (Bild 195).

4. Bestimmung von *Foucault* (1862). Nach dem Reflexionsgesetz dreht sich der reflektierte Lichtstrahl um den Betrag 2α , wenn sich der reflektierende Spiegel um α dreht. *Gl* ist eine schräggestellte Glasplatte, durch die das Licht teilweise hindurchgeht, zum Teil reflektiert wird. Aus der Verschiebung des reflektierten Strahls bei bekannter Drehgeschwindigkeit des Spiegels läßt sich die Zeit, die der Lichtstrahl braucht, um den Weg von *B* nach *C* und zurück zu durchlaufen, und damit auch die Lichtgeschwindigkeit berechnen (Bild 196).

Die Methode von *Foucault* hat *Michelson* vervollkommenet. An Stelle des ebenen Spiegels benutzte er einen achtseitigen Drehspeigel, der mit Druckluft angetrieben wurde. Der Lichtweg betrug 70 km.

2. Photometrie

a) Grundgesetze und Einheiten

Die von einer punktförmigen Lichtquelle in einer Sekunde ausgestrahlte Lichtmenge ergibt den Gesamtlichtstrom Φ_0 .

Die Einheit des Lichtstroms ist 1 *Lumen* (lm).

Der Lichtstrom Φ_0 trifft die Innenfläche einer Kugel vom Radius 1 m. Auf dieser Kugelfläche ist ein Stück ω abgegrenzt, diese Fläche ω bildet mit der Lichtquelle als Spitze einen Kegel, den Lichtkegel vom Raumwinkel ω .

Die Lichtstärke I ist der Lichtstrom, den eine allseitig gleichmäßig strahlende Lichtquelle in die Einheit des räumlichen Winkels sendet.

$$\text{Lichtstärke} = \frac{\text{Lichtstrom}}{\text{Raumwinkel}}; \quad I = \frac{\Phi}{\omega}$$

Die Einheit der Lichtstärke ist 1 *Candela* (cd).

60 cd/cm² sind gleich der Leuchtdichte des schwarzen Körpers bei 2042,5° K. Diese 1948 international eingeführte Einheit stimmt mit der bisher in Deutschland üblichen Neuen Kerze (NK 1941) überein und ersetzt die früher gebräuchliche Hefner-Kerze (HK, 1884).

Die *Beleuchtungsstärke* E wird durch den auf die Flächeneinheit fallenden Lichtstrom angegeben. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist 1 *Lux* (lx).

$$\begin{aligned} \text{Beleuchtungsstärke} &= \frac{\text{Lichtstrom}}{\text{Einstrahlungsfläche}}; & E &= \frac{\Phi}{F_e}; \\ 1 \text{ Lux} &= \frac{1 \text{ Lumen}}{1 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

Der Lichtstrom im Raumwinkel ω erzeugt auf einer r_1 entfernten, senkrecht angestrahlten Fläche die Beleuchtungsstärke

$$E_1 = \frac{\Phi}{\omega r_1^2} = \frac{I}{r_1^2}, \text{ in der Entfernung } r_2 \text{ die Beleuchtungsstärke}$$

$$E_2 = \frac{\Phi}{\omega r_2^2} = \frac{I}{r_2^2}.$$

$$E_1 : E_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2} \quad (\text{Bild 197})$$

Ist die angestrahlte Fläche um den Winkel φ geneigt, so nimmt die Beleuchtungsstärke mit zunehmendem Neigungswinkel ab

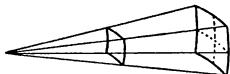


Bild 197. Lichtpyramide

Bild 198. Zu *Lamberts* Gesetz

(Bild 198), wobei zu beachten ist, daß in der Optik immer der Einfallswinkel gegen die Senkrechte im Auftreffpunkt gerechnet wird.

Lamberts Gesetz (1760). Die Beleuchtungsstärke einer Fläche nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab und ist proportional dem Cosinus des Einfallswinkels.

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varphi$$

Die *Leuchtdichte* B ist ein Maß für die Flächenhelligkeit einer selbstleuchtenden oder angestrahlten Fläche. Die Einheit der Leuchtdichte ist 1 *Stilb* (sb)¹.

1 sb = $\frac{1}{60}$ der Leuchtdichte der schwarzen Körper bei 2042,5° K

$$1 \text{ sb} = \frac{1 \text{ cd}}{\text{cm}^2}.$$

$$\text{Leuchtdichte} = \frac{\text{Lichtstärke}}{\text{Ausstrahlungsfläche}}; \quad B = \frac{I}{F_s}$$

¹ stílbein, griech., leuchten, glänzen.

b) Photometer

Die Photometrie dient zur Bestimmung von Lichtstärken. Bei gleicher Beleuchtungsstärke verhalten sich die Lichtstärken zweier Lichtquellen wie die Quadrate ihrer Abstände von der beleuchteten Fläche.

$$I_1 : I_2 = r_1^2 : r_2^2$$

Begründung: $E_1 = \frac{I_1}{r_1^2}$; $E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}$; $E_1 = E_2$

1. Das *Fettfleckphotometer* von *Bunsen* besteht aus einem weißen Papierschirm *Sch*, der in der Mitte durch einen Stearinfleck durchscheinend gemacht worden ist (Bild 199). Der Schirm wird auf der

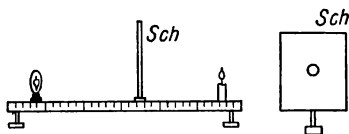


Bild 199. Photometer nach Bunsen

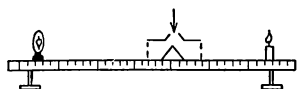


Bild 200. Photometer nach Ritchie

optischen Bank zwischen den beiden Lichtquellen so lange verschoben, bis der Fettfleck unsichtbar wird. Dann ist die Beleuchtungsstärke im durchscheinenden wie im reflektierten Licht gleich groß.

2. Das *Photometer* von *Ritchie* (Bild 200) hat an Stelle des Schirmes ein weißes Papp-Prisma, das durch Beobachtung von oben her auf gleiche Helligkeit der beiden Seitenflächen eingestellt wird.

3. Der *Photometerwürfel* von *Lummer* und *Brodhun* besteht aus zwei Prismen, die sich in einer Kreisfläche berühren. Bei ungleicher Beleuchtung erscheint entweder ein heller Kreis auf dunklem Grunde oder umgekehrt. In Bild 201 ist nur die Beleuchtung von einer Seite her dargestellt, um die durchgehende Strahlung und die reflektierte zu zeigen. Bei gleicher Beleuchtung von zwei Seiten her verschwindet der Kreis (vgl. Totale Reflexion, S. 133).

4. Das *Schattenphotometer* von *Rumford* vergleicht die Tiefe der Halbschatten, die ein Stab von zwei getrennten Lichtquellen entwirft. Es hat heute nur noch historische Bedeutung.

5. Moderne Photometer beruhen auf photochemischen Wirkungen, sie benutzen Photozellen bzw. Selenzellen.

3. Spiegelgesetze

a) Ebene Spiegel

Reflexionsgesetz. Der einfallende Strahl, das Einfallslot, d. h. die Senkrechte auf der Spiegelebene im Einfallspunkt, und der reflektierte Strahl liegen in einer Ebene (Bild 202).

Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel

Nachweis mit der **Hartlschen Scheibe** (Bild 203):

Die drehbare Blende hat einen waagerechten Schlitz, der aus dem Lichtstrom ein schmales Bündel ausschneidet. Das Strahlenbündel

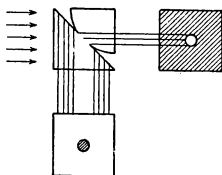


Bild 201. Photometerwürfel von *Lummer* und *Brodhun*

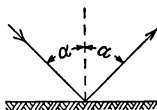


Bild 202. Reflexion am ebenen Spiegel

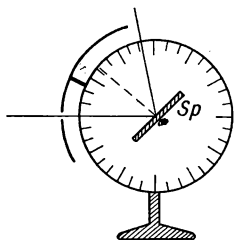


Bild 203. Messung des Reflexionswinkels

erleuchtet streifend die Scheibe und wird am ebenen Spiegel *Sp* reflektiert. Durch Ablesen an der Gradeinteilung der Scheibe läßt sich das Reflexionsgesetz bestätigen.

Die von einem Punkt *L* ausgehenden Strahlen werden im ebenen Spiegel so reflektiert, als ob sie von einem zum Spiegel symmetrischen Gegenstand *L'* herkämen (Bild 204). Im Spiegel erscheint rechts und links vertauscht, die Spiegelbilder sind seitenverkehrt.

Der *45°-Winkelspiegel* dient zum Abstecken rechter Winkel im Gelände (Bild 205).

$$\begin{array}{r} u = 2\alpha + 2\beta \\ \alpha + \beta + 135^\circ = 180^\circ \\ \hline u = 90^\circ \end{array}$$

Glatte Oberflächen werfen die einfallenden Strahlen nur in einer Richtung zurück.

Regelmäßige Reflexion (bei „spiegelnden Flächen“).

Rauhe Oberflächen dagegen werfen die einfallenden Strahlen nach allen Richtungen zurück: *diffuse Reflexion*. Durch die diffuse Reflexion werden die Körper sichtbar; ein Spiegel, der vollkommen reflektiert, ist selbst unsichtbar.

b) Sphärische Hohlspiegel (Konkavspiegel)

Ein kleines Stück der Hohlspiegelfläche kann als ebener Spiegel aufgefaßt werden, das Einfallslot fällt mit dem Krümmungsradius des Spiegels zusammen. Zur Achse parallele Strahlen werden so

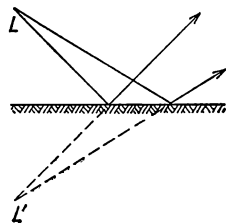


Bild 204. Entstehung des Spiegelbildes

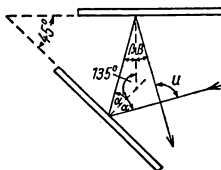


Bild 205. Winkelspiegel

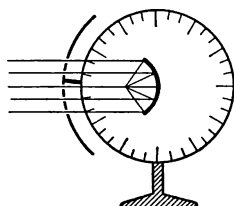


Bild 206. Reflexion von Parallelstrahlen am Hohlspiegel

reflektiert, daß sie nahezu durch einen Punkt gehen, den *Brennpunkt F* des Hohlspiegels (Bild 206). Dieser liegt in der Mitte zwischen Krümmungsmittelpunkt *M* und Scheitel *S* des Spiegels.

Nachweis mit der Hartlschen Scheibe:

$$\text{Brennweite } f = \frac{r}{2}$$

Die *Hohlspiegelgleichung* (Bild 207).

Der Abstand des leuchtenden Punktes *G* vom Scheitel *S* des Spiegels heißt Gegenstandsweite (*g*), der Abstand des Bildes *B* von *S* Bildweite (*b*).

$$\text{Hohlspiegelgleichung: } \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Begründung: Nach dem Satz von der Winkelhalbierenden im Dreieck gilt: $GM : MB = GK : KB \approx g : b$ (für Strahlen in der Nähe von S , Zentralstrahlen).

$$(g - r) : (r - b) = g : b; \quad gb - br = gr - bg; \quad 2gb = br + gr \parallel : bgr \\ \frac{2}{r} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad \text{da} \quad f = \frac{r}{2} \text{ ist.}$$

Konstruktion von Hohlspiegelbildern:

Der Parallelstrahl¹ wird nach der Reflexion zum Brennstrahl und umgekehrt.

Der Mittelpunktstrahl wird in sich selbst reflektiert.

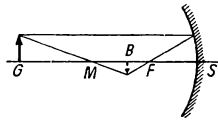
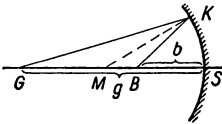


Bild 207. Ableitung der Hohlspiegelgleichung

Bild 208. Hohlspiegelbild ($g > r$)

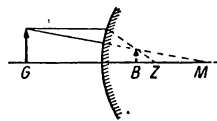
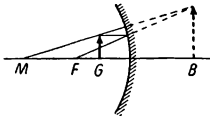


Bild 209. Hohlspiegelbild ($g < f$)

Bild 210. Konvexspiegelbild

Die Gegenstandsgröße (G) verhält sich zur Bildgröße (B) wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

$$G : B = g : b$$

$g > r$: verkleinertes, umgekehrtes, reelles Bild zwischen M und F (Bild 208)

$g = r$: gleich großes, umgekehrtes, reelles Bild bei M , $f = \frac{r}{2}$

$f < g < r$: vergrößertes, umgekehrtes, reelles Bild, $b > r$

$g < f$: vergrößertes, aufrechtes, scheinbares (virtuelles) Bild, $b < 0$: Vergrößerungsspiegel (Bild 209)

¹ Als Parallelstrahlen wollen wir kurz die zur Achse parallelen Strahlen bezeichnen.

c) Gewölbte Spiegel

Für sphärische Konvexspiegel (erhabene Spiegel) gelten die Gesetze wie für die Hohlspiegel, nur ist f negativ zu setzen, der Brennpunkt wird zum Zerstreuungspunkt (Bild 210).

Konvexspiegel ergeben in jedem Falle aufrechte verkleinerte, virtuelle Bilder und ein großes Gesichtsfeld (Rückblickspiegel).

d) Parabolspiegel

Der Parabolspiegel sammelt im Gegensatz zum sphärischen Spiegel parallele Strahlen genau im Brennpunkt. Eine Lichtquelle im Brennpunkt ergibt umgekehrt nach der Reflexion parallele Strahlen. Durch Verschieben der Lichtquelle zum Scheitel hin oder vom Scheitel weg kann man das Strahlbündel divergent oder konvergent¹ machen (Suchscheinwerfer).

4. Das Brechungsgesetz

a) Das Gesetz von Snellius (1620)

Der einfallende Strahl und der gebrochene Strahl liegen mit dem Einfallslot in einer Ebene. Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels in einem festen Zahlenverhältnis der Brechungsahl n (vgl. II, 3c).

Brechungsgesetz: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$

n heißt die Brechungsahl.

Huygens fand 1690, daß die Brechungsahl n gleich dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichtes in beiden Medien ist:

$$n = \frac{c_1}{c_2}$$

Beim Übergang vom optisch dünneren² zum optisch dichteren Mittel wird der Strahl zum Einfallslot hin gebrochen ($n > 1$), beim

¹ con lat. Vorsilbe = zusammen, dis lat. Vorsilbe = auseinander, divergent = auseinanderstrebend, konvergent = zusammenlaufend.

² optisch dünner heißt das Mittel, in dem das Licht sich schneller fortpflanzt.

Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Mittel vom Einfallslot weg ($n < 1$). Hierbei ergibt sich als Grenzfall $\beta = 90^\circ$ für ein bestimmtes α . Überschreitet α diesen Wert, so tritt *totale Reflexion* ein (Bild 211).

Brechungszahlen (abgerundete Werte)

Luft/Wasser 4 : 3, Luft/Kronglas 3 : 2, Luft/Flintglas (bleihaltig) 17 : 10, Luft/Diamant 5 : 2.

Hieraus folgt für die Lichtgeschwindigkeit in Wasser:

$c = 225\,000$ km/s, in Kronglas $200\,000$ km/s, in Flintglas $176\,500$ km/s, in Diamant $120\,000$ km/s.

Grenzwinkel der totalen Reflexion (für $\beta = 90^\circ$) $\sin \alpha = n (< 1)$

b) Folgerungen und Anwendungen. Atmosphärische Strahlenbrechung

Wegen der mit der Höhe abnehmenden Luftdichte erscheint ein Stern in Horizontnähe höher, als er in Wahrheit steht: An jeder

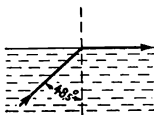


Bild 211
Grenzwinkel der totalen Reflexion

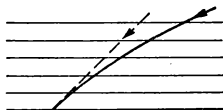


Bild 212
Atmosphärische Strahlenbrechung

Grenzschicht wird der Strahl beim Übergang vom dünneren zum dichteren Mittel nach dem Einfallslot hin gebrochen. Der gekrümmte Strahl trifft das Auge, wir selbst aber glauben geradeaus zu sehen (Bild 212).

Ein schräg in das Wasser tauchender Stab erscheint geknickt. Das total reflektierende Prisma kehrt das Bild um (Bild 213).

Eine planparallele Platte ergibt bei schrägem Lichteinfall eine Parallelverschiebung des Strahls (Bild 214).

c) Brechung einfarbigen Lichtes durch das Prisma

Der Winkel zwischen den Schenkeln des gleichschenkligen Prismas heißt brechender Winkel (ω), die zugehörige Prismenkante die brechende Kante.

Für die Ablenkung δ ergeben sich aus Bild 215 die Gleichungen:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n_{LG}; \quad \beta_1 + \alpha_2 = \omega; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = n_{GL};$$

$$\delta = \alpha_1 - \beta_1 + \beta_2 - \alpha_2 = \alpha_1 + \beta_2 - \omega.$$

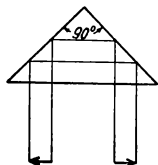


Bild 213
Bildumkehr am total
reflektierenden Prisma

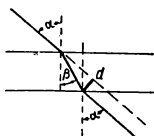


Bild 214
Ablenkung des Strahls
durch planparallele Platte

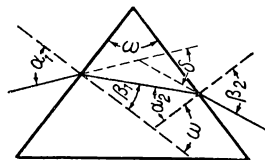


Bild 215
Strahlengang im Prisma

Die geringste Ablenkung erfährt der Strahl bei symmetrischem Durchgang durch das Prisma:

$$\beta_1 = \alpha_2 = \frac{\omega}{2}; \quad \alpha_1 - \beta_1 = \beta_2 - \alpha_2 = \frac{\delta}{2};$$

$$\alpha_1 = \beta_1 + \frac{\delta}{2} = \frac{\omega}{2} + \frac{\delta}{2}.$$

Minimum der Ablenkung: $n = \frac{\sin\left(\frac{\omega}{2} + \frac{\delta}{2}\right)}{\sin \frac{\omega}{2}}$

Der Satz vom schmalen Prisma (wichtig für Linsen).

Für kleine Winkel ist $\sin \alpha = \alpha$, $\sin \beta = \beta$; ¹ $\alpha_1 = n\beta_1$; $\alpha_2 = \frac{1}{n}\beta_2$;
 $\delta = n\beta_1 + n\alpha_2 - \omega = n(\beta_1 + \alpha_2) - \omega = (n - 1)\omega$

Schmales Prisma: $\delta = (n - 1)\omega$

5. Farbenzerlegung (Dispersion)

a) Das kontinuierliche Spektrum

Weißes Licht wird durch das Prisma in die *Spektralfarben* zerlegt: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett.

Diese Einteilung ist von *Newton* in Anlehnung an die Tonleiter vorgenommen worden. Zwischen den einzelnen Farben finden kon-

¹ Hierbei sind α und β in Bogenmaß zu messen.

tinuierliche Übergänge statt. Rotes Licht wird am wenigsten, violettes am stärksten abgelenkt. Durch eine Zylinderlinse lassen sich die Spektralfarben wieder zu Weiß vereinigen (Bild 216). Weiß ist also eine Mischung sämtlicher spektraler Lichtsorten.

Bringt man in das konvergente Strahlenbündel hinter der Zylinderlinse ein zweites (schmales!) Prisma, so lenkt dieses einen Teil der Strahlen ab, und es zeigt sich auf dem Schirm ein farbiges Spaltbild, z. B. Hellblau, die nicht abgelenkten Strahlen vereinigen sich zu einem zweiten Spaltbild (Orange). Beide Strahlenarten zusammen ergeben Weiß. Derartige Farben: Rot und Grün, Orange und Hellblau, Gelb und Indigo heißen *Komplementär-farben*.

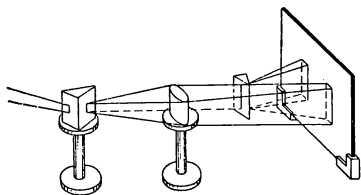


Bild 216
Wiedervereinigung der Spektralfarben

Beachte: Gelbes und blaues spektrales Licht ergeben zusammen

Weiß, aber die Mischung gelber und blauer Malerfarbe ergibt Grün. In diesem Falle handelt es sich um reflektiertes Licht. Gelb reflektiert überwiegend die Farben Orange, Gelb und Grün. Blau reflektiert dagegen Grün, Blau, Indigo. In der Mischung muß das reflektierte Grün vorherrschen.

Gleiche Prismen aus verschiedenen Glassorten ergeben Spektren verschiedener Breite. Durch Kombination von Prismen mit verschiedenen brechenden Winkeln kann man die Ablenkung aufheben und gleichzeitig die Breite des Spektrums steigern (*Geradsichtspektroskope*).

Durch Kombination von Kron- und Flintglasprismen bestimmter brechender Winkel läßt sich umgekehrt die Farbenzerstreuung aufheben und die Ablenkung belassen: *achromatische Prismen*.

b) Arten von Spektren

Glühende feste Körper ergeben ein *kontinuierliches Spektrum*. Dieses enthält alle Spektralfarben in stetigen Übergängen. *Glühende Gase* dagegen ergeben ein *Linienpektrum*. Die Zahl und Lage der Linien sind für die betreffenden Stoffe charakteristisch. Aus dem Auftreten der Spektrallinien läßt sich die Existenz der betreffenden Stoffe auch auf entfernten glühenden Körpern (z. B. Sternen) nachweisen (*Spektralanalyse*).

Die von glühenden festen Körpern oder Gasen ausgehenden Strahlen ergeben *Emissionsspektren*¹.

Läßt man die Strahlen eines festen glühenden Körpers durch glühende Dämpfe (z. B. Na-Dampf) gehen, so zeigen sich an den Stellen, die den Spektrallinien des Dampfes entsprechen, schwarze Streifen im kontinuierlichen Spektrum: *Absorptionsspektrum*.

Fraunhofersche Linien im Sonnenspektrum geben Aufschluß über die Dämpfe, die den Sonnenkern umgeben.

„Umkehrung“ der Natriumlinie. Im kontinuierlichen Spektrum des elektrischen Lichtbogens zeigt sich meist deutlich die gelbe Doppellinie des Natriums. Schickt man derartiges Licht durch Natriumdampf, so tritt an der Stelle, an der vorher die gelbe Natriumlinie sichtbar gewesen ist, ein dunkler Streifen auf. Der Natriumdampf hat die gleiche Strahlung absorbiert, die er sonst selbst aussendet.

Gesetz von Kirchhoff und Bunsen. Leuchtende Gase absorbieren die Farben, die sie selbst aussenden.

6. Linsen und Linsengesetze

a) Arten von Linsen

Optische Linsen, die in der Mitte dicker sind als am Rand, sind Sammellinsen; ist dagegen der Rand dicker als die Mitte, so wirken sie als Zerstreuungslinsen.

Nach der Form des Querschnittes unterscheidet man

bikonvexe, plankonvexe, konkav-konvexe Sammellinsen,
bikonkave, plankonkave, konvex-konkave Zerstreuungslinsen.

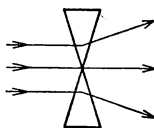
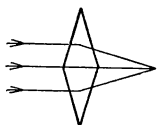


Bild 217. Doppelprisma als Sammellinse Bild 218. Doppelprisma als Zerstreuungslinse

Dünne Linsen kann man sich in erster Annäherung aus schmalen Prismen aufgebaut denken (Bilder 217, 218).

¹ emittiere, lat., aussenden.

Der Strahlengang läßt sich an der Hartlschen Scheibe nachweisen. Die *Sammellinse* vereinigt einfallende Parallelstrahlen in einem Punkt hinter der Linse, dem *Brennpunkt* (Bild 219).

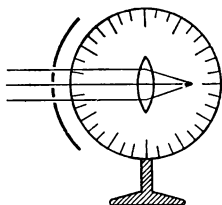


Bild 219. Vereinigung von Parallelstrahlen durch Sammellinse

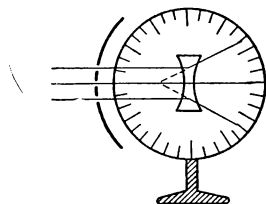


Bild 220. Zerstreuung von Parallelstrahlen durch Zerstreuungslinse

Die *Zerstreuungslinse* verwandelt einfallende Parallelstrahlen in divergente Strahlen, die von einem Punkt, dem *Zerstreuungspunkt*, herzukommen scheinen (Bild 220).

b) Bildkonstruktion bei Linsen

Für die Konstruktion des Strahlenganges gelten die gleichen Gesetze wie für Hohlspiegel:

Der *Parallelstrahl* wird zum *Brennstrahl* und umgekehrt.

Der *Mittelpunktstrahl* (Hauptstrahl durch den Linsenmittelpunkt) geht *ungeändert* durch die Linse, bei dicken Linsen wird er um einen kleinen Betrag parallel verschoben (planparallele Platte, s. S. 133). Aus der Umkehrbarkeit des Strahlenganges folgt, daß jede Linse zwei Brennpunkte hat, die von der Linse gleich weit abstehen.

Für dünne Sammellinsen und Zentralstrahlen gelten folgende *Abbildungsgesetze*:

$g > 2f$: umgekehrtes, verkleinertes, auffangbares (reelles) Bild
 $b > f$ (Bild 221)

$g = 2f$: umgekehrtes, gleich großes, reelles Bild, $b = 2f$

$f < g < 2f$: umgekehrtes, vergrößertes, reelles Bild, $b > 2f$

$g < f$: aufrechtes, vergrößertes, virtuelles Bild, $-b > f$ (Bild 222)

Für $g < f$ werden die Strahlen divergent, ihre rückwärtigen Verlängerungen schneiden sich in den virtuellen Bildpunkten. Die Linse wirkt als Vergrößerungsglas.

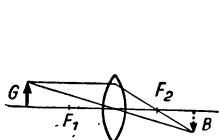


Bild 221

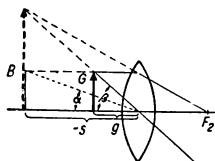
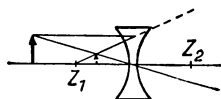
Sammellinse ($g > 2f$)Bild 222. Sammellinse ($g < f$)

Bild 223. Zerstreuungslinse

Bilder von Zerstreuungslinsen sind immer virtuell, aufrecht und verkleinert (Bild 223).

c) Linsenformel

Für dünne Linsen und Zentralstrahlen gilt die

$$\text{Linsenformel: } \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Die Brennweite f hängt ab von der Brechungszahl der Glassorte und den Krümmungsradien der Linsenflächen.

Ableitung der Formel (Bild 224): Die Ablenkung δ ist als Außenwinkel des $\triangle ABC$

$\delta = \alpha + \beta$ und, nach dem Satz vom schmalen Prisma:

$$\delta = (n-1)\omega$$

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{h_1}{g}; \quad \beta \approx \tan \beta = \frac{h_2}{b}$$

$$u \approx \sin u = \frac{h_1}{r_1}; \quad v \approx \sin v = \frac{h_2}{r_2}; \quad u + v = \omega.$$

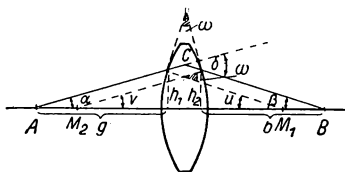


Bild 224. Ableitung der Linsenformel

Durch Gleichsetzen der Ausdrücke für δ folgt:

$$\frac{h_1}{g} + \frac{h_2}{b} = (n-1) \left(\frac{h_1}{r_1} + \frac{h_2}{r_2} \right)$$

Für dünne Linsen ist $h_1 \approx h_2$, also

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

Die Brechkraft von Linsen wird in *Dioptrien* gemessen.

Die Dioptrie ist der Kehrwert der in Meter gemessenen Brennweite.

$$D = \frac{1}{f} \quad [\text{m}]$$

Korrektur von Augenfehlern. Bei Weitsichtigkeit schneiden sich die Abbildungsstrahlen erst hinter der Netzhaut. Eine vorgeschaltete Sammellinse rückt das Bild näher, so daß es auf die Netzhaut fällt. Durch Vorschalten von Zerstreuungslinsen werden die zu stark konvergenten Strahlen bei Kurzsichtigkeit weniger konvergent gemacht. Dadurch wird das Bild auf die Netzhaut gerückt.

d) Linsenfehler

1. *Chromatische Abweichung* (chromatische Aberration). Der rote Strahl wird weniger gebrochen als der violette, das Bild bekommt dadurch farbige Ränder.

Abhilfe: achromatische Linsenpaare, bestehend aus einer konvexen Kronglas- und einer konkav-konvexen Flintglaslinse (vgl. achromatisches Prisma).

2. *Sphärische Abweichung* (sphärische Aberration). Größere Linsen haben am Rand eine etwas andere Brennweite als in der Mitte, die Abbildungsstrahlen schneiden sich nicht genau in einem Punkt, sondern es entsteht als Bild des Gegenstandspunktes ein Fleck. Das Bild wird unscharf. Abhilfe: Abblenden der Randstrahlen.

3. *Bildfeldwölbung*. Bei dicken Linsen ist die Bildfläche nicht eben, das führt zu kissen- oder tonnenförmigen Verzerrungen. Abhilfe: besondere Linsenkombinationen, Aplanate.

4. *Astigmatismus*¹. Nichtpunktförmige Abbildung infolge schiefen Strahleneinfalls. Linsenkombinationen, die diesen Fehler ausgleichen, heißen Anastigmaten.

7. Optische Instrumente

a) Projektionsapparate

Im Diaskop werden die divergenten Strahlen einer starken Lichtquelle (einer Bogenlampe oder lichtstarken Glühlampe) durch die

¹ stigma, griech., der Punkt. Astigmatismus heißt Nichtpunktförmigkeit der Abbildung.

Kondensorlinse in parallele Strahlen verwandelt. Das parallele Licht durchsetzt das Diapositiv D . Die Objektivlinse entwirft ein vergrößertes, umgekehrtes, reelles Bild des leuchtenden Diapositivs.

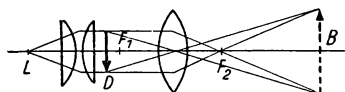


Bild 225
Strahlengang im Projektionsapparat

Das Diapositiv muß zwischen der einfachen und doppelten Brennweite des Objektivs liegen (Bild 225). Im Episkop wird das Objekt durch seitlich angebrachte Lampen stark beleuchtet. Das Objektiv entwirft

von dem helleuchtenden Objekt ein vergrößertes Bild. Ein schräg in den Strahlengang eingesetzter Spiegel hat den Zweck, die Abbildungsstrahlen aus der Vertikalen in die Waagerechte abzulenken.

b) Lupe und Mikroskop

Eine Sammellinse entwirft von dem innerhalb der Brennweite liegenden Gegenstand ein vergrößertes, virtuelles, aufrecht stehendes Bild, sie wirkt in diesem Falle als *Lupe*.

Entscheidend für die Wahrnehmung kleiner Objekte ist der Sehwinkel, unter dem das Objekt vom Auge aus erscheint. Die Unterscheidung benachbarter Punkte ist nicht mehr möglich, wenn der

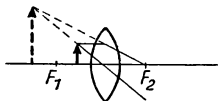


Bild 226. Vergrößerung der Lupe

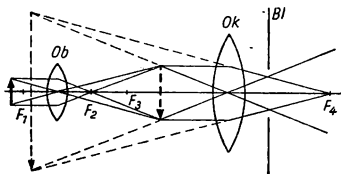


Bild 227. Strahlengang im Mikroskop

Sehwinkel unter 50 Bogensekunden sinkt. Die Lupe vergrößert den Sehwinkel, das scheinbare Bild wird in die deutliche Sehweite s gerückt ($s = 25$ cm für normales Auge) (Bild 226).

$$\text{Vergrößerung } v = \frac{B}{G} = \frac{s}{g}; \quad \frac{1}{g} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{g} = \frac{1}{f} + \frac{1}{s}$$

$$g = \frac{fs}{f+s}; \quad v = \frac{s}{g} = \frac{f+s}{f} = \frac{s}{f} + 1$$

Mikroskop. Das Objektiv, eine Sammellinse mit sehr kurzer Brennweite, entwirft von dem kleinen Objekt ein vergrößertes, reelles Bild (Bild 227). Da das Objekt sehr klein ist, liegt das Bild in der Nähe des Objektivbrennpunktes.¹ Deshalb liegt B in der Nähe von F_2 . Erste Vergrößerung ist $v_1 = \frac{B_1}{G} \approx \frac{l}{f_1}$. Hierbei bedeutet l den Abstand der Brennpunkte von Objektiv und Okular. Das Okular ergibt die zweite Vergrößerung $v_2 = \frac{B_2}{B_1} \approx \frac{s}{f_2}$, also $v = v_1 v_2 = \frac{ls}{f_1 f_2}$.

c) Fernrohre

1. *Astronomisches Fernrohr* (Kepler 1611). Von dem weit entfernten Objekt entwirft das Objektiv (große Brennweite) ein kleines reelles Zwischenbild in der Nähe des Brennpunktes der Objektivlinse¹

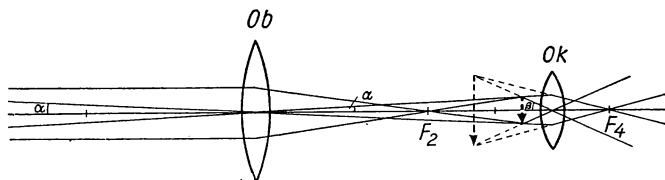


Bild 228. Strahlengang im astronomischen Fernrohr

(Bild 228). Dieses wird durch eine zweite Sammellinse, das Okular, das als Lupe wirkt, betrachtet.

$$\text{Fernrohlänge} \approx f_1 + f_2; \quad \text{Vergrößerung } v = \frac{f_1}{f_2}$$

Begründung. Das Objekt erscheint ohne Fernrohr unter dem Sehwinkel α , mit Fernrohr unter dem Winkel β .

$$\tan \beta : \tan \alpha = \frac{B_1}{f_2} : \frac{B_1}{f_1} = f_1 : f_2$$

2. *Terrestrisches Fernrohr.* Das terrestrische Fernrohr entsteht aus dem astronomischen durch Zwischenschalten einer Umkehrlinse, die das Bild aufrecht stellt, ohne die Größe zu ändern. Die Länge des Fernrohrs vergrößert sich dabei um die vierfache Brennweite der Umkehrlinse (Bild 229) (vgl. S. 137).

¹ In der bildlichen Darstellung mußten G und B_1 übertrieben groß gezeichnet werden.

3. *Prismenfernrohr*. Beim Prismenfernrohr wird die Umkehrlinse durch zwei total reflektierende Prismen ersetzt, deren Hypotenusenflächen parallel und deren brechende Kanten senkrecht zueinander stehen. Dadurch wird zugleich mit der Bildumkehr eine wesentliche Verkürzung des Fernrohrs erreicht, weil die Strahlen den Weg

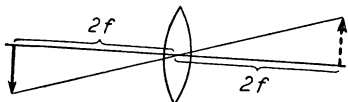


Bild 229. Wirkung der Umkehrlinse

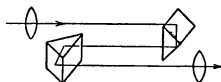


Bild 230. Strahlengang im Prismenfernrohr

zwischen den Prismen dreimal durchlaufen (Bild 230) (vgl. S. 134). Ferner liegen die Objektivlinsen weiter auseinander als die Augen, wodurch das stereoskopische Sehen begünstigt wird.

4. *Holländisches Fernrohr* (*Lippershay* 1608), auch *Galileisches Fernrohr* genannt. Das Objektiv entwirft ein kleines, umgekehrtes reelles Bild in der Nähe des Brennpunktes. Vor dem Zustandekommen dieses Bildes wird in die konvergenten Strahlen eine Zerstreulinse geschaltet, die die Strahlen leicht divergent macht. Das Auge sieht ein vergrößertes, aufrechtes, virtuelles Bild (Bild 231).

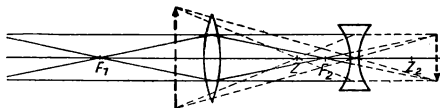


Bild 231. Strahlengang im holländischen Fernrohr

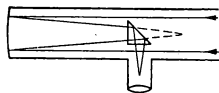


Bild 232. Strahlengang im Spiegelteleskop

Die Länge des Fernrohrs ist angenähert gleich der Differenz der Brennweiten, die Vergrößerung verhältnismäßig gering. Das Holländische Fernrohr wird heute noch als Theaterglas gebraucht.

5. *Spiegelteleskop*. Ein großer Hohlspiegel entwirft ein kleines Bild des fernen Objekts. Ehe dieses Bild zustande kommt, werden die Strahlen durch einen schrägen Spiegel oder ein total reflektierendes Prisma abgelenkt. Das nun seitlich entstehende Bild wird, durch ein Okular vergrößert, betrachtet (Bild 232).

B. Wellenoptik

1. Interferenz des Lichtes

a) Lichttheorien

Die geometrische Optik benutzt zur Ableitung ihrer Gesetze lediglich die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen, sie macht keine Aussagen über das Wesen des Lichtes.

Im 17. und 18. Jahrhundert standen sich zwei Erklärungsversuche für das Wesen des Lichtes gleichwertig gegenüber: *Newton* glaubte, die Lichtstrahlen seien durch die Aussendung kleinster Lichtteilchen (Lichtkorpuskeln) hervorgerufen, er konnte damit fast alle damals bekannten Erscheinungen der Optik erklären (*Emissions-theorie*). *Huygens* hielt das Licht für eine Wellenbewegung (*Undulationstheorie*). Auch mit Hilfe dieser Annahme ließen sich die Gesetze der geometrischen Optik ableiten (vgl. II, 3). Nachdem es gelungen war, beim Licht genau wie beim Schall Interferenzerscheinungen nachzuweisen, wurde die Frage nach dem Wesen des Lichtes zugunsten der Undulationstheorie entschieden. Erst in diesem Jahrhundert sind beide Theorien als gleichberechtigt erkannt worden (vgl. VI, 2c).

b) Der Interferenzversuch von Fresnel¹ (Spiegelversuch)

1822 lieferte *Fresnel* den Nachweis, daß auch bei Licht Interferenzerscheinungen auftreten:

Licht plus Licht kann Dunkelheit ergeben. (Vgl. Interferenzversuch von Quincke für Schallwellen II, 7b.) Voraussetzung für das Auftreten der Interferenzen sind zwei nahe beieinander liegende, *kohärente Lichtquellen*, d. h. Lichtquellen, die sich völlig gleichartig in ihrer Lichtaussendung verhalten. Die von zwei verschiedenen Lichtquellen ausgesandten Wellen sind immer inkohärent. *Fresnel* benutzte deshalb nur eine Lichtquelle und entwarf von ihr zwei Spiegelbilder. Diese erfüllen die Bedingung der Kohärenz. Der Fresnelspiegel ist ein sehr flacher Winkelspiegel. Die beiden ebenen Spiegel bilden einen Winkel, der um wenige Bogenminuten von 180° abweicht. In diesem Spiegel entwirft eine Lichtquelle dicht nebeneinander zwei Spiegelbilder L_1 und L_2 . Die von diesen Bildern

¹ *A. J. Fresnel* (spr. Frenél), frz. Physiker, 1788 bis 1827.

ausgehenden Strahlen ergeben auf einem entfernten Bildschirm dunkle und helle Streifen, also Streifen der Auslöschung (Gangunterschied $(2n-1)\frac{\lambda}{2}$) und Streifen größter Helligkeit (Gangunterschied $n\lambda$) (Bild 233).

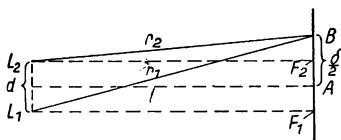
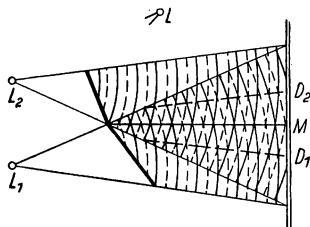


Bild 233. Zum Fresnelschen Spiegelversuch

Bild 234. Bestimmung der Wellenlänge

Aus dem Abstand des ersten dunklen Streifens von dem hellen Streifen in der Mitte des Interferenzbildes kann die Wellenlänge des Lichtes bestimmt werden (Bild 234).

$$\lambda = \frac{\delta d}{l}$$

δ Abstand der beiden ersten dunklen Streifen

d Abstand der (scheinbaren) Lichtquellen

l Abstand des Schirms von den Lichtquellen

Begründung: $r_1^2 = l^2 + \left(\frac{\delta}{2} + \frac{d}{2}\right)^2$

$$r_2^2 = l^2 + \left(\frac{\delta}{2} - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$r_1^2 - r_2^2 = (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) = \delta d$$

$$r_1 + r_2 \approx 2l, \quad \text{also } r_1 - r_2 = \frac{\delta d}{2l}$$

Auslöschung der Wellen tritt bei den Gangunterschieden $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}$, $\frac{5\lambda}{2}$ ein. Für den ersten dunklen Streifen gilt demnach:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\delta d}{2l}, \quad \text{also } \lambda = \frac{\delta d}{l}.$$

Für gelbes (Na-) Licht ergibt sich $\lambda = 0,000589$ mm, also 589 mμ. Verwendet man weißes Licht, so sind die hellen Streifen farbig. Jede Wellenlänge ergibt einen anderen Streifenabstand von der Mitte. Diese Farben überlagern sich zum Teil.

c) Die Wellenlängen des Lichtes

Jede Lichtfarbe hat eine andere Wellenlänge und damit auch eine andere Schwingungszahl, solange das Medium das gleiche bleibt. Beim Übergang in ein anderes Medium kann die Wellenlänge sich ändern, während die Schwingungszahl unverändert bleibt.

Wellenlängen des Lichtes

Farben Fraunhofersche Linien	Rot A	Orange C	Gelb D	Grün E	Blau F	Indigo G	Violett H
λ in $\text{m}\mu^1$	761	656	589	527	486	431	397

Aus der Grundgleichung der Wellenlehre $c = \nu \lambda$ folgt für die *Schwingungszahlen*: 400 ... 750 Billionen Hertz. Das sichtbare Licht umfaßt knapp 1 Oktave, während das Ohr auf 10 bis 11 Oktaven anspricht.

d) Farben dünner Blättchen

Die Farben dünner Blättchen (Ölfilm auf Wasser, Seifenblasen) sind eine Interferenzerscheinung.

Versuch. Eine Seifenlamelle in einem Drahtrahmen zeigt bei einfarbigem Licht parallele helle und dunkle Streifen, bei weißem Licht Streifen in den „Regenbogenfarben“.

Erklärung (Bild 235). Die Lichtstrahlen 1 und 2 fallen auf eine planparallele Platte. Strahl 1 wird bei A zum Teil reflektiert, zum Teil nach B gebrochen, hier am dünneren Mittel reflektiert (gleichphasig,

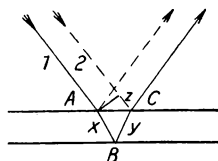


Bild 235
Farben dünner Blättchen

d. h. ohne Verlust von $\frac{\lambda}{2}$), gelangt nach C und interferiert mit dem reflektierten Anteil von Strahl 2. Dieser ist bei C unter Verlust von $\frac{\lambda}{2}$ am dichteren Mittel reflektiert worden. Wenn in der Richtung des reflektierten Strahles 1; 2 Dunkelheit herrscht, beträgt der Gangunterschied $\frac{\lambda}{2}$ oder ein ungerades Vielfaches davon.

¹ Lichtwellenlängen werden auch in Å-Einheiten angegeben.

$$1 \text{ Å} = 10^{-1} \text{ m}\mu$$

Daraus folgt: Die Differenz der optischen Weglängen $(x + y - z)$, vermehrt um $\frac{\lambda}{2}$ infolge der Reflexion von Strahl 2, ist $(2n + 1)\frac{\lambda}{2}$.

Im durchscheinenden Licht interferieren der zweimal am dünneren Mittel reflektierte Strahl 1 und der zweimal gebrochene Strahl 2. Der zusätzliche Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$ infolge Reflexion am dichteren Mittel fällt weg.

$$x + y - z = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Die Erscheinungen im reflektierten Licht und im durchscheinenden Licht sind zueinander komplementär.

e) Newtonsche Ringe

Eine plankonvexe Linse mit sehr geringer Krümmung liegt auf einer Glasplatte und wird senkrecht mit einfarbigem Licht beleuchtet. Um die dunkle Mitte zeigt sich ein System heller und dunkler konzentrischer Kreise. Die Interferenzerscheinung ergibt sich aus der Reflexion des senkrechten Strahls bei *B* (an der Linsenwölbung, also am dünneren Mittel) und bei *C* (an der Glasplatte, am dichteren Mittel); Helligkeit und Dunkelheit hängen von der Dicke des Luftkeils ab (Bild 236).

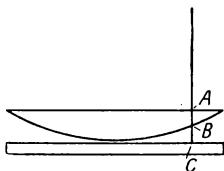


Bild 236. Entstehung der Newtonschen Ringe

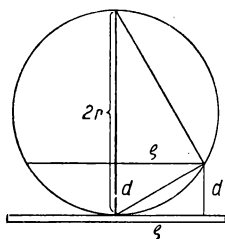


Bild 237. Wellenlängenbestimmung an Newtonschen Ringen

Erklärung und Messung. ρ Radius des n -ten dunklen Ringes, d Dicke der Luftschicht. Nach dem Höhensatz ist $\rho^2 = d(2r - d) \approx 2rd$, da d im Verhältnis zu r sehr klein ist (Bild 237).

Bei Dunkelheit ist der Gangunterschied $2d + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$;

$2d = n\lambda$; $\lambda = \frac{2d}{n}$. Aus $\varrho^2 = 2rd$ folgt $2d = \frac{\varrho^2}{r}$, also $\lambda = \frac{\varrho^2}{rn}$.

Da ϱ und r unmittelbar meßbar sind, kann λ bestimmt werden. Die Mitte des Ringsystems ist dunkel, weil zwar B und C zusammenfallen, aber die eine Reflexion am dünneren Mittel, die andere am dichteren stattfindet.

Der Abstand der farbigen Ringe hängt von der Lichtfarbe ab, bei rotem Licht liegen die Ringe weiter auseinander als bei blauem Licht. Newtonsche Ringe kann man auch im durchgehenden Licht beobachten. Die Farben im durchgehenden Licht sind komplementär zu denen im reflektierten Licht.

Bringt man zwischen Linse und Platte eine Flüssigkeit, so ändert sich die Lage der Ringe (ϱ wird kleiner). Aus dem Verhältnis der beiden λ -Werte für die gleiche Farbe (Schwingungszahl) ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit in der Flüssigkeit.

2. Beugungserscheinungen des Lichtes

a) Beugung am dünnen Draht

Auch die Beugungserscheinungen sind ein Beweis für die Wellennatur des Lichtes.

Versuch. Das Licht einer Bogenlampe geht durch einen engen Spalt und ein Farbfilter. Mit der Sammellinse wird auf dem entfernten Schirm ein Spaltbild entworfen. Bringt man in das schmale Lichtbündel einen dünnen Draht, so erscheint sein Schatten im Spaltbild. Spaltbild und Schatten sind unscharf geworden, in der Mitte des Schattens erscheint ein heller Strich, umgeben von dunklen und hellen Streifen, die nach außen näher aneinanderrücken (Beugungsstreifen). Bei weißem Licht sind diese Streifen farbig.

Begründung (Bild 238). Nach dem Huygensschen Prinzip sind die Stellen A und B , an denen die Strahlen den Draht mit dem Durch-

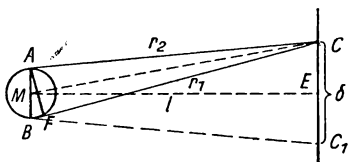


Bild. 238. Beugung am dünnen Draht

messer d berühren, Ausgangspunkte von Elementarwellen, die im Schattenraum zur Interferenz kommen. Die Mitte ist Symmetrielinie, hier muß der Gangunterschied 0 sein, also Helligkeit herrschen.

$$CF \approx CA, \quad r_1 - r_2 = \frac{\lambda}{2}; \quad \triangle MEC \sim \triangle AFB$$

$$AB : BF = MC : EC; \quad d : \frac{\lambda}{2} = l : \frac{\delta}{2}$$

$$\lambda = \frac{d \delta}{l}$$

b) Beugung am Spalt

Auch das Bild eines sehr schmalen Spaltes zeigt im Schattenraum Beugungsstreifen. Hier interferieren die einzelnen den Spalt durchsetzenden Strahlen miteinander. Je nach der Neigung der Strahlen

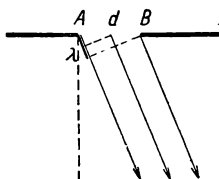


Bild 239. Beugung am Spalt

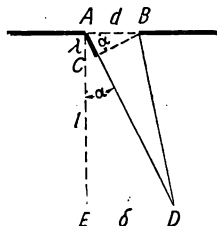


Bild 240. Berechnung der Wellenlänge aus der Spaltbreite

zur Symmetrieachse ergeben sich verschiedene Gangunterschiede und damit abwechselnd helle und dunkle Streifen.

Erklärung durch Berechnung des ersten dunklen Streifens neben der hellen Mitte (Bild 239). Denkt man das schräge Parallelbündel in zwei Gruppen von Strahlen zerlegt, so interferiert der erste Strahl des linken Bündels mit dem ersten des rechten und so fort. Wenn in der Richtung dieser Strahlen Dunkelheit herrscht, haben die Strahlen bei A und B also den Gangunterschied λ .

Der nächste helle Streifen läßt sich durch Zerlegung der Strahlen dieser Richtung in 3 Bündel mit den Gangunterschieden je $\frac{\lambda}{2}$ erklären. Die beiden ersten Bündel löschen sich daher aus, das

dritte bleibt bestehen. Die Helligkeit der Beugungsstreifen nimmt nach außen ab.

Berechnung der Wellenlänge aus der Spaltbreite (Bild 240)

$$\text{Im } \triangle ABC \text{ ist } \sin \alpha = \frac{\lambda}{d}, \quad \text{im } \triangle AED \text{ ist } \tan \alpha = \frac{\delta}{l}.$$

Für sehr kleine α ist $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$, also

$\frac{\lambda}{d} = \frac{\delta}{l}$; $\lambda = \frac{d \delta}{l}$. Hier bedeutet aber δ den halben Abstand der ersten dunklen Streifen.

c) Beugungsgitter und Beugungsspektren

Beugungsgitter werden hergestellt, indem man mit einer Teilmaschine sehr enge parallele Linien in eine Glasplatte einritz; die unverletzten Felder des Glases wirken als Spalte, die geritzten als undurchsichtige Streifen. Bei der Verwendung von Beugungsgittern an Stelle des einfachen Spaltes werden die Beugungsbilder viel heller, weil hier nicht nur die Strahlen eines einzelnen Spaltes, sondern auch die entsprechenden Strahlen der anderen Spalte miteinander zur Interferenz kommen.

Der Abstand eines durchsichtigen Streifens vom nächsten heißt *Gitterkonstante* b (ist also die Summe von Spaltbreite und undurchsichtigem Streifen) (Bild 241).

Feine Gitter haben bis 1700 Linien auf 1 mm. Das erste Helligkeitsmaximum tritt ein bei dem Gangunterschied λ der Nachbarstrahlen.

$$\left. \begin{array}{l} \sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{b} \\ \tan \alpha_1 = \frac{\delta}{l} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Aus beiden Gleichungen kann } \lambda \\ \text{errechnet werden.} \end{array}$$

Beugungsgitter werden zur Herstellung lichtstarker breiter Spektren verwendet. Da Rot die größte Wellenlänge hat, Violett die kleinste, wird *Rot am stärksten abgelenkt, Violett am wenigsten*, wie man aus obiger Formel ablesen kann. Für kleine α ist die Ablenkung proportional der Wellenlänge. Aus diesem Grunde heißen die Gitterspektren *Normalspektren* im Gegensatz zu den *Disper-*

sionsspektren der Prismen, in denen Rot am wenigsten, Violett am stärksten abgelenkt wird und bei denen α nicht proportional zu λ ist. Die Spektren höherer Ordnung überdecken sich zum Teil (Bild 242).

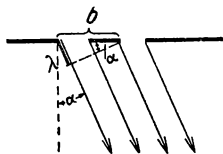


Bild 241
Messung am Beugungsgitter

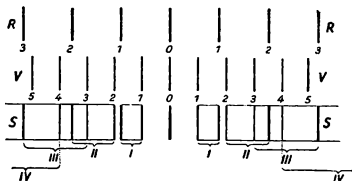


Bild 242
Beugungstreifen und Beugungsspektren

d) Beugungserscheinungen in der Natur

Eine dünne Wolkenschicht aus Wassertröpfchen vor der Sonne oder dem Monde wirkt als Beugungsgitter. Das Gestirn erscheint umgeben von einem farbigen Lichtkranz (*farbiger Hof*). Bei Wolken aus Eisnadeln tritt eine andere Erscheinung auf: ein Ring um Sonne und Mond. Dieser entsteht durch Lichtbrechung.

Versuch. Betrachtet man eine Kerzenflamme durch eine beschlagene Glasscheibe oder eine Glasscheibe mit aufgestreutem Bärlappsaamen, so erscheint die Flamme von einem farbigen Hof umgeben.

Der Regenbogen entsteht im wesentlichen durch Brechung und Totalreflexion der Sonnenstrahlen an kugelförmigen Regentropfen. Der Hauptregenbogen hat auf der Außenseite einen roten Rand, nach innen folgen die Spektralfarben bis zum Violett. Der Radius des Halbkreises erscheint unter dem Sehwinkel $42\frac{1}{2}^\circ$. Ein Nebenregenbogen hat einen inneren Halbmesser von 51° und zeigt innen die rote und außen die violette Farbe.

Modellversuch mit der Hartlschen Scheibe (Bild 243).

3. Polarisation des Lichtes

Die Entscheidung, ob das Licht eine longitudinale oder transversale Wellenbewegung ist, wird durch den Nachweis der Polarisierbarkeit der Lichtschwingung erbracht. Nur transversale Wellen sind polarisierbar (vgl. S. 80).

a) Polarisation durch Turmalinkristalle

Eine Turmalinplatte ist so geschnitten, daß ihre Begrenzungsebenen parallel zur kristallographischen Hauptachse liegen. Das Licht geht wenig geschwächt durch die Platte hindurch. Hinter der Platte schwingt das Licht aber nur noch in einer Ebene, ist also *linear polarisiert*.

Der Nachweis läßt sich mit einer zweiten gleichen Turmalinplatte erbringen, die mit parallelen Ebenen, aber um 90° gedreht, aufgestellt wird. Die erste Platte (T_1) heißt *Polarisator*, die zweite (T_2) *Analysator*, weil sie zur Feststellung der Schwingungsebene dient (Bild 244).

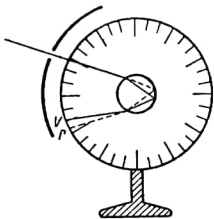


Bild 243. Modellversuch zur Erklärung des Regenbogens

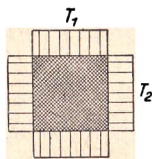


Bild 244. Gekreuzte Turmalinplatten

Im natürlichen Licht sind alle Schwingungsrichtungen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung möglich, sie folgen in raschem Wechsel aufeinander. Linear polarisiertes Licht schwingt dagegen nur in einer Ebene. Ein zweiter Kristall, dessen kristallographische Hauptachse senkrecht zu der ersten steht, löscht die Schwingung aus (gekreuzte Polarisatoren). An Stelle der Turmalinkristalle werden heute die von der Firma Schott in Jena hergestellten *Polarisationsfilter* verwendet.

b) Polarisation durch Reflexion und Brechung

Teilweise Polarisation tritt ein, wenn Licht unter einem bestimmten Winkel reflektiert wird (*Polarisationswinkel*), 50° bis 60° (*Malus*, spr. Malüh, 1808). Ein unter dem Polarisationswinkel auf einen Glaswürfel auftreffender Strahl wird zum Teil reflektiert, zum Teil gebrochen. Auch der gebrochene Strahl schwingt nur in einer Ebene, ist also polarisiert.

Die Schwingungsebenen des reflektierten und des gebrochenen Strahls stehen aufeinander senkrecht. Der Nachweis kann durch Betrachtung im Analysator erbracht werden (Bild 245).

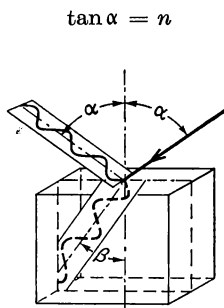


Bild 245. Polarisation durch Reflexion und Brechung

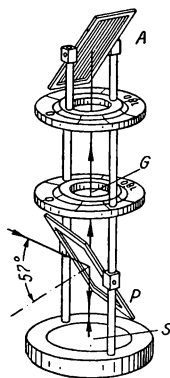


Bild 246
Nörrenbergs Polarisationsapparat

*Brewsters Gesetz*¹ (1815). Der Polarisationswinkel hängt von der Brechzahl ab. Reflektierter und gebrochener Strahl stehen aufeinander senkrecht.

Begründung der Formel: $\beta = 90 - \alpha$; $\sin \alpha : \sin (90 - \alpha) = \tan \alpha = n$. Polarisiertes Licht dient zur Untersuchung von Kristallstrukturen, zur Auffindung von Fehlern bei Glasschmelzen (zu rasche Abkühlung). Nörrenbergs Polarisationsapparat (Bild 246) benutzt eine Glasscheibe als Polarisator (P), einen geschwärzten Spiegel (S) als Analysator (A).

c) Tyndall-Effekt²

Wenn weißes Licht durch ein trübes Mittel, Rauch, Nebel oder verdünnte Milch, geht, wird es seitlich abgelenkt. Dadurch werden die feinen Schwebeteilchen sichtbar. Die Intensität des Streulichtes ist indirekt proportional der vierten Potenz der Wellenlänge. Das Streulicht enthält deshalb mehr kurzwelliges als langwelliges Licht und ist außerdem teilweise polarisiert.

¹ spr. *Bruster*, 1781 bis 1861, schottischer Physiker.

² *J. Tyndall*, 1820 bis 1893; engl. Physiker und Bergsteiger.

Auch das blaue Himmelslicht ist teilweise polarisiert, da kleine Schwebekörperchen in der Luft Beugungserscheinungen hervorrufen. Dabei werden mehr kurzwellige, blaue Strahlen zurückgeworfen als langwellige, rote. Im durchscheinenden Licht (Horizont bei Sonnenuntergang oder -aufgang) überwiegt das gelbe und rote Licht, weil der blaue Anteil abgelenkt und zerstreut ist.

d) Drehung der Polarisationssebene

Quarzplatten haben die Eigenschaft, die Polarisationssebene zu drehen. Die Schwingungsrichtungen bilden im Quarz eine Schraubenfläche; der Grad der Drehung hängt von der Dicke der Quarzplatte und der Farbe des Lichtes ab, es gibt links- und rechtsdrehenden Quarz. Die gleiche Eigenschaft zeigen Weinsäure- und Zuckerlösung. Aus dem Betrag der Drehung läßt sich der Zucker-gehalt bestimmen (*Saccharimeter*).

4. Doppelbrechung

a) Eigenschaften des Kalkspats

Kalkspatkristalle haben Rhomboederform. Legt man einen Kalkspatkristall auf ein bedrucktes Papier, so sieht man die Schrift doppelt. Bei Drehung des Kristalls auf dem Papier wandert das eine Schriftbild um das andere herum.

Erklärung von Fresnel. Im Kalkspat pflanzen sich zwei Elementarwellen fort, die eine gehorcht dem Brechungsgesetz und hat Kugelform, sie ergibt den *ordentlichen Strahl* (o), die andere hat Ellipsoidform, sie liefert den *außerordentlichen Strahl* (ao). Dieser liegt nicht mit dem Einfallslot und dem einfallenden Strahl in einer Ebene. Der ordentliche Strahl wird stärker gebrochen als der außerordentliche. Beide Strahlen sind senkrecht zueinander polarisiert (Bild 247).

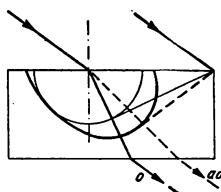


Bild 247. Erklärung der Doppelbrechung durch Fresnel

b) Nicolsche Prismen

Nicol (1768 bis 1851) hat die Eigenschaft des Kalkspats benutzt, um sehr wirkungsvolle Polarisatoren zu konstruieren.

Ein Kalkspatprisma wird in der Richtung der Hauptachse des Kristalls durchgeschnitten und an den Seitenflächen so abgeschliffen,

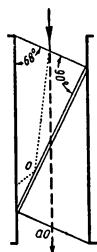


Bild 248
Nicolsches
Prisma

daß die Flächenwinkel 68° und 90° entstehen. Die beiden Stücke werden längs der Schnittfläche mit Kanadabalsam verkittet und das Ganze in ein innen geschwärztes Rohr eingebettet (Bild 248). Der ordentliche Strahl wird an der Grenze Kristall-Kanadabalsam total reflektiert und an der inneren Rohrwand ausgelöscht, der außerordentliche Strahl geht ungehindert hindurch und verläßt das Prisma als polarisierter Strahl. Die Nicolschen Prismen werden zur Herstellung von Polarisationsapparaten verwendet, weil die Polarisationsfilter nicht für alle Farben gleich wirksam sind.

5. Elektrische und magnetische Eigenschaften des Lichtes

a) Der Faradaysche Versuch (1845)

Durch die Polarisierbarkeit wird erwiesen, daß Licht eine transversale Wellenbewegung ist. Die Fortpflanzung der Wellen durch den leeren Raum steht in Analogie zu den elektrischen Kräften, die ebenfalls durch den leeren Raum hindurch wirken. *Faraday* hat den vermuteten Zusammenhang zwischen den Lichtschwingungen und den elektrischen Vorgängen durch folgenden Versuch bestätigt:

Die Polschuhe eines starken Elektromagneten haben eine Bohrung, durch die polarisiertes Licht geschickt wird. Zwischen die Polschuhe wird eine Röhre mit Schwefelkohlenstoff gebracht und der Analysator auf Dunkelheit eingestellt. Bei Einschalten des Elektromagneten hellt sich das Gesichtsfeld auf. Das Magnetfeld dreht die Polarisations Ebene und beeinflußt damit die Schwingungsebene des Lichtes.

b) Der Kerr-Effekt

1873 konnte *Kerr* eine entsprechende Wirkung des elektrischen Feldes nachweisen. Nitrobenzol und Schwefelkohlenstoff sind Nichtleiter, sie zeigen im normalen Zustand beim Lichtdurchgang keine Doppelbrechung. In einem starken elektrischen Feld werden sie doppelbrechend. Die Kerr-Zelle hat beim Bildfunk und

beim Fernsehen technische Anwendung gefunden. Sie gestattet, die Schwankungen eines elektrischen Feldes trägheitslos in Lichtschwankungen zu übertragen.

c) Der Zeeman-Effekt¹

Bringt man Na-Licht zwischen die Pole eines starken Elektromagneten, so zeigt sich bei spektroskopischer Untersuchung eine Aufspaltung der gelben Na-Linie in 2 oder 3 einzelne Linien. Nach der von *Lorentz* entwickelten Elektronentheorie hängt die Lichtaussendung des Na-Atoms mit den Schwingungen der Elektronen um den Na-Kern zusammen. Das magnetische Feld beeinflußt die Elektronenbahnen.

Im leeren Raum sind die stärksten elektrischen und magnetischen Felder ohne Einfluß auf die Lichtausbreitung. Im stoff erfüllten Raum tritt, wie die Versuche zeigen, eine Beeinflussung ein. Auch die Tatsache, daß elektromagnetische Wellen sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, legt den Gedanken nahe, daß Licht und elektromagnetische Wellen den gleichen Charakter haben und sich nur in der Wellenlänge unterscheiden.

¹ *P. Zeeman*, 1866 bis 1943, Professor der Physik in Leiden.

V. Elektrizität und Magnetismus

A. Der elektrische Gleichstrom

1. Stromquellen

Der Name Elektrizität stammt vom Bernstein (gr. electron). Reibt man Bernstein mit einem Wollappen, so zieht er leichte Körper (Papierschnitzel, Haare) an. Die ersten Erkenntnisse über das Wesen der Elektrizität wurden an ruhenden Ladungen gewonnen, während heute für uns die Erscheinungen der strömenden Elektrizität im Vordergrund stehen. Da uns ein besonderes Sinnesorgan für die Elektrizität fehlt, sind wir weitgehend auf Vergleiche angewiesen. Die Kräfte zwischen festhaftenden elektrischen Ladungen lassen sich mit den Anziehungskräften zwischen zwei Massen vergleichen. So wie die Erde von dem Wirkungsbereich ihrer Anziehungskräfte, dem Gravitationsfeld, umgeben ist, wird die ruhende elektrische Ladung von einem elektrischen Feld umgeben. Die Wirkungen der strömenden Elektrizität lassen sich mit denen des fließenden Wassers vergleichen (Spannung $\cong$ Gefälle, Widerstand $\cong$ Flußquerschnitt, elektrischer Strom $\cong$ Wassermenge, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Flusses geht).

Aus dem Umgang mit elektrischen Geräten wissen wir: Die Ursache für das Fließen eines elektrischen Stromes ist die *Spannung* zwischen den Polen der Stromquelle.

Als man das Wesen der Elektrizität noch nicht genau kannte, setzte man willkürlich fest:

Der elektrische Strom fließt vom Pluspol zum Minuspol

Diese Festsetzung ist in der Technik beibehalten worden, obwohl wir heute wissen, daß in Metallen nur die negativen Elektronen fließen, die Stromrichtung also vom Minuspol zum Pluspol gerechnet werden müßte. „Stromquellen“ sind Einrichtungen, die eine Spannung aufrechterhalten, wir müßten besser „Spannungsquellen“ sagen.

Als „Stromquellen“ dienen *galvanische Elemente*, an deren Polen die Spannung durch chemische Umsetzungen aufrechterhalten

wird, und *Akkumulatoren*, deren Spannung durch chemische Umsetzungen bei Durchgang des Ladestromes hergestellt wird. Bei der Entladung treten diese chemischen Umsetzungen in umgekehrter Reihenfolge wieder auf. Bei den *Generatoren* wird die Bewegung eines Leiters im Magnetfeld zur Gewinnung einer Spannung benutzt.

Wir können den elektrischen Strom nur nach seinen Wirkungen beurteilen. Die fünf wichtigsten sind:

1. *Wärmewirkung*. Heizapparate, elektrische Glühlampen, Hitzdrahtinstrumente zur Strommessung, Schmelzsicherungen
2. *Chemische Wirkung*. Zersetzung von Elektrolyten, Versilbern, Vernickeln, Verchromen, Aluminiumgewinnung, Reinherstellung von Kupfer und Eisen
3. *Magnetische Wirkung*. Ablenkung der Magnetnadel in Strom- und Spannungsanzeigern, Elektromagnete, Telegrafie, Telephonie
4. *Motorische Wirkung*. Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld: Motoren
5. *Leuchtwirkung*. Entladungen in Neonröhren, Quecksilberdampflampen, Lichtbogen

Der *elektrische Strom* besteht in der Bewegung freier Elektronen in Drähten, ferner in der Bewegung an Atome gebundener Elektronen in Flüssigkeiten und Gasen.

2. Stromstärke, Spannung, Widerstand

a) Grundeinheiten

Durch internationale Vereinbarung in Jahre 1908 ist die Stromstärke für praktische Zwecke aus der elektrolytischen Wirkung definiert worden. Die Einheit der Stromstärke ist *1 Ampere*, benannt nach dem frz. Physiker *Ampère* (1775 bis 1836).

Die Einheit der Stromstärke besitzt der Strom, der in 1 Sekunde beim Durchgang durch eine wäßrige Lösung von Silbernitrat (Höllenstein) 1,118 mg Silber abscheidet.

†

1 A scheidet in 1 Sekunde 1,118 mg Silber ab
--

Diese Silberabscheidung wird durch den Transport einer bestimmten Ladungsmenge Q hervorgerufen. Man kann die Stromstärke also auch durch die Ladungsmenge messen, die durch den Querschnitt der Leitung geht.

Für die *Einheit der Ladungsmenge* ergibt sich danach:

1 Coulomb oder 1 Amperesekunde ist die Ladungsmenge, die bei der Stromstärke 1 Ampere durch den Querschnitt der Leitung getrieben wird.

1 Ampere (A)	$= \frac{1 \text{ Coulomb (C)}}{1 \text{ Sekunde (s)}}$
1 Milliampere (mA)	$= \frac{1}{1000} \text{ Ampere (A)}$
1 Amperesekunde (As)	$= 1 \text{ Coulomb (C)}$

Die Spannung wird in *Volt* gemessen (benannt nach dem italien. Physiker *Volta*, 1745 bis 1827). Man kann sie für praktische Eichzwecke definieren auf Grund der konstanten Spannung eines *Kadmium-Normalelementes* (vgl. S. 172).

Dieses hat nach internationaler Festlegung bei 20° C eine Spannung von 1,0183 Volt.

Für diese praktischen Definitionen konnte man keine glatten Zahlen wählen, weil aus den länger bekannten Gesetzen für die Wirkung ruhender Elektrizitätsmengen sich schon andere Definitionen eingebürgert hatten, die mit der praktischen in Übereinstimmung gebracht werden mußten.

Beachten Sie: Die Spannung zwischen den Polen der Steckdose oder einer Spannungsquelle besteht auch, wenn die Steckdose offen ist, also kein Strom fließen kann.

Spannung ist die Bereitschaft, Strom zu liefern

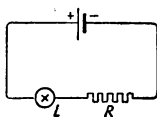


Bild 249
Geschlossener
Stromkreis

Der elektrische Strom kann nur fließen, wenn ein geschlossener Stromkreis vorhanden ist (Bild 249). Dieser besteht aus einer Spannungsquelle (Stromquelle), einem Leiter, meist einem Draht, durch den die Elektronen sich bewegen können, und einem „Stromverbraucher“, dem Gerät (L), das durch den Strom betrieben werden soll. Stoffe,

in denen auch eine hohe Spannung keine Elektrizitätsbewegung hervorruft, bezeichnet man als Isolatoren. Bernstein, Glas, Hartgummi und verschiedene Kunststoffe sind Isolatoren. Metalle sind gute Leiter.

Die Leiter setzen dem Durchgang des Stromes verschieden große *Widerstände* entgegen. Diese hängen vom Material ab (*spezifischer Widerstand* ϱ als Materialkonstante), vom Querschnitt q (bei Drähten in mm^2) und von der Länge des Leiters (l), bei Drähten gemessen in m. Der reziproke Wert $\frac{1}{\varrho}$ des spez. Widerstandes wird als spezifische Leitfähigkeit bezeichnet.

Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω), benannt nach dem deutschen Physiker *Ohm* (1787 bis 1854).

$$\text{Widerstand } R = \varrho \frac{l}{q} [\Omega]$$

Zur praktischen Herstellung des Widerstandes von 1Ω dient ein Quecksilberfaden von $1,063\text{ m}$ Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei einer Temperatur von 0°C .

Tabelle der spez. Widerstände bei 0°C

Silber . . 0,016	} gute Leiter	Konstantan 0,496	} für Widerstandsdrähte
Aluminium 0,032		Manganin . 0,42	
Kupfer . . 0,017		Nickelin . . 0,42	
Eisen . . 0,090 ... 0,150			
Quecksilber 0,958			

In Metallen wächst der spez. Widerstand mit der Temperatur $\varrho_t = \varrho_0 (1 + \beta t)$, für Al, Fe, Cu ist $\beta = 0,005 \dots 0,003$, bei Kohle ($\beta = -0,003$) und leitenden Flüssigkeiten nimmt der spez. Widerstand mit steigender Temperatur ab.

Die zur Strom- und Spannungsmessung dienenden Instrumente beruhen entweder auf der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes oder auf der Wärmewirkung. Wir wollen sie so lange als gegeben hinnehmen, bis wir die nötigen Kenntnisse zur Erklärung ihrer Wirkungsweise gewonnen haben.

b) Ohmsches Gesetz

Bei der Festsetzung der drei Grundeinheiten ist darauf Rücksicht genommen worden, daß alle drei durch ein einfaches Gesetz miteinander verknüpft sind.

$$\text{Ohmsches Gesetz: Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}; \quad I[\text{A}] = \frac{U[\text{V}]}{R[\Omega]}$$

Zur Drosselung des Stromdurchgangs dienen eingeschaltete Widerstände, diese verbrauchen einen Teil der Spannung zur Umwandlung des Stromes in Wärme.

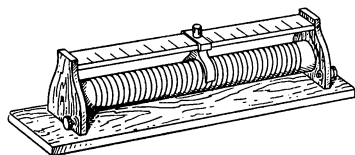
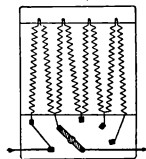
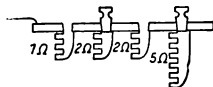
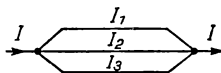


Bild 250. Schiebewiderstand

Widerstandsgeräte (Rheostate):

1. Widerstandssaiten
2. Schiebewiderstand (Bild 250)
3. Kurbelwiderstand (Bild 251)
4. Stöpselwiderstand (Bild 252)

Das Ohmsche Gesetz gilt nicht nur für den geschlossenen Gesamtstromkreis, sondern auch für jedes Teilstück. Zu jedem Leiterstück gehört ein bestimmter Spannungsabfall, der den Strom durch das Leiterstück treibt, in jedem „Stromverbraucher“ (Gerät) tritt ein besonders großer Spannungsabfall auf. Die Summe der Spannungsdifferenzen ergibt die Gesamtspannung, die „elektromotorische Kraft“ der Spannungsquelle. Die Stromstärke ist an jeder Stelle der Leitung gleich,

Bild 251
KurbelwiderstandBild 252
StöpselwiderstandBild 253
Stromverzweigung

weil nicht mehr Elektronen abfließen können als zufließen. Man darf einen Strommesser deshalb an beliebiger Stelle des unverzweigten Stromkreises einschalten, einen Spannungsmesser aber nur zwischen den beiden Punkten, deren Spannungsdifferenz bestimmt werden soll.

3. Stromverzweigung und Schaltung von Elementen

a) Die Gesetze von Kirchhoff

Für Stromverzweigungen gelten die folgenden Gesetze:

Die Summe der Teilströme ist gleich dem Gesamtstrom (Bild 253):

1.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Die Stromstärken zweier Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige.

2.

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1 \quad \text{oder} \quad I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

Begründung: Da die Stromstärke vor und hinter der Verzweigung die gleiche ist, kann nur $I = I_1 + I_2 + I_3$ sein.

Das zweite Gesetz folgt aus dem Ohmschen Gesetz. Die Spannung U der beiden Zweigpunkte mißt zugleich die Spannung für jeden Zweig.

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad \text{also} \quad I_1 : I_2 = R_2 : R_1$$

b) Schaltung von Widerständen

Aus den Kirchhoffschen Gesetzen folgen die Regeln für die Schaltung von Widerständen:

Hintereinanderschaltung (Serienschaltung oder Reihenschaltung) (Bild 254):

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Begründung: $I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3}; \quad U_1 + U_2 + U_3 = U$

$$U = I R_1 + I R_2 + I R_3 = I (R_1 + R_2 + R_3) = I R$$

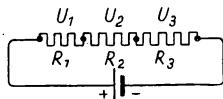


Bild 254. Hintereinanderschaltung von Widerständen

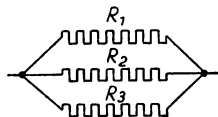


Bild 255. Parallelschaltung von Widerständen

Parallelschaltung (Bild 255):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad R \text{ heißt der Ersatzwiderstand.}$$

Begründung: $I_1 = \frac{U}{R_1}$; $I_2 = \frac{U}{R_2}$; $I_3 = \frac{U}{R_3}$

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = I_1 + I_2 + I_3; \quad \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Der Gesamtwiderstand ist kleiner als jeder der Teilwiderstände, weil jeder neue Zweig eine Querschnittsvergrößerung ergibt.

Sonderfälle

1. *Spannungsteilerschaltung* (Bild 256). Sie wird angewandt, wenn man von einer gegebenen Spannung (Netzspannung) nur einen Teil für den Betrieb eines Apparates verwenden darf. Die Netzspannung treibt durch den Widerstand einen bestimmten Strom. Die Spannung fällt im Widerstand um den Betrag U ab, davon ver-

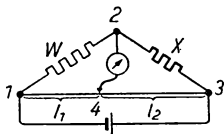
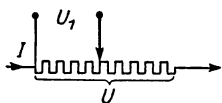


Bild 256. Spannungsteilerschaltung

Bild 257. Wheatstonesche Brückenschaltung

wendet man einen Teil U_1 für die Abzweigung. Der Nachteil der Spannungsteilerschaltung besteht darin, daß im Hauptstromkreis unnütz Strom in Wärme verwandelt wird.

2. *Wheatstonesche Brückenschaltung* (Bild 257). Die Brückenschaltung dient zum Vergleichen von Widerständen. Zwei wenig verschiedene Widerstände w und x bilden den einen Zweig, der Meßdraht mit verschiebbarem Kontakt den anderen Zweig. Der Strom I verzweigt sich in die Teilströme I_1 und I_2 . Wenn das empfindliche Meßinstrument Stromlosigkeit der Brücke zeigt, kann zwischen 2 und 4 keine Spannung bestehen, d. h., der Spannungsabfall von 1 nach 2 ist ebenso groß wie der von 1 nach 4.

$$I_1 = \frac{U_1}{w}; \quad I_2 = \frac{U_1}{l_1}; \quad I_1 = \frac{U_2}{x}; \quad I_2 = \frac{U_2}{l_2}$$

$$\frac{U_1}{w} = \frac{U_2}{x}; \quad \frac{U_1}{l_1} = \frac{U_2}{l_2}; \quad U_1 : U_2 = \frac{w}{x} = \frac{l_1}{l_2}$$

Wheatstonesche Brücke: $l_1 : l_2 = w : x$

Der Meßdraht ist längs eines Maßstabes gespannt, so daß man direkt die Teillängen ablesen kann. Neben dieser einfachen Bauart gibt es moderne handliche Geräte mit Drehwiderständen und einer größeren Auswahl von Meßbereichen. Hierbei kann der Widerstand ohne Rechnung direkt abgelesen werden.

c) Schaltung von Elementen

Hintereinanderschaltung (Reihenschaltung). Man verbindet den Minuspol (—) des ersten Elements mit dem Pluspol (+) des zweiten usw.

Bei Hintereinanderschaltung addieren sich die Teilspannungen.

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Hintereinanderschaltung von n gleichen Elementen: Jedes Element soll den inneren Widerstand R_i haben, der Widerstand des Stromkreises soll R_a sein. Bei Hintereinanderschaltung ist der gesamte innere Widerstand $n R_i$.

$$I = \frac{n U}{n R_i + R_a} = \frac{U}{R_i + \frac{R_a}{n}}$$

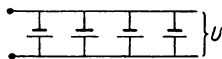


Bild 253. Parallelschaltung von Elementen

Hintereinanderschaltung ist zweckmäßig bei großem äußerem Widerstand.

Parallelschaltung. Alle Pluspole (+) werden mit einer Sammelschiene verbunden, alle Minuspole (—) mit der anderen. An den Enden der Schienen tritt die gleiche Spannung auf wie am Element.

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

Parallelschaltung (Bild 258) von n gleichen Elementen: Bei Parallelschaltung verringert sich der innere Widerstand, weil die Parallelschaltung einer Querschnittsvergrößerung gleichkommt.

$$I = \frac{U}{\frac{R_i}{n} + R_a}$$

Parallelschaltung ist zweckmäßig bei verhältnismäßig großem innerem Widerstand und kleinem äußerem Widerstand.

Gemischte Schaltung. Man wählt die Gruppierung der Elemente so, daß die Schaltung möglichst gleichen inneren und äußeren Wider-

stand ergibt. Zum Beispiel m parallele Elementegruppen zu je n Elementen hintereinander:

$$I = \frac{nU}{\frac{nR_i}{m} + R_a} = \frac{U}{\frac{R_i}{m} + \frac{R_a}{n}}$$

Reihenschaltung von Elementen bedeutet Spannungserhöhung, Parallelschaltung Erhöhung der Stromstärke.

d) Schaltung von Meßinstrumenten

Die elektrischen Meßinstrumente benutzen entweder die magnetischen Wirkungen des Stromes (Nadelgalvanometer, Drehspulinstrumente, Weicheiseninstrumente) oder die Wärmewirkung (Hitzdrahtinstrumente). Ihre besondere Verwendung als Ampere-meter oder Voltmeter hängt von der Schaltung und Verwendung von Nebenwiderständen ab.

Merke:

Strommesser liegen im Hauptschluß (Bild 259),
Spannungsmesser im Nebenschluß (Bild 260)

Das Anzeigeinstrument soll hochempfindlich sein, es ist deshalb nur für den Stromdurchgang von einigen Milliampere geeignet, der Instrumentwiderstand sei R_i . Um das Instrument auch für andere

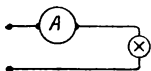


Bild 259. Strommesser liegen im Hauptschluß



Bild 260. Spannungsmesser liegen im Nebenschluß

Meßbereiche verwenden zu können, wird es in den Nebenschluß eines Widerstandes R_n gelegt (Shunt). Dieser Widerstand bestimmt nach den Kirchhoffschen Gesetzen den Meßbereich des Instrumentes. Soll der Meßbereich eines Amperemeters auf das n -fache erweitert werden, so darf nur $1/n$ des Hauptstroms durch das Instrument gehen (Bild 261).

$$I_n : I_i = (n - 1) : 1 = R_i : R_n ; \quad R_n = \frac{R_i}{n - 1}$$

Beispiel: Amperemeterwiderstand 50Ω , Meßbereich 50 mA , d. h., das Instrument kann höchstens 50 mA vertragen. Der Meßbereich soll auf 5 Ampere erweitert werden, d. h. auf das 100fache:

$$R_n = \frac{50 \Omega}{100 - 1} = \frac{50 \Omega}{99} \approx 0,5 \Omega$$

Schaltet man dem Meßinstrument einen hohen Widerstand R_v vor und legt es in den Nebenschluß, so geht durch das Instrument nur ein schwacher Strom $i = \frac{U}{R_v + R_i}$, der Hauptstrom wird nicht merklich geschwächt.

Das Instrument mißt die Spannung $U = i(R_v + R_i)$ und kann so in Volt geeicht werden, es heißt dann Voltmeter (Bild 262).

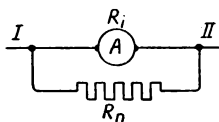


Bild 261. Erweiterung des Meßbereiches eines Amperemeters

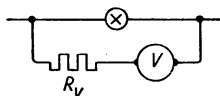


Bild 262. Schaltung eines Meßinstrumentes als Voltmeter

Der Spannungsabfall verteilt sich auf $R_v + R_i$. Der Vorwiderstand R_v ist meist fest eingebaut.

Soll der Meßbereich dieses Voltmeters erweitert werden, d. h., soll nur noch $1/n$ der Spannung auf das Instrument kommen, so gilt: $R_v : R_i = (n - 1) : 1$; $R_v = R_i (n - 1)$. Bei Erweiterung des Meßbereiches auf den 100fachen Betrag muß der 99fache Instrumentenwiderstand vorgeschaltet werden.

4. Wärmewirkung des Stromes, Stromarbeit

a) Stromwärme

Beim Stromdurchgang erwärmt sich der Leiter. Die vom Strom erzielte Erwärmung hängt von der Stromstärke und vom Widerstand ab. Messung im Kalorimetergefäß (Bild 263).

Die vom Strom erzielte Wärmemenge ist dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand proportional (*Joule* 1843).

$$\text{Wärmemenge } Q = C I^2 R t \text{ cal} = C I U t \text{ cal.}$$

Elektrisches Wärmeäquivalent $C = 0,239 \frac{\text{cal}}{\text{V As}}$.

Mißt man die Spannung in Volt und die Stromstärke in Ampere, so ergibt sich daraus $C = 0,239$. Doppelte Stromstärke ergibt in der gleichen Zeit die 4fache Wärmemenge.

Die *Wärmeausdehnung* eines Drahtes bei Stromdurchgang kann zur Strommessung benutzt werden: *Hitzdrahtinstrument* (Bild 264). Der vom Strom durchflossene Widerstandsdraht wird durch einen Faden aus Isolierstoff gespannt. Der Faden ist um eine Rolle mit Zeiger gewickelt. Bei Erwärmung durch den Strom dehnt der Draht sich aus, die Feder (F) zieht ihn weiter nach unten, der Zeiger geht also nach rechts.

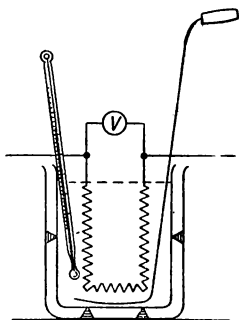


Bild 263. Bestimmung der Stromwärme

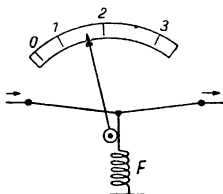


Bild 264
Schema eines Hitzdrahtinstrumentes

Da die Erwärmung und damit auch die Ausdehnung mit dem Quadrat der Stromstärke wächst, ist an den Hitzdrahtinstrumenten eine Skala angebracht, deren Teilstrichabstände wie die Quadratzahlen wachsen. Hitzdrahtinstrumente werden als grobe Schalttafelinstrumente gebraucht.

Vorzug: Verwendbarkeit auch für Wechselstrom.

Weitere Geräte, deren Wirkung auf der Stromwärme beruht: Glühlampen, Heizöfen, Kochplatten, Bügeleisen, Kohlelichtbogen.

b) Stromleistung

Die Leistung kann gemessen werden in Watt = $\frac{\text{Joule}}{\text{Sekunde}}$.

$$\text{Leistung } N = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

$$1000 \text{ cal} \cong 427 \text{ kpm} = 427 \cdot 981\,000 \cdot 100 \text{ erg} = 4187 \text{ Joule}$$

$$0,239 \text{ cal} \cong \frac{4187}{1000} \cdot 0,239 \text{ Joule} \approx 1 \text{ Joule} = 1 \text{ Wattsekunde.}$$

Aus dem Jouleschen Gesetz für die Stromstärke ergibt sich $0,239 \text{ cal} \cong 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Ampere} \cdot 1 \text{ s}$, also ist

$$\begin{aligned} 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Ampere} &= 1 \text{ Watt} \\ 1 \text{ kW} &= 1000 \text{ W} \end{aligned}$$

(vgl. S. 33).

$$1 \text{ PS} = 75 \frac{\text{kpm}}{\text{s}} = 75 \cdot 9,81 \text{ W} = 736 \text{ W}; \quad 1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}$$

c) Stromarbeit

Die Rechnung des E-Werkes enthält die Aufstellung der vom Werk gelieferten Arbeit. Die Arbeit 1 Kilowattstunde wird entnommen, wenn der Verbraucher 1 Stunde lang 1 kW Leistung beansprucht oder $1/n$ Stunde n kW.

$$\text{Arbeit} = \text{Leistung} \cdot \text{Zeit}$$

Einheit der Stromarbeit: 1 Wattsekunde = 1 Watt · 1 Sekunde (Ws)

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kilowattstunde (kWh)} &= 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} \\ &= 3\,600\,000 \text{ Ws (Joule)} = 367\,200 \text{ kpm} \end{aligned}$$

Nach dem Jouleschen Gesetz entspricht 1 Ws 0,239 cal.

$$1 \text{ kWh} \cong 0,239 \cdot 3600 \text{ kcal} = 860,4 \text{ kcal.}$$

d) Thermoelektrizität und Peltier-Effekt

Eine unmittelbare Umwandlung von Wärme in Elektrizität geschieht in den Thermoelementen.

Grundversuch. Zwei verschiedene Metalle (etwa Kupfer und Wismut) sind an dem einen Ende hart verlötet. Erhitzt man die Lötstelle, so zeigt sich an den beiden freien Enden eine Spannung. Die beiden Metallstreifen bilden ein *Thermoelement*. Besonders wirkungsvoll sind Eisen und Wismut oder Kupfer und Wismut. Die auftretende Spannung ist gering, z. B. Wismut-Kupfer 0,000 093 V

bei 1° Temperaturdifferenz, da aber R oft klein ist (z. B. $0,003 \Omega$), ergibt sich doch eine brauchbare Stromstärke: Bei 100° Temperaturunterschied $I = \frac{0,0093}{0,003} = 3,1 \text{ A}$.

Hintereinandergeschaltete Thermoelemente bilden eine *Thermosäule*. Thermoelemente werden zur Temperaturmessung in Hochöfen verwendet. Die Spannung muß in Millivolt gemessen werden (Thermoelemente aus Platin-Platinrhodium; ergeben für je 100°C $0,001 \text{ Volt}$).

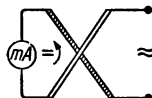


Bild 265
Thermokreuz

Zur Messung von Wechselströmen hoher Frequenz dient das Thermokreuz (Bild 265). Der Wechselstrom führt zur Erwärmung der Lötstelle. Am anderen Ende des Kreuzes bildet sich eine Spannungsdifferenz. Hier wird über ein Milliampere-meter ein Gleichstromkreis geschlossen.

Die Umkehrung des Thermoeffekts ist der *Peltier-Effekt*: Schickt man einen Strom durch die Lötstelle zweier verschiedener Metalle, so kühlt sich die Lötstelle ab oder erwärmt sich je nach Stromrichtung. Abkühlung tritt ein, wenn der Strom in der gleichen Richtung fließt, in der bei Erwärmung der Lötstelle ein Thermostrom entstehen würde.

5. Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes

a) Grundgesetze der Elektrolyse

Der Elektrizitätstransport in Flüssigkeiten unterscheidet sich prinzipiell von dem in festen Leitern. In festen Leitern wandern frei bewegliche Elektronen, in Flüssigkeiten geschieht der Transport der Ladungen durch Atome und Molekeln, die die Ladung tragen (Ionen¹). Die leitende Flüssigkeit heißt *Elektrolyt*. In die Flüssigkeit tauchen zwei Elektroden; die mit dem positiven Pol der Stromquelle verbundene heißt *Anode*, die mit dem negativen Pol verbundene *Kathode*.

Bei der Lösung von Kupfervitriol in Wasser (Bild 266) tritt eine Spaltung (Dissoziation) der CuSO_4 -Molekeln ein. Cu erhält positive Ladung, der Säurerest SO_4 gleich große negative Ladung. Legt

¹ ion, griech., wandernd.

man an die Elektroden eine Spannung, so wandert das Cu -Ion mit seiner positiven Ladung zur Kathode und gibt hier seine Ladung ab, das SO_4 -Ion zur Anode. Die Abgabel der Ladung macht die Ionen zu neutralen Molekeln und damit frei zu neuer chemischer Bindung. SO_4 entreißt dem Wasser das H_2 und bildet H_2SO_4 (Schwefelsäure). Der Sauerstoff entweicht an der Anode. Cu setzt sich als metallisches Kupfer an der Kathode ab. Die beiden entgegengesetzten Ionenwanderungen kann man als elektrischen Strom auffassen, der durch den Elektrolyten von der Anode zur Kathode fließt. Stromquelle, Leiter und Zersetzungs- zelle bilden einen Stromkreis.

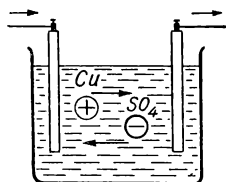


Bild 266. Elektrolyse von Kupfervitriollösung

Wasserstoff und Metalle wandern mit dem positiven Strom
und scheiden sich an der Kathode ab

Wasserstoff und Metalle bezeichnet man deshalb als Kationen im Gegensatz zu den negativen Ionen, die zur Anode wandern und daher Anionen heißen.

b) Technische Anwendungen der Elektrolyse

1. *Reingewinnung von Metallen*: Elektrolytkupfer.
2. *Galvanotechnik*: Versilbern, Vernickeln, Verkupfern, Verchromen.
Der Gegenstand wird als Kathode in einen Elektrolyten gebracht. Der Stromdurchgang muß genau dosiert werden, damit der Abscheidungsprozeß nicht zu heftig vor sich geht und der Metallüberzug nicht wegen Blasenbildung schlecht haftet.
3. *Galvanoplastik*: Reproduktion von Gegenständen durch Überziehen eines Gipsmodells mit einer Metallschicht. Herstellung von Klischees, Herstellung nahtloser Kupferröhren.
4. *Metallgewinnung*: Aluminium aus Bauxit.

c) Faradays Gesetze

1. *Gesetz 1833*. Die bei der Elektrolyse abgeschiedenen Stoffmengen sind proportional zur Stromstärke und zur Zeit.

1 *Ampere* scheidet in 1 *Sekunde* ab:

0,0104 mg Wasserstoff	0,0840 mg Sauerstoff
0,3039 mg Nickel	0,0935 mg Aluminium
0,339 mg Zink	0,329 mg Kupfer
1,118 mg Silber	

$$G = A I t$$

A heißt das *elektrochemische Äquivalent*, es ist die in einer Sekunde von 1 A abgeschiedene Stoffmenge in Milligramm.

Stoff	A (mg/As)	Atomgewicht	Wertigkeit	Äquivalentgewicht
Silber	1,118	108	1	108
Kupfer	0,329	63,6	2	31,8
Wasserstoff	0,0104	1,008	1	1,008
Sauerstoff	0,0829	16	2	8

Die durch die gleichen Elektrizitätsmengen aus verschiedenen Elektrolyten ausgeschiedenen Stoffmengen verhalten sich wie die Äquivalentgewichte.

$$\text{Äquivalentgewicht} = \frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Wertigkeit}}$$

Ein Grammatom ist die Stoffmenge, deren Grammzahl gleich dem Atomgewicht ist. Die Atomgewichte selbst sind relative Zahlen. Bei der Ausscheidung von einem Grammatom eines n -wertigen Stoffes fließen $n \cdot 96500$ Coulomb durch den Elektrolyten. Die Atome von 1 g Wasserstoff tragen demnach 96500 Coulomb. 1 g Wasserstoff enthält aber $6 \cdot 10^{23}$ Atome, daraus folgt für die Ladung eines Wasserstoffatoms:

$$e = \frac{96500}{6 \cdot 10^{23}} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} = 1,60 \cdot 10^{-19} \frac{\text{dyn}}{\text{Volt/cm}}$$

(vgl. S. 185)

1 Atom Wasserstoff trägt bei der Elektrolyse 1 *elektrisches Elementarquantum*. Die bei der Elektrolyse abgeschiedenen Stoffmengen

sind sehr genau meßbar. Man hat deshalb diese Abscheidungen zur Strommessung benutzt. Derartige Apparate heißen *Coulombmeter* oder *Voltameter* (nicht verwechseln mit Voltmeter!). Im Knallgascoulombmeter wird die abgeschiedene Knallgasmenge ($H_2 + O$) gemessen, im Kupfercoulombmeter die abgeschiedene Kupfermenge, im Silbercoulombmeter die Silbermenge.

1 A scheidet in 1 s 1,118 mg Silber ab

Das Silbercoulombmeter besteht aus einem Platintiegel (Kathode), der mit Höllesteinlösung gefüllt wird (Silbernitrat). In die Lösung ragt ein Silberstift als Anode. Die im Tiegel abgeschiedene Silbermenge wird durch Wägung bestimmt. Das Silbercoulombmeter wird zu Eichzwecken benutzt.

d) Galvanische Elemente

Zwischen der in einen Elektrolyten eintauchenden Elektrode und der Flüssigkeit tritt eine für jeden Stoff charakteristische Spannung auf; sie entsteht dadurch, daß Metallionen in die Flüssigkeit übergehen. Die Elektrode erhält dabei die entgegengesetzte Ladung: *elektrolytischer Lösungsdruck*.

Im *Volta-Element* (Zink und Kohle in verdünnter Schwefelsäure) treten positive Zinkionen in die Flüssigkeit, der Zinkstab wird negativ, der Kohlestab, an den die Zinkionen ihre Ladung abgeben, dagegen positiv. Im äußeren Stromkreis fließt ein Dauerstrom. Die fortschreitende Auflösung des Zinks erhält die Spannung aufrecht. Allerdings sinkt ihr Betrag bald ab, weil sich die Kohle infolge der sekundären Reaktion $Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$ mit Wasserstoff überzieht und die Ladungsabgabe weiterer Zinkionen behindert (Polarisation).

Daniell-Element (Bild 267). In einer porösen Tonzelle steht ein Kupferblock in Kupfersulfatlösung, der Tonzylinder steht in ver-

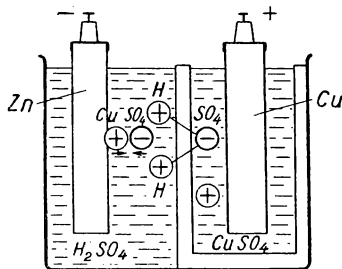


Bild 267. Chemischer Vorgang im Daniell-Element

dünnter Schwefelsäure und ist von einer Zinkelektrode umgeben. Der Lösungsdruck des Kupfers ist geringer als der des Zinks. Die steigende Konzentration des Kupfersulfats verkehrt den Lösungsdruck des Kupfers in das Gegenteil, Kupferionen schlagen sich am Metall nieder und geben ihre positive Ladung ab, der Kupferstab wird positiv, der Zinkstab wie beim Volta-Element negativ. Die Ablagerung von Wasserstoff wird dadurch verhindert, daß die H_2 -Ionen an der Scheidewand ihre Ladung gegen die SO_4 -Ionen der Kupfersulfatlösung kompensieren. Das Element ist konstant, Spannung 1,09 V.

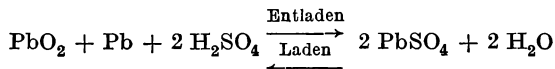
Im *Leclanché-Element* besteht der Pluspol (+) aus Kohle, die von einem Beutel mit Braunstein umgeben ist. Als Elektrolyt dient Salmiaklösung, der andere Pol ist Zink. Der Braunstein (MnO_2) bindet den Wasserstoff chemisch und verhindert die Polarisation (Spannung 1,5 V).

Bei Trockenelementen ist die Salmiaklösung in einer Gallertmasse gebunden.

Eine besonders konstante Spannung liefert das *Kadmium-Normalelement* (Weston-Element), es dient als Spannungsnormale (bei 20° C 1,0183 V, vgl. S. 158).

Technisch wichtiger sind die Sekundärelemente, bei denen die bei Stromdurchgang (Laden) auftretenden chemischen Umsetzungen beim Entladen wieder rückgängig gemacht werden.

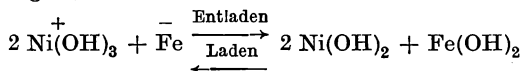
Der *Bleiakkumulator* enthält 2 Systeme von Bleiplatten (PbO) in verdünnter Schwefelsäure. Bei Durchgang des Ladestroms werden SO_4 -Ionen zur Anode getrieben, die Anode überzieht sich mit Bleidioxid (PbO_2), da der Säurerest das Wasser zersetzt und O frei wird. An der Kathode wird PbO in Blei verwandelt.



Beim Laden steigt die Schwefelsäurekonzentration; sie dient als Maß für den Grad der Aufladung und wird mit einem Aräometer geprüft.

Die Spannung je Zelle beträgt 2 V, sie ist unabhängig von der Plattengröße.

Der *Nickeleisenakkumulator* hat als Elektrolyt Kalilauge (21 %), als Elektroden Nickel und Eisen. Beim Laden verwandelt sich die Anode in Nickelhydroxyd, die Kathode in reines Eisen. Die Spannung beträgt 1,2 V.



6. Elektrizitätsleitung in Gasen und im Vakuum

a) Entladung in Luft von normalem Druck

Unter normalen Verhältnissen ist die Luft ein Nichtleiter. Bei Einwirkung von Wärme oder ultravioletter Strahlung wird sie leitend. Träger der Elektrizität sind die *Gasionen*. Werden diese von außen zugeführt oder im Gas selbst erzeugt, wie bei Zuführung von Flammgasen oder bei Bestrahlung, so heißt die Entladung *unselbständig*. Bei hoher Spannung zwischen den Elektroden (Funkeninduktor, Influenzmaschine) tritt auch ohne Zuführung von Ionen zuerst eine Sprühentladung (Glimmlicht) ein, die dann bei steigender Spannung durch Stoßionisation zu unterbrochener Entladung (Funkenentladung) und schließlich zur ununterbrochenen Entladung führt (Bogenentladung, Lichtbogen). *Selbständige Entladung*. Die Eigenschaft ultravioletter Strahlen, aus Zink und anderen Metallen Elektronen frei zu machen, die dann Träger der Entladung werden, heißt *lichtelektrischer Effekt* (*Hallwachs* 1888). Eine wichtige Anwendung findet der lichtelektrische Effekt in der Photozelle zur Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie. Ein luftleeres oder mit Edelgas gefülltes Glasgefäß enthält eine Alkalimetallschicht und zwei eingeschmolzene Elektroden. Die Zelle wird meist mit äußerer Spannung betrieben, sie dient als Steuerorgan. Der vom Licht ausgelöste Elektronenstrom ist der Lichtintensität proportional. Die Photozelle arbeitet trägheitsfrei, sie wird beim Tonfilm und der Bildübertragung angewendet.

b) Entladung in verdünnten Gasen

Wird der Druck des Gases, in dem sich die Elektroden befinden, erniedrigt, so zeigen sich Entladungserscheinungen, die mit dem Gasdruck und der Spannung wechseln (Geißlersche Röhren).

Druck in mm QS	Spannung in V	Erscheinung (Bild 268)
40	3000	blaues, schmales Funkenband
6	1700	rötliches Licht, kurz vor der Kathode der Faradaysche Dunkelraum
2	1000	Vergrößerung des Dunkelraums, Glimmlicht an der Kathode
0,4	600	Schichten rötlichen Glimmlichts
0,1	800	keine Schichtung mehr, das bläuliche Licht von der Kathode getrennt, Hittorfscher Dunkelraum
0,03	15000	Röhre lichtlos, Glaswand gegenüber der Kathode fluoresziert.

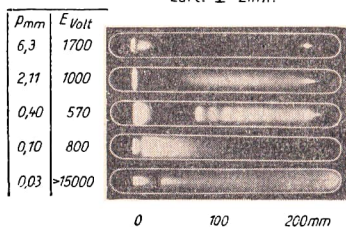
Luft. $I = 2\text{ mA}$.

Bild 268. Entladung in verdünnten Gasen

e) Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen

In hochevakuierten Röhren geht von der Kathode eine Strahlung aus, die die gegenüberliegende Wand der Röhre zur Fluoreszenz bringt. Ein Blechschirm im Strahlengang zeigt durch seinen Schatten die geradlinige Ausbreitung der

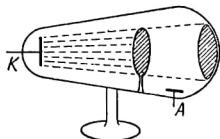


Bild 269. Kathodenstrahlen

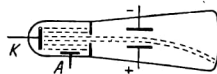


Bild 270. Ablenkung des Kathodenstrahls durch ein elektrisches Feld

Strahlung (Bild 269). Diese wird durch Elektronen hervorgerufen, die von der Kathode ausgeschleudert werden:

Kathodenstrahlen (Bild 269). Der Strahl kann durch Magnete und elektrische Ladungen abgelenkt werden (Bild 270).

Die Ablenkungsversuche dienen zur Bestimmung des Verhältnisses e/m der Ladung zur Masse.

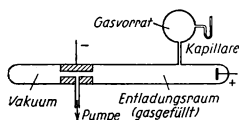
$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^8 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$$

1 g „Kathodenstrahlteilchen“ trägt die Ladung $1,76 \cdot 10^8 \text{ C/g}$
 $= 1850 \cdot 96500 \text{ C/g} = 96500 \text{ C} : \frac{1}{1850} \text{ g}$.

Die Masse des Elektrons beträgt $\frac{1}{1850}$ der Masse des Wasserstoffatoms

Die Kathodenstrahlen regen viele Stoffe zur Fluoreszenz an, sie üben einen mechanischen Druck aus (Flügelrad in Kathodenstrahlröhre). Die Geschwindigkeit der Elektronen im Kathodenstrahl hängt von der Spannung ab und nimmt bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit zu.

1000 V	19000 km/s
10000 V	51000 km/s
100000 V	65000 km/s



Goldstein hat im Jahre 1886 als Kathode eine durchlöchernte Scheibe gewählt und dabei eine Strahlung gefunden, die auf der Rückseite der Kathode auftritt: die **Kanalstrahlen**. Sie sind ebenfalls ablenkbar, haben zum größten Teil positive Ladung; ihre Masse ändert sich mit der Gasfüllung des Rohres (Bild 271).

Bild 271. Magnetische und elektrische Ablenkung der Kanalstrahlen

Die **Kanalstrahlen** bestehen überwiegend aus positiv und verschieden stark geladenen Atomen

Versuche von *Thomson* und *Aston* (1919) haben zur Auffindung der *Isotope* (Massenspektroskopie) geführt.

Isotope sind chemisch gleichartige Elemente mit verschiedenem Atomgewicht. Atomgewichte mit Bruchzahlen sind Mittelwerte von Isotopen mit verschiedenen, ganzzahligen Atomgewichten.

d) Entladung im Hochvakuum, die Elektronenröhre

Das Hochvakuum selbst ist ein vollkommener Isolator. Man kann aber auch im Hochvakuum eine unselbständige Entladung einleiten:

1. durch Bestrahlung mit ultravioletttem Licht: *lichtelektrischer Effekt*,
2. durch Erhitzen der Kathode: *glühelektrischer Effekt*.

Die Untersuchung der Strahlung in der *Braunschen Röhre* führt zu dem Ergebnis, daß die Ladungsträger Elektronen sind. In der Braunschen Röhre lassen sich die Elektronenstrahlen durch elektrische und magnetische Felder (vgl. b und c) fast trägheitslos steuern (Bild 272).

Man kann die Ablenkung des Kathodenstrahls durch die Felder dazu benutzen, um den Verlauf einer veränderlichen Spannung oder eines veränderlichen Stromes aufzuzeichnen (Kathodenstrahl-oszillograph). Meist trägt die Braunsche Röhre am Kolbenboden eine Schicht, auf der der auftreffende Strahl einen fluoreszierenden

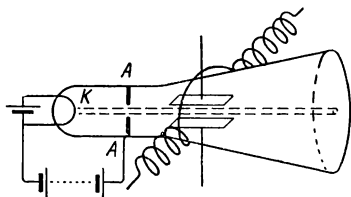


Bild 272. Braunsche Röhre mit Ablenkplatten und Magnetspulen

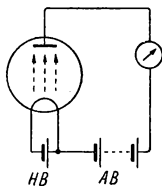


Bild 273. Weg des Anodenstroms

Fleck erzeugt. Der Verlauf der Schwingung wird mit Hilfe eines rotierenden Spiegels betrachtet oder durch eine besondere Ablenkvorrichtung direkt auf den Schirm gezeichnet.

Die einfachste Form der Elektronenröhre ist die *Zweipolröhre*: Kathode ist ein Heizfaden aus Wolframdraht, ihr steht, durch ein Hochvakuum getrennt, die Anode gegenüber. Liegt eine Gleichspannung an den Elektroden, so fließt in der Röhre ein Elektronenstrom, der *Anodenstrom* (Bild 273).

In der Funktechnik wählt man als Stromrichtung die Richtung der Elektronen von der Kathode zur Anode. Legt man an die

Elektroden eine Wechsellspannung, so kann der Elektronenstrom nur fließen, wenn die Anode gerade positiv geladen ist. Die Röhre übt eine *Gleichrichterwirkung* aus.

Technische Anwendung: Glühkathoden-Gleichrichter. Liegt eine Wechsellspannung an der Anode, so ist der Anodenstrom während der negativen Halbwelle gedrosselt und fließt nur während der positiven Halbwelle. Mit der Gleichrichterröhre mit zwei Anoden (Bild 274) gelingt es, beide Halbwellen für den Anodenstromdurchgang auszunutzen. Der Wechselstrom des Primärkreises wird transformiert (vgl. S. 216). Ein Teil der Sekundärspule liefert den Heizstrom für die indirekt geheizte Kathode. In der Mitte (M) ist der andere Teil der Sekundärspule angezapft. Schwingt in dieser der Wechselstrom nach links, so wird die Anode A_1 positiv aufgeladen. Die Elektronen wandern von K nach A_1 , der Techniker sagt: Der Strom fließt von A_1 über K nach der Mittelanzapfung der Heizwicklung (m) und zum positiven Pol der Gleichstromseite. Schwingt der Wechselstrom nach rechts, so fließt der Strom über

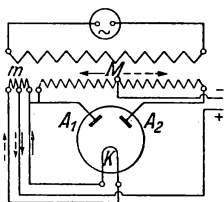


Bild 274. Schaltung eines Glühkathoden-Gleichrichters

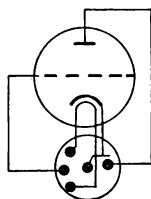


Bild 275. Dreipolröhre

A_2 K m zum gleichen Pol der Gleichstromseite. Hierbei werden beide Halbwellen des Wechselstroms ausgenutzt; es entsteht ein pulsierender Gleichstrom.

In der *Dreipolröhre* kommt als dritte Elektrode zwischen Anode und Kathode das Gitter hinzu. Liegt am Gitter eine Wechsellspannung (Bild 275), an Anode und Kathode eine Gleichspannung, so wird der Anodenstrom jedesmal gebremst, wenn das Gitter negativ, gefördert, wenn es positiv geladen ist. Mit Hilfe des Gitters läßt sich der Anodenstrom im gleichen Rhythmus steuern, den die Schwingung am Gitter hat. Bild 276 zeigt den Aufbau

einer Dreipolröhre. In der Funktechnik sind Röhren bis zu acht Elektroden entwickelt worden.

Die Arbeitsweise einer Elektronenröhre wird dargestellt durch die **Kennlinie**, ein Diagramm, das den Zusammenhang zwischen Gitterspannung und Anodenstromstärke für verschiedene Anodenspannungen gibt. **Charakteristik einer Rundfunkröhre (Bild 277).**

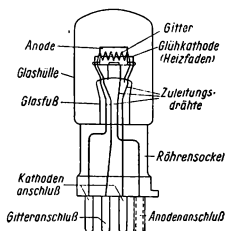


Bild 276. Aufbau einer Glühkathodenröhre mit Gitter

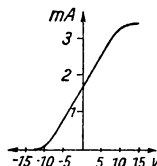


Bild 277. Charakteristik einer Rundfunkröhre

B. Das elektrostatische Feld

1. Elektrische Ladungen

a) Anziehung und Abstoßung

Ein mit Wolle geriebener Hartgummistab und ein mit Seide geriebener Glasstab zeigen die gleiche Eigenschaft wie Bernstein. Wir stellen uns vor, daß diese Körper nach dem Reiben eine elektrische Ladung tragen, die auf andere Körper übertragen werden kann. Zum Nachweis dient das elektrische Pendel, eine an einem Seidenfaden aufgehängte, versilberte Holundermarkkugel. Beim Berühren geht ein Teil der Ladung auf die Probekugel über, diese wird abgestoßen. Hängt man den geriebenen Hartgummistab frei auf und nähert man einen zweiten geladenen Hartgummistab, so wird der erste abgestoßen, nähert man aber einen geladenen Glasstab, so wird er angezogen. Man hat daraus geschlossen, daß es zwei Arten von Elektrizität gibt und hat willkürlich festgesetzt:

Die *Glaselektrizität* heißt *positiv*, die *Hartgummielektrizität* *negativ*.

Gleichnamige elektrische Körper stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an

Diese Festsetzungen haben sich später als nicht ganz zutreffend erwiesen. Wir wissen heute, daß auch die Elektrizität atomare Struktur hat und daß es nur eine Art freier Elektrizitätsatome gibt, die negativen Elektronen. Die positive Ladung ist danach ein Mangel an Elektronen, die negative ein Überschuß.

Ein nach außen unelektrischer Körper enthält nach dieser alten Vorstellung gleiche Mengen positiver und negativer Ladungen, die sich gegenseitig neutralisieren. Durch Reiben oder zuweilen auch schon durch Berühren werden die Ladungen getrennt. Der Glasstab wird positiv, der Seidenlappen negativ elektrisch.

Reibungselektrizität entsteht durch die Trennung der Ladungen ungleichen Vorzeichens.

b) Elektroskope

Zum Nachweis elektrischer Ladungen dienen Elektroskope.

Im Elektroskop hängen 2 leichtbewegliche Aluminium- oder Stanniolblättchen an einem Metallstab, der durch einen Bernsteinpfropfen in ein Glasgefäß geführt ist. Bringt man Ladung auf den Knopf, so spreizen sich die Blättchen, weil beide gleichnamig geladen werden und sich abstoßen. Elektrometer sind in Volt geeichte Elektroskope (Bilder 278 u. 279).

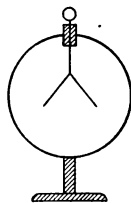


Bild 278
Elektroskop

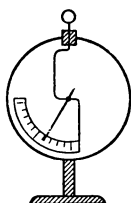


Bild 279
Elektrometer

Zum Anhäufen größerer Ladungsmengen dienen isoliert aufgestellte Metallkörper (Konduktoren).

2. Das Coulombsche Gesetz

Zwischen einer isoliert aufgestellten geladenen Metallkugel und einem an einem langen Faden hängenden gleichnamig geladenen Pendel findet eine Abstoßung statt (Bild 280). Die abstoßende Kraft zwischen den beiden Ladungen ist gleich der Horizontal Komponente der Kraft, mit der das Pendel infolge seines Gewichtes zur Nullage zurück-

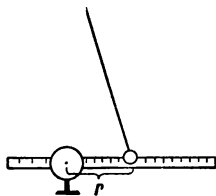


Bild 280
Elektrisches Pendel

getrieben wird. Diese Kraft ist direkt proportional den beiden Ladungen und indirekt proportional dem Quadrat der Entfernung.

$$\text{Coulombsches Gesetz (1785): } P = f \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [\text{dyn}]$$

Mißt man P in dyn, Q in Coulomb und r in cm, so hat der Proportionalitätsfaktor f den Wert

$$f = 9 \cdot 10^{18} \frac{\text{dyn} \cdot \text{cm}^2}{\text{C}^2}.$$

Setzt man im Coulombschen Gesetz $f = 1$, so kann man daraus eine andere Definition einer Ladungseinheit gewinnen. Diese elektrostatische Ladungseinheit (LE) ist sehr klein:

1 Coulomb = $3 \cdot 10^9$ elektrostatische Ladungseinheiten.

3. Feldlinien und Spannung

In dem Raum zwischen zwei isoliert aufgestellten Metallplatten, die mit den Polen einer Spannungsquelle verbunden sind, geht in dem Augenblick, in dem die Spannung angelegt wird, eine Veränderung vor. Das läßt sich mit Hilfe von

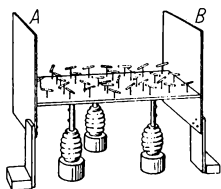


Bild 281. Elektrisches Feld zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Platten

kleinen Papierfähnchen zeigen, die zwischen den Platten, auf Spitzen drehbar, aufgestellt werden (Bild 281). Die Fähnchen richten sich längs bestimmter Linien aus. Der Raum zwischen den Platten bildet ein elektrisches Feld. Dieses Feld entsteht im leeren Raum. Zieht man die Platten weiter auseinander, so wird die Richtwirkung schwächer, aber sie hört nicht auf.

Auch eine isoliert aufgestellte geladene Kugel ist von einem elektrischen Feld umgeben. Wir haben uns die zweite Platte unseres Versuchs ins Unendliche gerückt zu denken.

Das Coulombsche Gesetz gibt die Möglichkeit, in jedem Punkte Größe und Richtung der Kraftwirkung zu bestimmen.

Das elektrische Feld stellt die in jedem Punkt wirkende Kraft nach Richtung und Größe dar

Sichtbarmachen des Feldes im *Modellversuch*: Stanniolblättchen auf einer Glasplatte stellen die Leiter dar, sie werden aufgeladen.

Auf die Glasplatte gestreute feinpulverisierte Gipskristalle ordnen sich in der Richtung der wirkenden Kraft an und zeigen den Verlauf der Kraftlinien. Die Abbildungen zeigen:

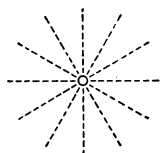


Bild 282. Kraftlinienbild einer isolierten Ladung

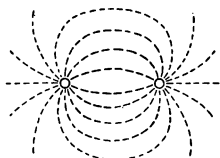


Bild 283. Kraftlinienbild zweier entgegengesetzt gleicher Ladungen

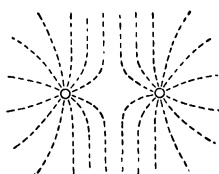


Bild 284. Kraftlinienbild zweier gleicher und gleichnamiger Ladungen

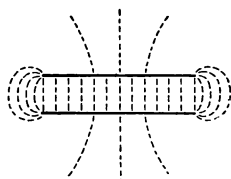


Bild 285. Kraftlinienbild zweier entgegengesetzt gleichgeladener Platten

1. den waagerechten Schnitt durch das Kraftfeld einer **Konduktorkugel** (Bild 282),
2. das Kraftfeld zweier entgegengesetzt gleichgeladener **Kugeln** (Bild 283),
3. das Kraftfeld zweier gleichnamig, gleich stark geladener **Kugeln** (Bild 284),
4. das Kraftfeld zweier entgegengesetzt gleichgeladener **Platten** (Plattenkondensator) (Bild 285).

Die Feldstärke in einem Punkte des Feldes bezeichnet man mit $\mathcal{E}$, sie gibt die auf die Ladung $+1$ Coulomb ausgeübte Kraft an.

$$\mathcal{E} = \frac{P}{Q} = 9 \cdot 10^{18} \frac{Q \cdot 1}{r^2}$$

Eine ebene Fläche F wird von dem Kraftfluß $|\mathcal{E}| F \cos(n, \mathcal{E})$ durchsetzt, wobei n die Normale der Fläche bedeutet. Die Kraftlinien gehen von einer Ladung aus (man setzt willkürlich fest, von der positiven Ladung) und enden an der anderen. Innerhalb der Kraftlinien denken wir uns eine Zugspannung, quer zu den Kraft-

linien einen Querdruck. Die Annahme des Querdrucks ist dadurch bedingt, daß die Kraftlinien nicht infolge ihrer Zugspannung in eine Linie zusammenfließen. Zugspannung und Querdruck sind nicht als mechanische Kräfte aufzufassen.

Durch die Ladung wird der Raum in einen Zustand elektrischer Erregung versetzt, die *Ladung hat potentielle Energie*. Der Potentialunterschied zwischen zwei Punkten äußert sich in der zwischen beiden Punkten herrschenden Spannung. Um eine Ladung gegen diese Spannung zu verschieben, ist Arbeit nötig wie beim Heben eines Gewichtes gegen die Erdanziehung.

Die Feldstärke ändert sich im allgemeinen von Ort zu Ort. Wir betrachten das radiale Feld einer isoliert aufgestellten geladenen Kugel (vgl. Bild 282). Die Feldstärke nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Für ein kleines Stück Δr in radialer Richtung kann man $\mathcal{E}$ als angenähert konstant ansehen und die Arbeit berechnen, die nötig ist, um die Ladungsmenge 1 C um die Strecke Δr zu verschieben.

$$\Delta A = |\mathcal{E}|^1 \cdot \Delta r$$

Diese Arbeit gibt uns ein Maß für die Änderung der potentiellen Energie. Der Potentialunterschied äußert sich in der Spannung ΔU zwischen Anfang und Ende der Strecke Δr .

$$\Delta U = \mathcal{E} \cdot \Delta r \quad \text{und} \quad \mathcal{E} = \frac{\Delta U}{\Delta r}$$

Lassen wir die Werte von ΔU und Δr immer kleiner werden und gehen wir zur Grenze über, so erhalten wir den exakten Wert für die Feldstärke in einem Punkte des elektrischen Feldes.

$$\mathcal{E} = \frac{dU}{dr}$$

Das Feld zwischen den beiden Metallplatten hat an jedem Punkte die gleiche Feldstärke. Für dieses homogene Feld gilt

$$|\mathcal{E}| = \frac{U}{l}.$$

Hierbei bedeutet U die Spannung zwischen den beiden Platten und l ihren Abstand. Die Feldstärke wird in Volt/cm gemessen. Die Arbeit, die nötig ist, um die Ladung Q zwischen zwei Punkten

¹ Die senkrechten Striche bedeuten den absoluten Betrag des Vektors.

mit dem Abstand l und dem Spannungsunterschied U zu bewegen, ist:

$$A = P \cdot l = |\mathcal{E}| \cdot Q \cdot l = \frac{U}{l} \cdot Q \cdot l = UQ$$

$$A = QU$$

Mißt man die Ladung in Coulomb und die Spannung in Volt, so erhält man die Arbeit in Joule.

4. Influenz und Ladungsdichte

Die „Erzeugung“ elektrischer Ladungen beim Reiben des Glasstabes besteht in einer Trennung der entgegengesetzten, nach außen neutralen Ladungen. Die positive Ladung bleibt auf dem Glasstab haften, die negative geht auf das Reibzeug über. In Leitern dagegen sind die Ladungen frei beweglich. Nähert man einem neutralen, isoliert aufgestellten Metallkörper (Konduktor) den positiven Glasstab, so besteht zwischen dem Glasstab und dem Konduktor ein Kraftfeld. Infolge des Zuges der Kraftlinien sammelt sich die frei bewegliche negative Ladung an dem dem Glasstab zugewandten Ende des Konduktors, die abgestoßene positive Ladung am abgewandten Ende: *Influenz*¹ (Bild 286). Die freie positive Ladung kann durch Berühren des Konduktors zur Erde abgeleitet werden. Nach Entfernen des Glasstabes (zuerst Finger weg, dann Stab weg!) verteilt sich die nicht mehr gebundene negative Ladung auf den ganzen Konduktor.

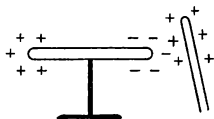


Bild 286. Influenz

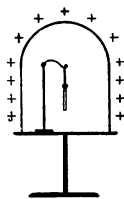


Bild 287. Faradays Käfigversuch

Hat der Konduktor nicht Kugelform, z. B. Eiform, so zeigt sich, daß die Ladung an der Oberfläche ungleich verteilt ist. Das Innere des Konduktors ist frei von Ladung.

Faradays Käfigversuch (Bild 287): Auf einen isoliert aufgestellten Teller wird das Pendel gestellt und mit einer Glocke aus Draht-

¹ influere, lat., hineinfließen.

geflecht überdeckt. Auch wenn die Glocke sehr stark aufgeladen wird, zeigt das Pendel im Innern keine Ladung an.

Sitz der Ladung ist die Oberfläche. An Stellen stärkerer Krümmung sitzt die Ladung dichter. Nachweis durch Übertragen von Ladungsproben mit der Probekugel auf ein Elektrometer (Bild 288).

An einer Spitze erlangt die Ladung sogar eine so hohe Dichte, daß sie die Isolation der Luft durchbricht und in die Luft ausströmt: „elektrischer Wind“; Spitzenwirkung (Bild 289). Die aufgesteckte Spitze ersetzt bei der Aufladung durch Influenz die Berührung mit der Hand. Durch die Spitze strömt die freie Ladung ab, während die andere durch die Nähe des influenzierenden Körpers gebunden ist. Anwendung bei der *Reibungselektrisiermaschine* (Saugkämme).

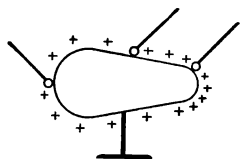


Bild 288. Verteilung der Ladung auf einem Konduktor



Bild 289. Spitzenwirkung, „elektrischer Wind“

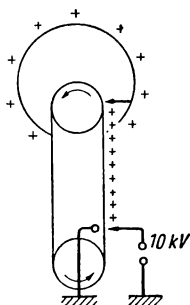


Bild 290. Hochspannungsgenerator nach van de Graaff

Auf der Influenz beruht die *Influenzelektrisiermaschine* (Töpler und Holtz um 1867).

Nach dem gleichen Prinzip arbeitet die *Hochspannungsmaschine* von van de Graaff, die bis 10 Millionen Volt erzeugt (Bild 290).

Ein aus Isoliermaterial bestehender Hohlzylinder von mehreren Metern Höhe trägt eine große Hohlkugel aus Metall. Im Innern des Zylinders läuft, durch zwei Riemenscheiben angetrieben, ein Band aus Isolierstoff, auf das durch Spitzenwirkung Ladung übertragen wird. Das Band gibt die Ladung mit Hilfe einer zweiten Spitze an die Konduktorkugel ab.

5. Ladungseinheit und Elementarquantum

Auf Grund des Coulombschen Gesetzes ist die Einheit der Ladungsmenge unter Anpassung an das in der Mechanik übliche Kraftmaß 1 dyn festgesetzt. Als man später für die Elektrizität einen ähnlichen

Aufbau aus „Elektrizitätsatomen“ annehmen mußte wie für alle anderen Stoffe, hat man durch äußerst exakte Messungen die Ladung dieses Elektrizitätsatoms zu bestimmen versucht (1910, *Ehrenhaft* und *Millikan*). Kleinste, in ruhender Luft schwebende Körperchen (Öltröpfchen) sinken infolge ihrer Schwere langsam zur Erde, auch wenn sie elektrisch aufgeladen sind. Bringt man sie zwischen zwei entgegengesetzt gleich stark geladene Platten, so daß das Feld der Schwere entgegenwirkt, so bleiben die Teilchen in der Schwebe. Teilchendurchmesser und Spannung sind meßbar. Aus der Gleichung, abstoßende Kraft ist gleich dem Gewicht, läßt sich der Betrag der Ladung berechnen. Diese Messungen nach der Schwebemethode haben ergeben:

Die elektrische Ladung kommt nur in ganzzahligen Vielfachen einer Elementarladung vor.

Elementarquantum $e = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ dyn cm/V}$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$
--

Der Träger der negativen Elementarladung ist das Elektron. Positive Ladung ist meist an stoffliche Atome gebunden und kann als Mangel an Elektronen aufgefaßt werden.

6. Kapazität

a) Grundbegriffe und Maßeinheit

Die Spannung einer Konduktorkugel wächst mit der zugeführten Ladungsmenge.

Vergleich mit dem Fußball: Je mehr Luft eingepumpt wird, um so größer ist die Spannung der Hülle, je größer der Ball, um so mehr Luft ist nötig, um die gleiche Spannung zu erzielen.

Unter der *Kapazität* eines Leiters versteht man die Ladungsmenge, die zur Erhöhung der Spannung um 1 V notwendig ist.

Die Kapazität 1 Coulomb/1 Volt heißt 1 Farad (nach <i>Faraday</i>) $C = Q/U$
--

1 Farad (F) ist eine sehr große Einheit. Diese Kapazität hat eine Kugel von $9 \cdot 10^{11} \text{ cm}$ Radius.

$$1 \text{ Mikrofadar (1 } \mu\text{F)} = 1 \text{ Milliontel Farad}$$

$$1 \text{ Picofadar (1 pF)} = 10^{-12} \text{ Farad}$$

b) Kondensatoren

Zwei Platten, zwischen denen ein elektrisches Feld besteht, bilden einen Kondensator; sie dienen der Aufspeicherung von Ladungsmengen, die gegenseitig gebunden sind. Lädt man die eine Platte auf und erdet man die andere, so wird in der geerdeten Platte die entsprechende Menge entgegengesetzter Ladung gebunden (Bild 291).

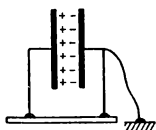


Bild 291. Plattenkondensator

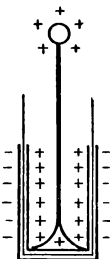


Bild 292. Leidener Flasche



Bild 293. Blätterkondensator

Eine früher übliche Form des Kondensators ist die *Leidener Flasche*. Der äußere Belag ist geerdet, der innere steht in leitender Verbindung mit dem Konduktor (Bild 292).

Größere Kapazität hat der *Blätterkondensator* (Bild 293), eine veränderliche der *Drehkondensator*. Die Kapazität des Drehkondensators wächst, wenn die beiden Scheibensysteme weiter ineinander gedreht werden.

Technische Papierkondensatoren bestehen aus paraffiniertem Papier und zwei Stanniolstreifen, die zusammengewickelt einen Kondensator bilden. Das Ganze ist von Isoliermaterial umgeben.

Der Plattenkondensator. Messungen an Kondensatoren mit verschiedenen Plattengrößen F und verschiedenem Plattenabstand l ergeben, daß die Kapazität bei gleichbleibender Ladungsmenge mit der Größe der Platten wächst und mit wachsendem Abstand abnimmt.

$$C = \varepsilon_0 \frac{F}{l}$$

ε_0 bedeutet einen Proportionalitätsfaktor, der von der Wahl der Maßeinheiten abhängt. Mißt man F in cm^2 und l in cm , so ist

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Coulomb/cm}^2}{\text{Volt/cm}}.$$

ϵ_0 heißt die absolute Dielektrizitätskonstante, sie gilt in dieser Form für das praktische Maßsystem.

Begründung der Dimension: $C = \frac{Q}{U}$; $C = \epsilon_0 \frac{F}{l}$

$$\epsilon_0 = \frac{Q}{U} \cdot \frac{l}{F} = \frac{Q}{F} \cdot \frac{l}{U}$$

Für Ladung, Spannung, Länge und Fläche liegen die Maßeinheiten fest. Diese Größen sind auch der Messung unmittelbar zugänglich. Daraus ergibt sich Zahlwert und Dimension von ϵ_0

$$[\epsilon_0] = \left[\frac{\text{Coulomb}}{\text{V} \cdot \text{cm}} \right].$$

Parallelschaltung erhöht die Kapazität der Kondensatoren, weil durch Parallelschaltung die Fläche zunimmt (Bild 294).

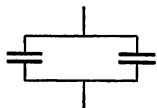


Bild 294. Parallelschaltung von Kondensatoren

$$C = C_1 + C_2$$

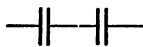


Bild 295. Hintereinanderschaltung von Kondensatoren

Hintereinanderschaltung vermindert die Gesamtkapazität, weil jetzt der Abstand d der Platten zunimmt (Bild 295).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Begründung:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}, \text{ also } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

7. Flächendichte und Erregung

Die Flächendichte σ der Ladung auf einem Leiter ist

$$\sigma = \frac{Q}{F} \left[\frac{\text{Coulomb}}{\text{cm}^2} \right]$$

Die Oberfläche der Kugel beträgt $4\pi r^2$. Daraus ergibt sich für die Flächendichte an der Kugeloberfläche

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Von der geladenen Oberfläche geht ein elektrisches Feld aus. Man kann deshalb auch die Flächendichte σ als Ursache des Feldes betrachten. Man nennt die in diesem Fall das Feld bestimmende Größe die *Erregung* oder *dielektrische Verschiebung*¹ $\mathfrak{D}$. Auch sie ist wie die Feldstärke $\mathfrak{E}$ ein Vektor.

$$|\mathfrak{D}| = \sigma = \frac{Q}{F}; \quad |\mathfrak{E}| = \frac{U}{l}$$

Im letzten Abschnitt haben wir gefunden:

$$\varepsilon_0 = \frac{Q}{F} \cdot \frac{l}{U},$$

also ist $\frac{Q}{F} = |\mathfrak{D}| = \varepsilon_0 |\mathfrak{E}|$.

$$\boxed{\mathfrak{D} = \varepsilon_0 \mathfrak{E}}$$

$\mathfrak{D}$ wird wie $\frac{Q}{F}$ in $\frac{\text{Coulomb}}{\text{cm}^2}$ gemessen.

Aus der Beziehung $\mathfrak{D} = \varepsilon_0 \mathfrak{E} = \sigma$ ergibt sich:

Die Feldstärke an der Oberfläche eines Leiters ist

$$|\mathfrak{E}| = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},$$

die Feldstärke an der Oberfläche einer Kugel

$$|\mathfrak{E}| = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Nach unseren früheren Definitionen ist die Feldstärke die Kraft auf die Ladungseinheit.

$$|\mathfrak{E}| = \frac{P}{Q}$$

Wir betrachten nun den Einfluß der punktförmigen Ladung Q_1 auf eine zweite Q_2 im Abstand r .

Die im Abstand r wirksame Feldstärke, die von der Ladung Q_1 herrührt, ist

$$|\mathfrak{E}| = \frac{Q_1}{4\pi r^2 \varepsilon_0}$$

¹ sprich di - elektrisch, Vorsilbe dia = hindurch.

Dann ist die Kraft auf die Ladungsmenge Q_2 an dieser Stelle

$$P = |\mathcal{E}| Q_2 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \varepsilon_0 r^2}.$$

Das ist aber das Coulombsche Gesetz mit dem Faktor $f = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0}$.

Im elektrostatischen System ist

$$f = 1, \quad \text{also} \quad 4\pi \varepsilon_0 = 1, \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi}$$

Beim Vergleich mit der früheren Form

$$P = 9 \cdot 10^{18} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

ist zu beachten, daß ε_0 im praktischen Maßsystem die Dimension $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt} \cdot \text{cm}}$ hat.

8. Abhängigkeit der Kapazität vom Dielektrikum

Hängt man zwischen den Platten eines Plattenkondensators eine dicke Glasplatte auf, so sinkt die Spannung, man muß mehr Ladung aufbringen, um die ursprüngliche Spannung wieder zu erreichen. In der Glasplatte ist durch Influenz eine Umordnung der Ladungen eingetreten, eine dielektrische Verschiebung, und damit eine Verkürzung der Kraftlinien. Die Glasplatte wirkt, als ob die Kondensatorplatten weiter zusammengeschoben worden wären, ein kleinerer Abstand gibt aber eine größere Kapazität (Bild 296).

Die *relative Dielektrizitätskonstante* gibt an, wievielfach so groß wie im Vakuum die Kapazität durch den eingeschobenen Isolierstoff geworden ist.

Relative Dielektrizitätskonstanten ε^*

Stoff	ε^*	Stoff	ε^*
Glas	5 ... 7	Paraffinöl	2,3
Porzellan	6	Wasser	81
Hartgummi	2,7	Luft (0°, 760 Torr)	1,0006
Bernstein	2,8		

Die Formel für die *Kapazität eines Plattenkondensators* im stoff-
erfüllten Raum lautet:

$$C = \varepsilon \frac{F}{l}; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon^*$$

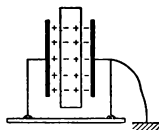


Bild 296. Einfluß
des Dielektrikums

Das Verhalten der Nichtleiter im elektrischen Feld führt zu folgenden Vorstellungen: Im Leiter sind die Elektronen frei beweglich, sie können dem Zug der Kraftlinien folgen (Influenz). In Nichtleitern sind die Elektronen an die Atome fest gebunden. Unter dem Einfluß des Feldes tritt eine Ordnung der vorher ungeordneten Lage ein. An den Atomen treten elektrische Ladungen auf, die sich im Innern gegenseitig aufheben, aber an den Außenseiten nicht kompensierte feststehende Ladungen ergeben.

Das Coulombsche Gesetz für den stofffreien Raum erhielt im praktischen Maßsystem die Form

$$P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Im stoffgefüllten Raum ist für ε_0 der Wert $\varepsilon_0 \varepsilon^* = \varepsilon$ zu setzen. Es ist also

$$P = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

C. Das unveränderliche magnetische Feld

1. Grundeigenschaften der Magnete

a) Dauermagnete

Natürlicher Magneteisenstein (Fe_3O_4) hat die Eigenschaft, Eisenspäne anzuziehen.

Künstliche Magnete werden in Stabform oder in Hufeisenform aus Stahl hergestellt. An den Enden des Stabmagneten liegen die Stellen stärkster Anziehungskraft, die *Pole*, in der Mitte befindet sich eine *neutrale Zone*, in der keine Anziehung stattfindet. Zerbricht man eine magnetische Stricknadel, so zeigen sich an den Bruchstellen, die vorher neutral waren, je zwei entgegengesetzte Pole.

Eine frei aufgehängte Magnetnadel zeigt ungefähr in die Nordrichtung. Man bezeichnet den nach Norden weisenden Pol als *Nordpol*, den anderen als *Südpol*.

Entgegengesetzte Pole ziehen sich an, gleichnamige Pole stoßen sich ab

Für die Magnetpole gilt das *Coulombsche Gesetz*:

$$P = f \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Werden die Polstärken m_1 und m_2 so festgesetzt, daß die Pole sich im Abstand 1 cm mit der Kraft 1 dyn abstoßen, so ist $f = 1$.

Nord- und Südpol des gleichen Magneten haben die gleiche Polstärke, weil sie zusammengefügt sich neutralisieren (Stricknadelversuch).

Ergebnis des Stricknadelversuchs: Man kann sich den Stabmagneten aus einer großen Zahl kleiner *Elementarmagnete* aufgebaut denken. Magnetwirkung tritt nur an den Enden ein, weil die entgegengesetzten Kräfte der Elementarmagnete sich im Innern aufheben.

Einen Stahlstab kann man durch Überstreichen mit einem Pol eines Dauermagneten selbst magnetisch machen. Bei dem Überstreichen werden die Elementarmagnete gerichtet und behalten danach ihre Richtung bei.

b) Magnetische Influenz

Nähert man einem Pol eines Magneten einen Stab aus weichem Eisen, so wird auch dieser Eisenstab magnetisch und zieht Eisenfeilspäne an (Bild 297). Im weichen Eisen sind offenbar Elementarmagnete vorhanden, die durch die Einwirkung des Pols gleichgerichtet werden. Entfernt man den Pol des Magneten, so fallen die Eisenfeilspäne wieder ab, und der mitgeteilte Magnetismus (magnetische Influenz) verschwindet. Wir stellen uns vor, daß die Elementarmagnete sofort wieder in ungeordnete Lage zurückfallen und dadurch nach außen neutral werden.

2. Messung der Polstärke

Die Polstärke läßt sich grob mit der Waage bestimmen (Bild 298). Man bringt einen Magneten auf die Waagschale und stellt Gleichgewicht her. Ein zweiter gleicher Magnet in bekanntem Abstand bringt die Waage aus dem Gleich-

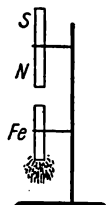


Bild 297
Magnetische
Influenz

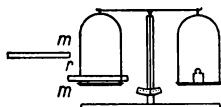


Bild 298
Bestimmung der Polstärke

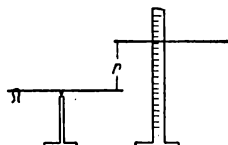


Bild 299
Magnetische Polwaage

gewicht, das durch Auflegen neuer Gewichte wiederhergestellt wird. Dann ist $P = \frac{m^2}{r^2}$; $m = r\sqrt{P}$.

Zu feineren Messungen dient die Polwaage (Bild 299), ein magnetisierter Waagebalken mit verschiebbarem Reitergewicht.

Mit Hilfe eines geeichten Magneten lassen sich dann beliebige andere Magnete eichen.

3. Magnetische Feldlinien

a) Verlauf der Feldlinien

Auch von den Polen des Magneten gehen Kraftwirkungen in den Raum. Der Magnet erzeugt in seiner Umgebung ein magnetisches Feld. Die Lage und Richtung der Feldlinien läßt sich mit einem kleinen Taschenkompaß feststellen (Bild 300).

Einfacher lassen sich Feldlinienbilder gewinnen, indem man über den Magneten ein Kartonblatt legt und mit Eisenfeilspänen gleichmäßig bestreut. Durch leichtes Klopfen werden die Eisenfeilspäne vorübergehend zu (temporären) Magneten und ordnen sich in der Richtung der Kraftlinien. Die magnetischen Feldlinienbilder stimmen mit den elektrischen überein, nur ein Unterschied besteht:

Die elektrischen Kraftlinien beginnen an der positiven Ladung und enden an der negativen, sie sind nicht geschlossen. Die magnetischen Feldlinien sind geschlossen, sie gehen vom Nordpol durch

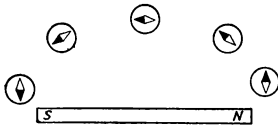


Bild 300. Taschenkompaß zeigt den Verlauf der magnetischen Feldlinien

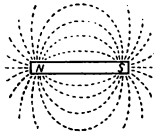


Bild 301. Feldlinien eines Stabmagneten

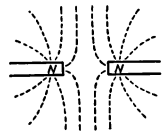


Bild 302. Das magnetische Feld zwischen zwei gleichnamigen Polen

den Raum zum Südpol und im Magneten selbst zurück zum Nordpol (Bild 301).

Zwischen gleichnamigen Polen zeigt sich der „Querdruck“ der Feldlinien (Bild 302).

Zwischen den ungleichnamigen Polen zweier gleicher Stabmagneten bildet sich ein *homogenes Feld* (analog dem Feld des Plattenkondensators), nur die Feldlinien am Rand sind nicht parallel (Bild 303).

Bringt man in dieses homogene Feld ein Stück weiches Eisen, so wird das Feld *inhomogen*. Die Feldlinien sammeln sich im Eisen. Wir stellen uns vor: Eisen hat eine größere Durchlässigkeit für Feldlinien als Luft (Permeabilität) (Bild 304).

$$\text{Die Verstärkerzahl } \mu = \frac{\text{Kraftlinienzahl durch den Stoff}}{\text{Kraftlinienzahl durch Luft}}$$

Die Verstärkerzahl μ gibt also an, wie groß der Einfluß des Stoffes gegenüber Luft ist.

Für *Luft* ist deshalb die Permeabilität $\mu = 1$.

Auf der hohen Permeabilität des weichen Eisens beruht die *magnetische Schirmwirkung* (Bild 305). Ein Weicheisenring in einem homogenen Magnetfeld zieht die Feldlinien auf sich und macht das Innere des Ringes frei von magnetischen Einwirkungen.

Bringt man ein frei aufgehängtes Wismutstäbchen in ein starkes homogenes Magnetfeld, so stellt sich das Stäbchen senkrecht zu den Feldlinien. Wismut stößt die Feldlinien von sich ab, durch

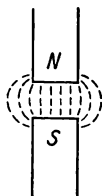


Bild 303. Das magnetische Feld zwischen ungleichnamigen Polen

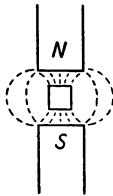


Bild 304. Eisen im homogenen Magnetfeld

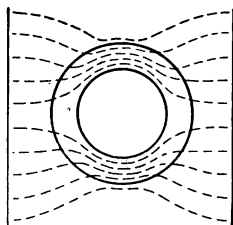


Bild 305. Schirmwirkung eines Eisenringes im homogenen Magnetfeld

Wismut gehen weniger Feldlinien als durch den entsprechenden Luftraum: $\mu < 1$.

Nach dem Verhalten im magnetischen Feld ergeben sich 3 Gruppen von Stoffen:

1. *ferromagnetische Stoffe*: μ viel größer als 1
Eisen (bis 50000); Kobalt, Nickel (bis 300)
2. *paramagnetische Stoffe*: μ wenig größer als 1
Platin, Uran, Hartgummi
3. *diamagnetische Stoffe*: $\mu < 1$
Wismut, Steinsalz, Kupfer, Glas, Wasser

b) Messung der Feldstärke

Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ (Vektorgröße!) ist die in dyn gemessene Kraft, mit der der Einheitspol (1 PE) an der betreffenden Stelle abgestoßen oder angezogen wird.

Die Feldstärke wird in Oersted (Oe) gemessen, benannt nach dem dänischen Physiker *Oersted* (1777 bis 1851).

Im stoffgefüllten Raum wirkt die Feldstärke richtend auf die Elementarmagnete: *magnetische Induktion*.

Die magnetische Induktion gibt die Dichte der Induktionslinien, sie wird gemessen in Gauß (G), benannt nach dem Mathematiker *Gauß* (1777 bis 1855).

In Luft und im Vakuum stimmen wegen $\mu = 1$ die Maßzahlen der Feldstärke und der magnetischen Induktion überein.

Magnetische Feldstärke = Kraft je Poleinheit; $\mathfrak{H} = P/m$
 Einheit der Feldstärke: 1 Oersted (Oe) = 1 dyn je Poleinheit
 Magnetische Induktion: $\mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H} [G]$

Mit zunehmender Feldstärke wächst auch die magnetische Induktion, und zwar stärker als die Feldstärke, bis zu einem Sättigungspunkt. Weitere Steigerung der Feldstärke ist dann ohne Einfluß.

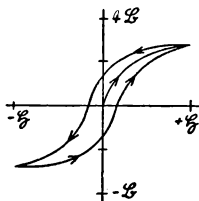


Bild 303. Hysteresisschleife

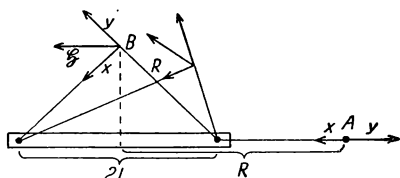


Bild 307. Bestimmung der Feldstärke in den beiden Hauptlagen

Abnahme der Feldstärke auf Null hebt die Induktionswirkung nicht sofort völlig auf (*remanenter Magnetismus*). Die Magnetisierungskurve besteht aus 2 Ästen (*Hysteresisschleife*) (Bild 306).

Die Pfeile an den Kurvenzweigen geben den Weg der Magnetisierung an. Diese geht von 0 bis zu einem Höchstwert. Bei Verminderung der Feldstärke geht die Magnetisierung infolge des remanenten Magnetismus langsamer zurück.

Für 2 Hauptlagen läßt sich die Feldstärke leicht berechnen (Bild 307):

1. Hauptlage in Richtung der Achse.

$$x = \frac{m \cdot l}{(R + l)^2}; \quad y = \frac{m \cdot l}{(R - l)^2}; \quad \mathfrak{H}_A = y - x = \frac{4 R l m}{(R^2 - l^2)^2}$$

$2lm$ heißt das *magnetische Moment* $\mathfrak{M}$.

Für große R und kleine l ist $\mathfrak{H}_A \approx 2 \frac{\mathfrak{M}}{R^3}$.

2. Hauptlage im Äquator des Magneten.

$x = y$. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke folgt:

$$\mathfrak{H}_B : 2l = y : R. \text{ Da } y = \frac{m \cdot 1}{R^2} \text{ ist, ergibt sich}$$

$$\mathfrak{H}_B = \frac{2lm \cdot 1}{R^3} = \frac{\mathfrak{M}}{R^3}.$$

Die Feldstärke in der Achse ist doppelt so groß wie im Äquator.

4. Das magnetische Feld der Erde

Eine horizontal schwingende Magnetnadel weicht von der geographischen Nord-Süd-Linie etwas ab, die Abweichung ist örtlich verschieden und ändert sich mit der Zeit. Diese Abweichung heißt *Deklination* (Mißweisung). In Deutschland liegt die Deklination z. Z. zwischen $5,6^\circ$ West im Westen und $1,6^\circ$ West im Osten. Die Deklination verschiebt sich jährlich um $0,12^\circ$ nach Osten. Die Deklination muß man kennen, um die Anzeige der Kompaßnadel auf geographisch Nord korrigieren zu können.

Linien gleicher Deklination heißen *Isogonen*, ihre Kenntnis ist wichtig für die Benutzung des Magnetkompasses in Luft- und Seefahrzeugen.

Hängt man eine Magnetnadel, um eine waagerechte Achse drehbar, so auf, daß sie im magnetischen Meridian schwingen kann, so zeigt sie eine von Ort zu Ort verschiedene Neigung gegen die Horizontale. Diese Abweichung heißt *Inklination*. Linien gleicher Inklination heißen *Isoklinen*. Die Erde ist eine magnetische Kugel mit 2 Polen. Der magnetische *Südpol* liegt in der Nähe des geographischen Nordpols bei der Melville-Insel unter $70,5^\circ$ n. Br. und $97,5^\circ$ westl. L. (Roß 1831); der magnetische *Nordpol* liegt unter $73,5^\circ$ sdl. Br. und 146° östl. Länge (Shackleton 1909).

Die erdmagnetische Horizontalintensität beträgt in Deutschland etwa $H = \frac{1}{3}$ dyn/PE, die Vertikalintensität $V = \frac{2}{3}$ dyn/PE.

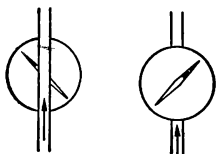
5. Magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes

a) Grundversuche

Oersted (1820). Ein stromdurchflossener Leiter lenkt die Magnetnadel ab und sucht sie senkrecht zur Stromrichtung zu stellen (Bilder 308 und 309). Die Ablenkungsrichtung ergibt sich aus der *Ampèreschen Schwimmregel*:

Denkt man sich im Strom schwimmend, das Gesicht der Nadel zugekehrt, so zeigt der linke Arm die Ablenkungsrichtung des Nordpols.

Eine kreisförmige Leiterschleife verstärkt die ablenkende Kraft, eine Spule vervielfacht die Wirkung (Multiplikator bei Galvanometern). Ein astatisches Nadelpaar besteht aus 2 parallelen Magneten, die durch einen Steg in der neutralen Zone fest verbunden sind. Dem Nordpol der einen Nadel steht der Südpol der anderen gegenüber. Durch Verwendung eines astatischen Nadelpaares wird das Instrument vom magnetischen Erdfeld unabhängig.



Bilder 303 und 303
Grundversuch von Oersted

Ein in einem Leiter fließender Strom baut in der Ebene senkrecht zum Leiter ein Magnetfeld auf

Die Richtung der magnetischen Feldlinien läßt sich mit einem kleinen Kompaß feststellen, die Kraftlinienbilder mit Eisenfeilspänen (vgl. S. 193).

Die Richtung des Feldes ergibt die *Faustregel*:

Umfaßt man den Leiter so mit der rechten Faust, daß der gestreckte Daumen die Stromrichtung angibt, so geben die gekrümmten anderen Finger die Richtung der Kraftlinien (Bild 310).

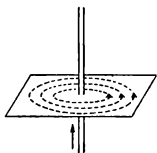


Bild 310

Magnetfeld eines geradlinigen Stromes

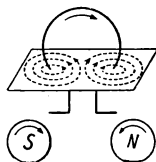


Bild 311

Magnetfeld einer Leiterschleife

Eine kreisförmige Leiterschleife wirkt bei Stromdurchgang wie ein Magnet (*magnetisches Blatt*) (Bild 311). Die Seite, von der aus gesehen der Strom im Uhrzeigersinne läuft, ist südpolar, die Seite, von der aus der Strom gegen den Uhrzeigersinn läuft, nordpolar. Eine stromdurchflossene Spule vervielfacht die Wirkung; frei aufgehängt, stellt sie sich wie ein Magnet in die Richtung des erdmagnetischen Meridians (Ampèresches Gestell).

Die stromdurchflossene Spule zieht einen federnd aufgehängten Weicheisenstab in die Spule hinein, die anziehende Kraft wächst mit der Stromstärke. *Weicheisengalvanometer* (Bild 312).

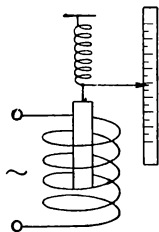


Bild 312

Schema eines Weicheisengalvanometers

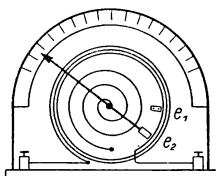


Bild 313

Schema eines Taschengalvanometers

Zwei Eisenstäbe in einer Spule werden bei Stromschluß gleichzeitig magnetisch und stoßen sich ab.

Anwendung in den *Taschengalvanometern* (Bild 313): Der Eisenstab e_1 ist fest, e_2 drehbar mit einem Zeiger verbunden.

Aus der in B 3 entwickelten Vorstellung vom Querdruck der Kraftlinien, die auch für magnetische Kraftlinien gilt, lassen sich die folgenden Versuche erklären:

1. *Leiter entgegengesetzt paralleler Ströme stoßen sich ab*, weil zwischen den Strömen die magnetischen Kraftlinien sich drängen (Bild 314).

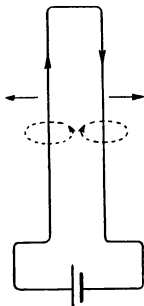


Bild 314. Abstoßung entgegengesetzt durchflossener paralleler Leiter

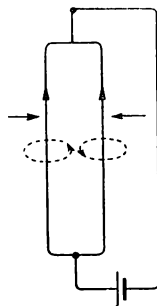


Bild 315. Anziehung paralleler Leiter bei gleichgerichteter Durchströmung

2. *Leiter gleichgerichteter Ströme ziehen sich an*, weil zwischen den Strömen das Feld (Bild 315) durch die entgegenlaufenden Kraftlinien geschwächt wird.

Das gleiche Prinzip gilt auch für die Anziehung und Abstoßung stromdurchflossener Spulen, es findet Anwendung bei den zur Strommessung dienenden Dynamometern.

b) Das Gesetz von Biot und Savart

Schon von *Laplace* ist erkannt worden, daß die magnetische Wirkung des Stromelementes mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Bildet die Verbindungslinie (r) Magnetpol (m)—Stromelement (ds) mit dem Strom die Richtung α (Bild 316), so ist nach dem Gesetz von *Biot* und *Savart*

$$dP = C \frac{m ds I}{r^2} \sin \alpha$$

Dabei steht die Kraft P senkrecht zur Ebene (ds ; r).

Die Konstante C hängt von der Wahl der Einheiten ab.

Wählt man $C = 1$ und mißt man P in dyn, so ergibt sich daraus ein Maß für den Strom I^* . Diese Einheit wird als *elektromagnetische Stromeinheit*¹ bezeichnet.

$$1 \text{ A} = \frac{1}{10} \text{ elektromagnetische Stromeinheit}$$

Die elektromagnetische Stromeinheit steht zur elektrostatischen im Verhältnis einer Geschwindigkeit. Als Faktor tritt die Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s auf.

Elektromagnetisches, elektrostatisches, praktisches Maß

Q	1	$3 \cdot 10^{10}$ LE	10 Coulomb
I	1 (Weber)	$3 \cdot 10^{10}$ LE/s	10 Ampere
U	1	$\frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$ e. st. E.	10^{-8} Volt

Anwendung. *Tangentenbussole* (Bild 317) zur Strommessung. Geht der Strom I^* [elektromagnetische Stromeinheiten] = $\frac{I[\text{A}]}{10}$ durch

¹ Die Bezeichnung 1 Weber für die elektromagnetische Stromeinheit hat sich nicht durchgesetzt. Neuerdings ist die Bezeichnung 1 Weber für die Voltsekunde vorgeschlagen worden.

den kreisförmigen Leiter, so ist die ablenkende Kraft nach dem Gesetz von *Biot* und *Savart* $P = 2\pi r \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{I}{10} = \frac{\pi I}{5r}$. Sie wirkt senkrecht zu dem in der Meridianebene stehenden Stromkreis. In

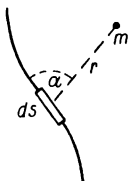
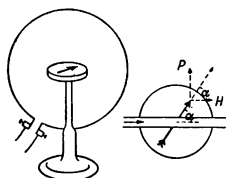
Bild 316. Zum Gesetz von *Biot* und *Savart*

Bild 317. Tangentenbussole

der Meridianrichtung wirkt die Horizontalkomponente H des Erdmagnetismus. Beide Kräfte setzen sich zu einer Resultierenden zusammen, die die Richtung der Magnetnadel bestimmt.

$$\tan \alpha = \frac{P}{H} = \frac{\pi I}{5rH}$$

$$I = \frac{5rH}{\pi} \tan \alpha = R \tan \alpha$$

R heißt der Reduktionsfaktor der Tangentenbussole, er läßt sich experimentell einfach bestimmen, indem man den Strom regelt, bis der Nadelausschlag 45° beträgt, und dann diese Stromstärke in Ampere abliest. Wegen $\tan 45^\circ = 1$ ist jetzt $I = R$.

c) Das praktische Maß der magnetischen Feldstärke

Das homogene Feld im Innern einer langen Spule ist der Anzahl der Drahtwindungen und der Stromstärke proportional, umgekehrt proportional der Länge, aber unabhängig vom Querschnitt der Windungen.

Man kann für praktische Meßzwecke deshalb das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl je cm als Maß wählen. Dieser Ausdruck $\frac{Iw}{l}$ heißt *Amperewindungszahl* $\left(\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}\right)$.

$$\mathfrak{H} = \frac{Iw}{l}$$

Hier wird $\mathfrak{H}$ in $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ gemessen.

Aus dem *Biot-Savartschen* Gesetz läßt sich ableiten:

$$1 \frac{\text{Aw}}{\text{cm}} = 0,4\pi \text{ Oersted} = 1,256 \text{ Oe}$$

d) Elektromagnete

Bringt man in das Innere einer stromdurchflossenen Spule einen Weicheisenkern, so wird das magnetische Feld mehrtausendfach verstärkt. Nach *Ampère* stellt man sich vor, daß im Innern des Weicheisens Molekularströme kreisen, die durch das äußere Feld gerichtet werden. Die Permeabilität μ gibt an, das Wievielfache gegenüber der leeren Spule die Verstärkung beträgt.

Die magnetische Induktion wird im CGS-System in Gauß [G], im praktischen Maßsystem in $\frac{\text{Aw}}{\text{cm}}$ gemessen (vgl. S. 195).

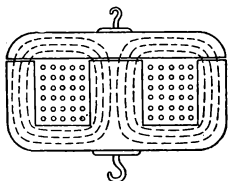


Bild 318. Topfmagnet

$$|\mathfrak{B}| [\text{G}] = 1,256 |\mathfrak{H}| \left[\frac{\text{Aw}}{\text{cm}} \right]; \quad 1 \text{ G} = 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Magnetische Induktion } \mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H}$$

Diese verstärkende Wirkung wird bei den *Elektromagneten* angewendet.

Mit steigender Stromstärke wächst die Tragkraft des Elektromagneten bis zu einer Höchstgrenze, die dadurch erklärbar ist, daß alle Molekularströme gerichtet sind.

Formen von Elektromagneten:

Spule mit Eisenkern und *Anker*, *Hufeisenmagnet*, *Topfmagnet* (Bild 318).

Tragkraft eines Elektromagneten:

Die Kraft zwischen dem Pol von der Stärke m und dem Anker ist

$$P = m |\mathfrak{B}|$$

Vom Pol gehen $4\pi m$ Kraftlinien aus, sie treten am Nordpol aus dem Kern und am Südpol wieder ein. Die Gesamtzahl der Kraftlinien in beiden Luftspalten ist der *magnetische Kraftfluß*

$$\Phi = 2 \cdot 4\pi m = 2F |\mathfrak{B}|$$

wobei F den Querschnitt des Kernes bedeutet.

$$m = \frac{F |\mathfrak{B}|}{4\pi} \quad \text{und} \quad P = m |\mathfrak{B}| = \frac{F |\mathfrak{B}|^2}{4\pi} \quad [\text{dyn}]$$

Im praktischen Maßsystem ergibt sich für die Tragkraft eines Hufeisenmagneten

$$P = \frac{F |\mathfrak{B}|^2}{4\pi \cdot 981\,000} \quad [\text{kp}] \approx \frac{0,08 F |\mathfrak{B}|^2}{1\,000\,000} \quad [\text{kp}]$$

Für den Stabmagnet ist entsprechend

$$P = \frac{0,04 F |\mathfrak{B}|^2}{1\,000\,000}$$

Hierbei wird der Querschnitt F des Kernes in cm^2 , $\mathfrak{B}$ in G und P in kp gemessen.

Weitere Anwendungen

Elektrische Relais bestehen aus einer Spule mit Eisenkern; beim Schließen des Stromkreises wird der Anker angezogen, beim Öffnen durch eine Feder zurückgeführt. Relais dienen zum automatischen Öffnen und Schließen eines zweiten Stromkreises (Bild 319).

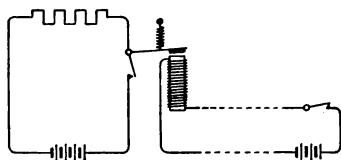


Bild 319. Elektrisches Relais

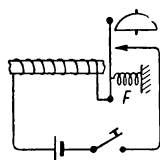


Bild 320. Elektrische Klingel

Der *Wagnersche Hammer* unterbricht und schließt den Stromkreis der elektrischen Klingel (Bild 320) sowie den Primärstromkreis des Funkeninduktors. Beim Schließen der Taste geht der Strom über die Spitze in den Klöppel und durch die Wicklung zurück

zum Gegenpol. Der Weicheisenkern wird dabei zum Magneten und zieht den Klöppel an, der Stromkreis wird dadurch unterbrochen. Die Feder zieht den Klöppel zurück und schließt den Stromkreis von neuem.

Morsetelegrafie. Der Anker drückt den Schreibstift gegen einen durch ein Uhrwerk vorbeibewegten Papierstreifen und zeichnet

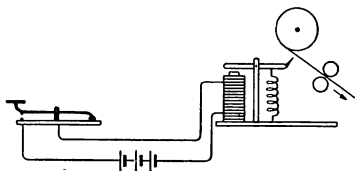


Bild 321. Schema des Morseschreibers

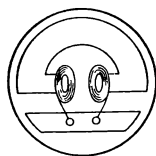


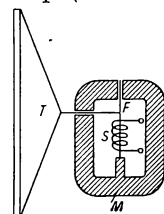
Bild 322. Kopffernhörer

Punkte und Striche je nach Schließungsdauer der Morsetaste (Bild 321).

Im *Kopfhörer* des Telefons sind zwei hintereinandergeschaltete Spulen über die Polschuhe eines Dauermagneten gestülpt (Bild 322).

Das wechselnde Magnetfeld des Sprechwechselstromes in den Spulen überlagert das Feld des Dauermagneten und versetzt die Membran (Anker!) in Schwingungen (vgl. auch S. 208).

Elektromagnetischer Lautsprecher (Bild 323). Die mit dem Sprechwechselstrom wechselnde Magnetisierung einer Feder führt zu Schwingungen zwischen den Polen eines Dauermagneten. Diese Schwingungen werden durch die Lautsprechermembran in die Luft übertragen.

Bild 323
Elektromagnetischer Lautsprecher

6. Motorische Wirkung des elektrischen Stromes

a) Grundversuche

Ein beweglicher, stromdurchflossener Leiter erfährt im Magnetfeld einen Bewegungsantrieb, dessen Richtung senkrecht zu der Ebene steht, die von Magnetfeld und Leiter gebildet wird (Bild 324). Das

Magnetfeld um den Strom überlagert sich mit dem vorhandenen Magnetfeld. Verdichtung der Kraftlinien erhöht den „Querdruck“, die teilweise Aufhebung entspricht einem „Unterdruck“. Daraus ergibt sich die Bewegungsrichtung (Bild 325).

Im Kraftlinienbild steht der Leiter senkrecht zur Zeichenebene, der Strom geht von hinten nach vorn (der Punkt stellt die Vektorspitze dar, vgl. S. 206).

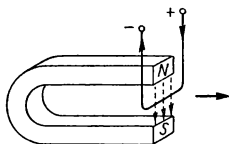


Bild 324. Ablenkung des stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld

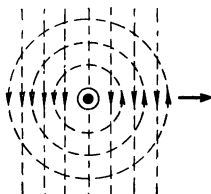


Bild 325. Bestimmung der Ablenkung aus dem Kraftlinienbild

Linke-Hand-Regel. Spreizt man die ersten drei Finger der linken Hand zu einem rechtwinkligen Koordinatensystem und hält man den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien, den Mittelfinger in die Richtung des Stromes, so gibt der Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.

Reihenfolge: **Bewegung, Kraftlinien, Strom.**

Zum gleichen Ergebnis führt die **Rechte-Hand-Regel**. Hält man den Daumen in die Richtung des Stromes (Ursache), den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien (Vermittlung), so weist der Mittelfinger in die Bewegungsrichtung (Wirkung).

Nach dem Gesetz von *Biot* und *Savart* übt der Strom I^* im Leiter l auf den Magnetpol m die Kraft $P = \frac{ml}{r^2} I^* \sin \alpha$ aus. Wenn m fest ist und der Leiter beweglich, übt der feste Pol auf den beweglichen Leiter die gleiche Kraft aus. In unserem Fall ist $\alpha = 90^\circ$, also $P = \frac{m}{r^2} l I^*$. Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ und hier die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ ist $\frac{m \cdot 1}{r^2}$, also $P = \mathfrak{B} I^* l$ [dyn].

b) Anwendung im Elektromotor (vgl. D, 2 a)

Das *Antriebsmoment* eines Mantelstabes (Länge l) im Abstand r von der Drehachse im Feld $\mathfrak{B}$ ist $I \cdot l \mathfrak{B} r$ [dyn · cm]. Bei s Stäben und Messung der Stromstärke in Ampere entsteht daraus die „Silberregel“:

$$\text{Drehmoment } Pr = s I l \mathfrak{B} r \frac{1}{10} \text{ [dyn · cm]}$$

Drehspulinstrument (Bild 326) für Strom- und Spannungsmessungen. Im Feld eines Dauermagneten erfährt eine stromdurchflossene drehbare Spule einen Antrieb, durch den eine Spiralfeder gespannt wird. Die Drehung ist der Stromstärke proportional (lineare Skala).

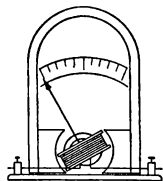


Bild 326. Drehspulinstrument

D. Das veränderliche magnetische Feld**1. Die elektromagnetische Induktion****a) Grundversuche**

Die elektrische Induktion ist die Umkehrung der motorischen Wirkung des Stromes.

Wird ein Leiter durch ein Magnetfeld bewegt, so tritt an den Enden des Leiters eine Spannung auf (Bild 327). Die Umkehrung der Bewegungsrichtung bringt eine Umkehrung der induzierten Span-

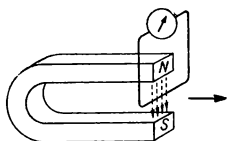


Bild 327

Bewegter Leiter im Magnetfeld

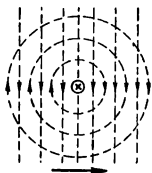


Bild 328

Erklärung der induzierten Spannung

nung mit sich. Der bewegte Leiterstab wirkt so, als ob auf der Vorderseite eine Verdichtung der Kraftlinien, auf der Rückseite eine Verdünnung einträte. Diese Änderung der Kraftliniendichte

kann man entstanden denken aus einer Überlagerung des ursprünglichen magnetischen Feldes durch das magnetische Feld des induzierten Stromes. Im gezeichneten Fall (Bild 328) verläuft das überlagernde Kraftfeld im Uhrzeigersinn, die Stromrichtung geht von vorn nach hinten (gekennzeichnet durch das Kreuz, das die Endfedern des Pfeiles darstellt).

Lenzsche Regel. Der Induktionsstrom entsteht so, daß die Kraftlinien vor dem Leiter verdichtet werden. Der Induktionsstrom hat stets eine solche Richtung, daß er die Bewegung, durch die er zustande kommt, zu hemmen sucht.

Dreifingerregel der rechten Hand. Gibt man den ersten drei Fingern der rechten Hand die Form eines rechtwinkligen Koordinatensystems und hält man den Daumen in die Richtung der Bewegung, den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien, so gibt der Mittelfinger die Richtung des Stromes an.

Statt den Leiter zu bewegen, kann man auch das Magnetfeld durch Ein- und Abschalten eines Elektromagneten entstehen und zusammenbrechen lassen. Dabei ist es gleichgültig, ob der bewegte Leiter die fest stehenden Kraftlinien schneidet oder die bewegten Kraftlinien den fest stehenden Leiter. Für die Induktionswirkung kommt es nur darauf an, daß eine Kraftflußänderung eintritt.

Bei Anwendung der Dreifingerregel ist der Vorgang aber immer vom bewegten Leiter aus zu betrachten.

Jede Änderung des Magnetfeldes führt zu einer Induktionswirkung

Nachweis mit zwei ineinandergestellten Spulen (Bild 329):

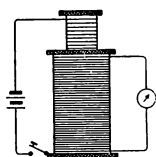


Bild 329
Induktionsversuch

Heben der Primärspule oder Öffnen des Stromkreises führt zu einem Induktionsstromstoß, Senken oder Schließen des Primärstroms zum entgegengesetzten Induktionsstromstoß. Ein Eisenkern verstärkt die Wirkung tausendfach. Bei Entstehung und Zerfall eines Magnetfeldes, das eine Spule von w Windungen umschließt, wird in der Spule eine w -mal so große Spannung induziert wie in einer Windung.

b) Das Induktionsgesetz

Bei der Bewegung des Leiters quer zum Magnetfeld entsteht ein elektrischer Spannungsstoß $U \Delta t$. Je größer der Spannungsstoß ist, um so größer ist auch der durch die Spannung verursachte Stromstoß.

$$I \Delta t = \frac{U}{R} \Delta t, \quad \text{also} \quad U \Delta t = I R \Delta t$$

Der Spannungsstoß ist proportional der Fläche F , über die der Leiter sich senkrecht zu den Feldlinien bewegt, der Feldstärke und der Anzahl der Windungen.

$$U \Delta t = \mu_0 w F \xi$$

Mißt man U in Volt, ξ in Amperewindungen/cm und F in cm^2 , so ergibt sich:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Voltsekunden}}{\text{Aw} \cdot \text{cm}}$$

μ_0 heißt die *Induktionskonstante* oder die *absolute Permeabilität*.

Als Einheit des magnetischen Kraftflusses dient im praktischen Maßsystem die Voltsekunde. Für 1 Vs ist die Bezeichnung 1 Weber vorgeschlagen worden.

$$1 \text{ Vs} = 10^8 \text{ Gauß} \cdot \text{cm}^2$$

Der magnetische Kraftfluß ist $\Phi = \mathfrak{B} F$ oder $\mathfrak{B} s l$ (s Weglänge, l Länge des Leiters).

Ändert sich der magnetische Kraftfluß $\Phi = \mathfrak{B} F$ in der Zeit dt , so entsteht die Spannung

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ V}$$

Das negative Vorzeichen ergibt sich aus der Lenzschen Regel, der Faktor 10^{-8} aus der Umrechnung vom elektromagnetischen ins praktische Maßsystem. Im homogenen Feld hängt die Induktionsspannung von der Kraftliniendichte, der Länge des Leiters und der Geschwindigkeit ab, mit der der Leiter bewegt wird.

$$U = \text{Kraftliniendichte} \times \text{Leiterlänge} \times \text{Geschwindigkeit}$$

$$U = \mathfrak{B} l v 10^{-8} \text{ V.}$$

c) Anwendungen der Induktion

1. *Der Funkeninduktor.* Der Primärstromkreis (wenige Windungen, dicker Draht) wird durch einen Wagnerschen Hammer oder elektrolytischen Unterbrecher in rascher Folge geschlossen und geöffnet. Aufbau und Zerfall der primären Magnetfelder induzieren in der Sekundärspule (viele Windungen, dünner Draht) in raschem Wechsel hohe Spannungen. Da die Kraftflußänderung auch die Primärspule durchsetzt, entstehen auch hier Wechselspannungen, die beim Schließen das Anwachsen des Stromes hemmen, beim Öffnen fortsetzen. Durch Nebenschalten eines Kondensators kann der Öffnungsstromstoß aufgefangen werden; der Kondensator wird bei der nächsten Schließung entladen. Dann gibt der Funkeninduktor einen gerichteten Funkenstrom von der Spitze zur Platte (Bild 330).

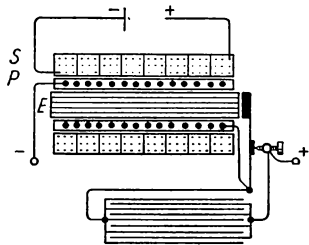


Bild 330. Funkeninduktor

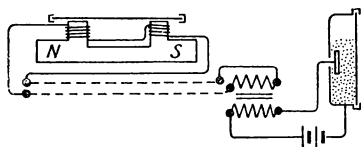


Bild 331. Mikrophon und Telefon

2. *Mikrophon und Telefon* (Bild 331). Im Mikrophonkreis werden die Schallschwingungen in Stromschwankungen des Primärstromes umgewandelt. In der Sprechspule induzieren diese Schwankungen Wechselspannungen, die über die Fernleitung zum Kopfhörer geleitet werden. Das Magnetfeld des Sprechwechselstroms überlagert hier ein permanentes Magnetfeld und schwächt oder verstärkt dieses. Das wechselnde Magnetfeld versetzt die Kopfhörermembran (Anker!) in Schwingungen von gleichem Rhythmus (vgl. S. 203).

3. *Elektrodynamischer Lautsprecher.* Im ringförmigen Spalt der Polschuhe eines Elektromagneten entsteht ein radiales Magnetfeld. In das Feld taucht eine leichte Spule (*S*), die mit der Lautsprechermembran fest verbunden ist. Geht der Sprechwechselstrom durch diese Spule, so überlagern sich die Magnetfelder. Die Spule wird tiefer in den Spalt gezogen oder herausbewegt. Die Membran überträgt die Schwingungen in die Luft (Bild 332).

4. *Wirbelströme*. Rotiert ein Leiter in einem Magnetfeld, so treten in ihm Induktionsströme auf, die nach der Lenzschen Regel die Bewegung zu hemmen suchen. Diese in Maschinenteilen meist unerwünschten Induktionsströme heißen *Wirbelströme*. Wirbelströme können

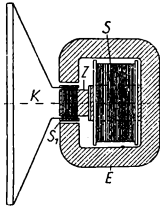


Bild 332. Elektrodynamischer Lautsprecher

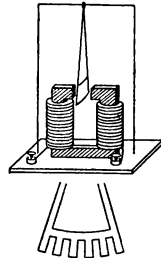


Bild 333. Waltenhofensches Pendel

wegen der mit ihnen verbundenen Wärmewirkung für die Maschine gefährlich werden (Energieverluste, Zerstörung der Isolation durch Wärme).

Versuch mit dem *Waltenhofenschen Pendel* (Bild 333).

Das Pendel mit massivem Kupferstreifen wird durch den Elektromagneten abgebremst, das Pendel mit dem kammartigen Kupferbügel schwingt mit geringerer Dämpfung, weil sich hier wegen der Luftzwischenräume keine Wirbelströme bilden können.

Technische Anwendungen: Wirbelstrombremse, Elektrizitätszähler. Herstellung des Eisenkerns von Wechselstromspulen und Elektromagneten aus Blechlamellen mit Isolierung.

d) Selbstinduktion

Wächst in einer Spule die Stromstärke, so nimmt auch die Zahl der magnetischen Kraftlinien, die die Spule durchsetzen, zu. Dieser Kraftfluß durchsetzt bei seiner Entstehung die Windungen der Spule und induziert hier eine Spannung, die nach der Lenzschen Regel der ursprünglichen Stromrichtung entgegenwirkt. Der Vorgang heißt *Selbstinduktion*.

Beim Schließen eines Stromkreises, der eine Spule mit vielen Windungen enthält, entsteht durch den Aufbau des Magnetfeldes diese Gegenspannung, die das Anwachsen der Stromstärke hemmt. Beim

Öffnen des Stromkreises induziert das zusammenbrechende Magnetfeld eine Induktionsspannung, die dem ursprünglichen Strom gleichgerichtet ist und diesen gewissermaßen fortzusetzen sucht (elektromagnetische Trägheit). Diese Selbstinduktionswirkungen treten besonders in Spulen mit Eisenkernen auf. Die Selbstinduktion läßt sich durch bifilare Wicklung von Spulen und Vermeidung der Eisenkerne unterbinden. Die Wicklung ist so geführt, daß die Nachbarwindungen sich in ihrer Induktionswirkung aufheben.

$$\text{Induzierte Spannung } U = -L \frac{dI}{dt}$$

L heißt die *Induktivität*. Das Minuszeichen besagt, daß die induzierte Spannung der ursprünglichen entgegengerichtet ist.

Einheit der Induktivität ist das *Henry* [H].

1 Henry ist die Selbstinduktion, die in einem Leiterkreis bei einer Änderung der Stromstärke um 1 A in der Sekunde die Induktionsspannung 1 V hervorruft.

Die Dimension der Induktivität ist eine Länge [cm].

$$1 \text{ Henry} = 10^9 \text{ cm}; \quad 1 \text{ mH} = \frac{1}{1000} \text{ H}$$

Begründung. Im elektromagnetischen Maßsystem ist die Stromeinheit 10 A, die Spannungseinheit 10^{-8} V.

Aus $U \Delta t = \mu_0 F \oint w$ [Vs] und $\oint = \frac{\Delta I w}{l}$ folgt:

$$U \Delta t = \mu_0 \frac{F \Delta I w^2}{l} = L \Delta I, \quad \text{wenn man } L = \frac{\mu_0 F w^2}{l}$$

setzt. μ_0 ist im elektromagnetischen Maßsystem eine reine Zahl, F wird in cm^2 gemessen, w ist eine reine Zahl, l wird in cm gemessen, also ist die Maßeinheit von $L \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} = \text{cm}$.

2. Generatoren und Motoren

a) Grundversuche

Dreht sich eine Leiterschleife im Magnetfeld, so wird nach Bild 334 in den senkrecht zu den Kraftlinien bewegten Teilen der Leiterschleife eine Spannung induziert. Diese wächst von Null bei senk-

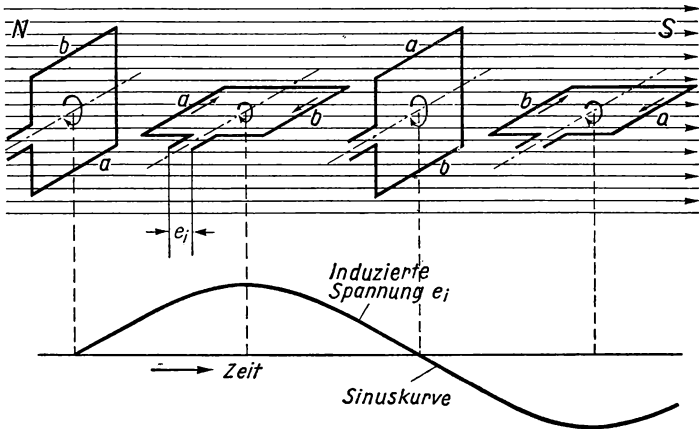


Bild 334. Leiterschleife zur Erzeugung eines Wechselstromes

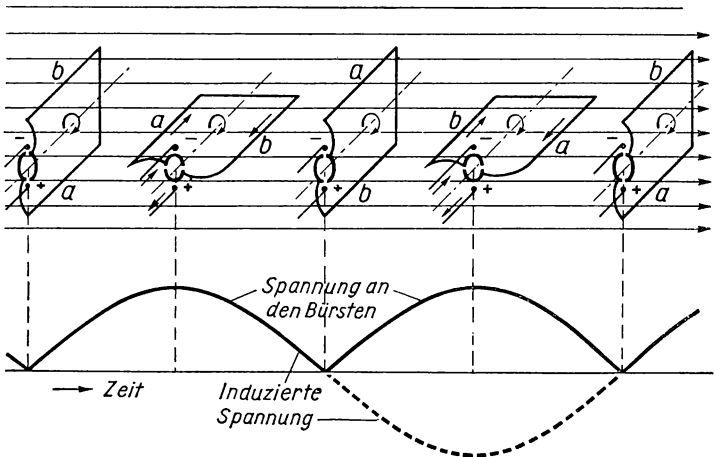


Bild 335. Leiterschleife mit Kollektor, Erzeugung eines Gleichstromes

rechter Lage der Schleifenebene zu den Kraftlinien bis zu einem Maximum bei paralleler Lage und fällt wieder zu Null ab. In der zweiten Halbdrehung kehrt sich die Richtung um. Im äußeren Stromkreis fließt ein *sinusförmiger Wechselstrom*, die Vorrichtung wirkt als Spannungsquelle, als *Generator*. Die Stromabnahme erfolgt an zwei Schleifringen. Der Vorgang ist umkehrbar. Schickt man einen Wechselstrom durch eine Leiterschleife, so gerät diese in Umdrehung, weil sich mit der Spannungsumkehr eine Fortsetzung der Drehbewegung im gleichen Sinne ergibt. Die Vorrichtung wirkt als *Motor*.

Ersetzt man die beiden Schleifringe durch zwei Metallbeläge (Kollektoren), die gegeneinander isoliert auf der Achse befestigt sind (Bild 335), so wächst die induzierte Spannung während der ersten Halbdrehung von Null zu einem Maximum und sinkt wieder zu Null ab. Beim Übergang über diesen Punkt gleitet der Schleifkontakt auf die andere Lamelle, die Spannung bei der zweiten Halbdrehung hat den gleichen Verlauf, es entsteht ein *pulsierender Gleichstrom*.

$$\text{Generatorspannung } U = s \mathfrak{B} l v \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}$$

s Anzahl der Stäbe vor jedem Pol, $\mathfrak{B}$ magnetische Induktion, l wirksame Stablänge, v Drehgeschwindigkeit $= 2\pi r n$.

$$\text{Motorantriebsmoment} = s I l \mathfrak{B} r \frac{1}{10} \text{ [dyn} \cdot \text{cm]} \quad (\text{vgl. S. 205})$$

b) Ankerformen und Schaltungen

Um die Wirkung zu vervielfachen, treten an die Stelle der einzelnen Leiterschleife Ankerwicklungen in Form von Spulen:

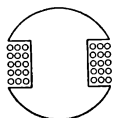


Bild 336
Doppel-T-Anker

1. Der Doppel-T-Anker (Bild 336) hat eine Spulenwicklung über dem Weicheisenkern, der zur Vermeidung von Wirbelströmen aus Eisenlamellen zusammengesetzt ist.
2. Der Trommelanker trägt eine Schleifenwicklung (Bild 337) oder Wellenwicklung. Bild 338 zeigt den Spannungsverlauf bei einem Kollektor mit 4 Segmenten.

Der Doppel-T-Anker hat den Nachteil, daß die Spannung beim Übergang der Schleifbürsten von einer Kollektorlamelle zur ande-

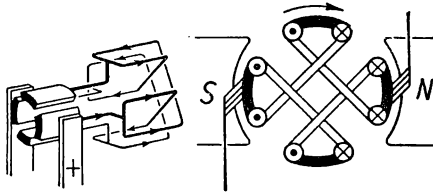


Bild 337. Schema des Trommelankers

ren auf Null sinkt. Beim Trommelanker ist dieser Nachteil dadurch vermieden, daß er eine geschlossene Wicklung enthält. Hier tragen alle Spulen gleichzeitig zu der am Kollektor abgenommenen Spannung bei.

Prinzip der Selbsterregung. An die Stelle des permanenten Magneten kann ein Elektromagnet treten, weil auch in ihm ein remanenter Magnetismus vorhanden ist, der eine erste schwache Induktionswirkung ergibt. Führt man diesen schwachen Strom durch die Magnetspule, so wächst die Stärke des Elektromagneten allmählich zur vollen Wirksamkeit an (dynamo-elektrisches Prinzip).

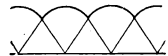


Bild 338
Spannungsverlauf
bei 4 Segmenten

4 Formen von Maschinen:

Beim Hauptschlußgenerator (Bild 339) ist die Klemmenspannung abhängig von der Belastung, d. h. von der Stärke des Verbraucherstroms. Wird mehr Strom verbraucht, so wird das Feld stärker erregt, die Klemmenspannung wächst. Die Neben-

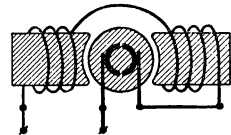


Bild 339
Hauptschlußmaschine

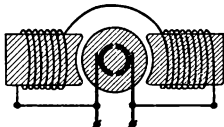


Bild 340. Nebenschlußmaschine

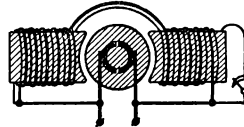


Bild 341. Verbundmaschine

schlußmaschine (Bild 340) gestattet, die Klemmenspannung besser konstant zu halten. Ein Spannungsabfall bei zunehmender Be-

lastung kann durch Verringern des Widerstandes im Nebenschluß ausgeglichen werden. Die Verbundmaschine verbindet die Eigenschaften der beiden ersten (Bild 341). Zu-

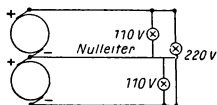


Bild 342. Hintereinanderschaltung zweier Generatoren

nehmende Belastung wirkt im Hauptschluß steigernd auf die Klemmenspannung, im Nebenschluß vermindern.

Generatoren können wie Elemente hintereinandergeschaltet werden (Bild 342). Ein in Gang befindlicher Elektromotor wirkt zugleich als Dynamomaschine, er induziert in den Ankerdrähten eine Gegenspannung U_{ind}

$$\text{Klemmenspannung} = U - U_{\text{ind}}$$

Auf den Motor darf beim Anlaufen nicht sofort die volle Spannung wirksam werden, weil im Anfang U_{ind} Null ist und der geringe Widerstand des Ankers durch die große Anfangsstromstärke zu starker Erwärmung und zu Isolationsschäden in der Wicklung

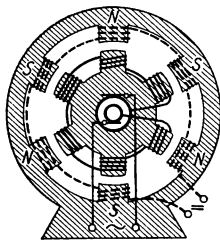


Bild 343. Außenpolmaschine

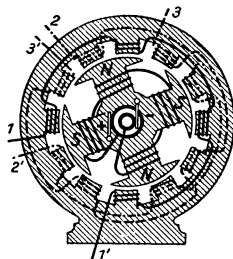


Bild 344. Innenpolmaschine

führt. Deshalb wird als Anlasser ein Kurbelwiderstand vorgeschaltet, der bei wachsender Tourenzahl und damit verbundenem Anstieg von U_{ind} ausgeschaltet werden kann.

Durch den Bau mehrpoliger Maschinen läßt sich die Wirkung von Generatoren und Motoren steigern. Der Anker ist dann als *Sternanker* ausgebildet. Ständer und Läufer können ihre Rollen vertauschen: *Außenpolmaschinen* (Bild 343) und *Innenpolmaschinen* (Bild 344). Die Innenpolmaschine hat den Vorzug, daß die Schleif-

kontakte nur den Erregerstrom für die Magnete zuführen. Hierbei läßt sich die Funkenbildung an den Schleifkontakten besser vermeiden.

Durch symmetrische Anordnung von 3 Polpaaren kann man in einer Maschine 3 Wechselströme erzeugen, die in ihrer Phase um je 120°

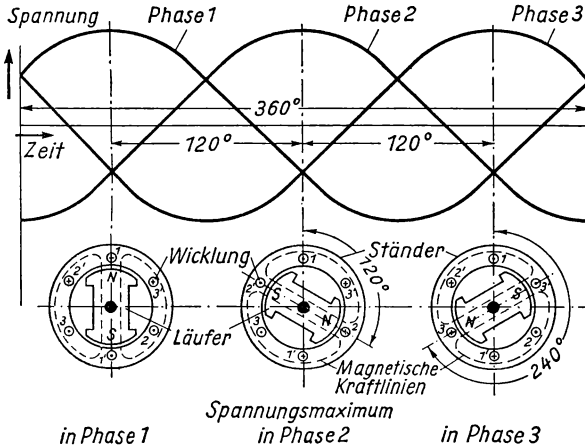


Bild 345. Drei Phasen eines Drehstromgenerators

verschoben sind: *Dreiphasenstrom* oder *Drehstrom*. Bild 345 läßt erkennen, daß die 3 Phasen in jedem Augenblick die Spannung Null ergeben. Für die Fortleitung des Dreiphasenstroms sind deshalb nur 3 Leitungen nötig gegenüber 4 beim Zweiphasenstrom.

Die 3 Phasen kann man in einem Punkt zusammenschalten (Sternschaltung, Bild 346). Man verbindet den Sternpunkt durch eine Rückleitung mit dem Generator. Die Rückleitung ist stromlos, solange die 3 Phasen gleich belastet sind. Zwischen einem Phasenleiter und dem Nulleiter besteht die Phasenspannung U . Die zwischen zwei Phasenleitern bestehende Spannung heißt verkettete Spannung U_v . Je zwei Phasen haben

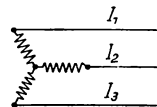


Bild 346
Sternschaltung

eine Phasenverschiebung um 120° . Wir stellen die Phasen durch Vektoren dar (Bild 347). Dann ist U_v Grundlinie in einem gleichschenkligen Dreieck mit dem Winkel 120° an der Spitze.

$$\frac{U_v}{2} : U = \sin 60^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3} \quad U_v = U \sqrt{3}$$

Meist wird die Phasenspannung U für Licht- und Heizstrom (220 V) verwandt, die verkettete Spannung für Kraftstrom (380 V).

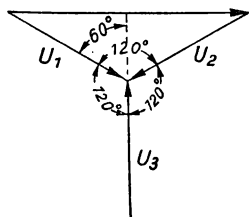


Bild 347
Verkettete Spannung

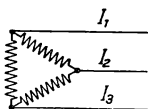


Bild 348
Dreieckschaltung

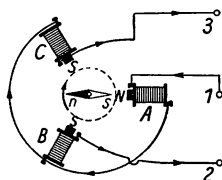


Bild 349
Drehfeld

Da die Summe der Spannungen gleich Null ist, kann man die 3 Phasenleitungen auch im Dreieck schalten. Bei der Dreieckschaltung ist nur die Phasenspannung U verfügbar (Bild 348). Schickt man die 3 Phasen durch die symmetrisch angeordneten Spulen dreier Elektromagnete, so entsteht ein Drehfeld (Bild 349). Eine Magnetnadel gerät in Umdrehung. Grundgedanke der *Asynchronmotoren* mit Kurzschlußläufer.

c) Energieübertragung

Die Überlegenheit des Wechselstroms über den Gleichstrom beruht darauf, daß man ihn auf weite Entfernungen leicht übertragen kann. Hierbei kommt es darauf an, hohe Spannungen und entsprechend geringe Stromstärken herzustellen, um die Wärmeverluste in den Leitungen auf ein tragbares Maß herabzusetzen. Die Umwandlung von Gleichstrom niedriger Spannung in Gleichstrom hoher Spannung macht technische Schwierigkeiten, während Wechselstrom unter Beibehaltung der Frequenz leichter zu transformieren ist. Wechselstromtransformatoren haben keine rotierenden Maschinenteile. Man benutzt lediglich die Induktionswirkung einer Primärspule, die durch einen geschlossenen Eisenkern mit

der Sekundärspule verbunden ist. Der geschlossene Eisenkern hat den Zweck, das Magnetfeld zusammenzuhalten und alle Kraftlinien im Feld der ersten Spule durch die zweite zu führen (Bild 350).

Primärstrom und Sekundärstrom haben gleiche Frequenz, weil jeder maximalen Änderung des Primärstroms auch eine maximale Induktionswirkung entspricht. Dem Nulldurchgang des Primärstroms steht also das Strommaximum des Sekundärstroms gegenüber, beide Ströme sind um 90° phasenverschoben.

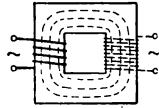


Bild 350. Transformator mit geschlossenem Eisenkern

Nach dem Induktionsgesetz ist $U = \text{Leiterlänge} \times \text{Kraftlinienzahl} \times \text{Geschwindigkeit}$. Die beiden letzten Größen sind wegen des geschlossenen Eisenkerns gleich. Demnach verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen: $U_1 : U_2 = w_1 : w_2$.

$$\text{Übertragungsverhältnis } \ddot{u} = \frac{\text{primäre Windungszahl}}{\text{sekundäre Windungszahl}}$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Das Übertragungsverhältnis ist entscheidend für die entstehende Sekundärspannung.

Bei den in der Fernsprechtechnik verwendeten Ringübertragern ist das Übertragungsverhältnis meist 1 : 1.

Niederspannungstransformatoren dienen dazu, am Verbrauchsort die Spannung wieder auf das normale Maß herabzusetzen.

Weitere Anwendungen

Induktionsschmelzöfen haben sekundär als einzige Windung die Schmelzrinne, in der sehr hohe Stromstärken entstehen.

Klingeltransformatoren setzen die vom Werk gelieferte Normalspannung auf die geringe Spannung herab, die zum Betrieb der Klingelanlage nötig ist.

Wechselstrom wird in Gleichstrom durch *rotierende Umformer* oder durch *Gleichrichter* umgewandelt; für kleine Stromstärken werden Trockengleichrichter, für größere Quecksilberdampf-Gleichrichter benutzt. Rotierende Umformer tragen auf gleicher Welle einen Motor und einen Generator. Wird der Motor mit Wechselstrom

betrieben, so liefert der Generator Gleichstrom oder umgekehrt. Bei Einankerumformern liegen beide Wicklungen auf dem gleichen Anker.

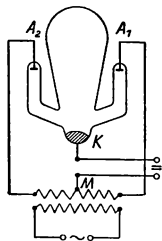


Bild 351
Quecksilberdampf-
Gleichrichter

Quecksilberdampf-Gleichrichter arbeiten ohne rotierende Teile (Bild 350). In einem Entladungsgefäß mit Quecksilberdampf stehen einer Kathode aus Quecksilber zwei Anoden gegenüber. Während der ersten Halbwelle geht der Elektronenstrom von der Kathode zu der einen Anode, während der zweiten zur anderen, weil eine Entladung nur stattfindet, wenn das Quecksilber Kathode ist. Aus Wechselstrom mit 50 Perioden erhält man pulsierenden Gleichstrom mit 100 Stromstößen (vgl. S. 212).

3. Wechselstrom

a) Allgemeine Eigenschaften

Die häufigste Form des Wechselstroms ist die Sinusschwingung. Nichtsinusförmiger Wechselstrom läßt sich als Summe von Sinusschwingungen angenähert darstellen.

u sei die Augenblicksspannung, U die maximale Spannung, i der Augenblickswert der Stromstärke, I die maximale Stromstärke.

Die Winkelgeschwindigkeit ω der Maschine ist $\frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

$2\pi\nu$ heißt die *Kreisfrequenz* (vgl. II, 1a).

Bei Wechselstrom fällt im allgemeinen das Maximum der Spannung nicht mit dem Maximum der Stromstärke zusammen, beide Werte haben gegeneinander eine Phasenverschiebung. Die Phasenverschiebung wird durch Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreis verursacht.

$$u = U \sin \omega t; \quad i = I \sin (\omega t \pm \varphi) \quad (\text{vgl. S. 72})$$

Die für Wechselstrom geeigneten Strom- und Spannungsmesser zeigen nicht die Augenblickswerte, sondern die *Effektivwerte* an. Unter Effektivwert versteht man den Wert des Wechselstroms,

den ein Gleichstrom haben müßte, um die gleiche Leistung zu vollbringen.

$$U_{\text{eff}} = \frac{U}{\sqrt{2}} \approx 0,7 U; \quad I_{\text{eff}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \approx 0,7 I$$

Diese Werte erhält man durch Betrachtung der erzielten Stromwärme: Die schraffierten Flächen sind gleich (Bild 352). Also ist

$$I_{\text{eff}}^2 R T = \frac{1}{2} I^2 R T; \quad I_{\text{eff}} = \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

b) Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreis

Liegt eine *Spule* im Wechselstromkreis, so wird in dieser eine Gegenspannung induziert; $u_L = L \frac{di}{dt}$.

Diese vermindert die Wechselspannung und wirkt so, als ob ein zusätzlicher Widerstand im Stromkreis auftritt (*induktiver Widerstand*).

$iR = u - u_L; \quad u = iR + L \frac{di}{dt}; \quad i = I \sin \omega t$, die Differentiation ergibt: $\frac{di}{dt} = \omega I \cos \omega t$.

$u = IR \sin \omega t + LI \omega \cos \omega t = I(R \sin \omega t + L \omega \cos \omega t)$. Setzt man $R = R_{\text{ges}} \cos \varphi$ und $L \omega = R_{\text{ges}} \sin \varphi$, so entsteht infolge der Beziehung $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$ die Gleichung $R_{\text{ges}} = \sqrt{R^2 + (L \omega)^2}$; $\tan \varphi = \frac{L \omega}{R}$,

$$u = IR_{\text{ges}} (\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi) = IR_{\text{ges}} \sin(\omega t + \varphi).$$

Der *Wechselstromwiderstand* R_{ges} setzt sich zusammen aus dem „Ohmschen“ Widerstand R und dem induktiven Widerstand $L \omega$. Der induktive Widerstand wächst mit der Frequenz.

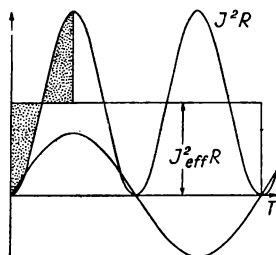


Bild 352
Effektivwert der Stromstärke

Bei induktiver Belastung eilt die Spannung dem Strom voraus, die Stromstärke bleibt hinter der Spannung zurück

Schaltet man in einen Gleichstromkreis einen *Kondensator*, so unterbricht dieser den Stromkreis. Bei einem Wechselstromkreis wirkt die abwechselnde Aufladung der Kondensatorplatten so, als ob ein Wechselstrom auch zwischen den Kondensatorplatten fließt. Während die eine Kondensatorplatte sich negativ auflädt, wird die andere durch Influenz positiv und umgekehrt. An der anderen Kondensatorplatte treten also die gleichen Spannungswechsel auf, nur um 180° phasenverschoben.

Im Wechselstromkreis stellt ein Kondensator einen Widerstand dar (*kapazitiver Widerstand*). Der kapazitive Widerstand nimmt mit wachsender Frequenz ab.

Die Ladung Q bringt am Kondensator die Spannung $u_0 = \frac{Q}{C}$ hervor.

$$Q = \int i dt = \int I \sin(\omega t) dt$$

$$u_0 = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I \sin(\omega t) dt = -\frac{I}{C\omega} \cos \omega t$$

$\frac{1}{C\omega}$ heißt *kapazitiver Widerstand*.

$$u = iR + u_0 = IR \sin(\omega t) - \frac{I}{C\omega} \cos \omega t$$

$$= I \left(R \sin \omega t - \frac{1}{C\omega} \cos \omega t \right); \quad R = R_{\text{ges}} \cos \varphi,$$

$$\frac{1}{C\omega} = R_{\text{ges}} \sin \varphi \text{ gesetzt,}$$

$$u = IR_{\text{ges}} (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi) = IR_{\text{ges}} \sin(\omega t - \varphi)$$

Der Kondensator bewirkt ein Voreilen des Stromes vor der Spannung, der Ladestrom geht der Kondensatorspannung voraus

Induktiver Widerstand und kapazitiver Widerstand wirken in entgegengesetztem Sinn.

Liegen Spule und Kondensator hintereinander im Wechselstromkreis, so ergibt eine ähnliche Rechnung wie oben für den

$$\text{Wechselstromwiderstand } R_{\text{ges}} = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

Die Formel läßt die Möglichkeit erkennen, den induktiven Widerstand durch einen entsprechenden kapazitiven Widerstand aufzuheben.

$$\text{Resonanzbedingung: } L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

$\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$ heißt *Scheinwiderstand* oder *Wechselstromwiderstand*.

$L\omega - \frac{1}{C\omega}$ heißt *Blindwiderstand*, weil induktiver Widerstand und kapazitiver Widerstand keine Leistung aufnehmen; nur der Ohmsche Widerstand R führt zur Erwärmung des Stromkreises, er heißt deshalb auch *Wirkwiderstand*.

Bei der Zusammenfügung der drei beim Wechselstrom auftretenden Widerstände ist zu beachten, daß induktiver und kapazitiver Widerstand Phasenverschiebungen hervorrufen, daß man sie also als Vektoren zu behandeln hat. Legt

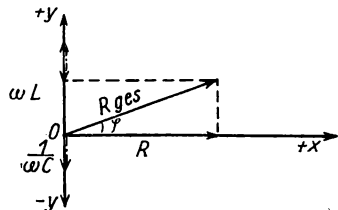


Bild 353. Phasenverschiebung im Wechselstromkreis

man den Ohmschen Widerstand in die positive x -Achse eines rechtwinkligen Koordinatensystems, so ist der induktive Widerstand wegen der Phasenverschiebung um $+90^\circ$ in die positive y -Achse (Bild 353) zu legen, der kapazitive Widerstand wegen $\varphi = -90^\circ$ dagegen in die negative y -Achse.

$L\omega - \frac{1}{C\omega}$ ergibt den Blindwiderstand; der durch Vektoraddition mit dem Wirkwiderstand R zusammenzufügen ist (Diagonale im Rechteck). Die Phasenverschiebung entsteht aus

$$\tan \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

c) Leistung im Wechselstromkreis

Liegt die Phasendifferenz zwischen $\varphi = 0$ und $\varphi = 90^\circ$, so wirkt für die Leistung nur die Komponente der Stromstärke, die in der

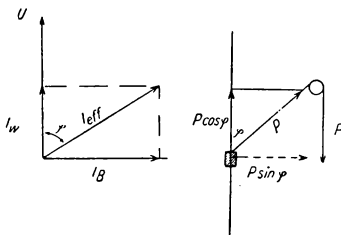


Bild 354. Wirkstrom und Blindstrom

Richtung der Spannung liegt. Diese Komponente I_w heißt Wirkstrom, die dazu senkrechte Blindstrom. Bild 354 stellt die gegenseitige Lage der Komponenten dar und gibt zur Erläuterung einen mechanischen Vergleich.

Für die Leistung N eines Wechselstroms mit der Phasenverschiebung φ ergibt sich:

$$N = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi \text{ [Watt]}$$

$\cos \varphi$ heißt der Leistungsfaktor

Sonderfälle: $\varphi = 0$: Strom und Spannung sind in Phase

$$N = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}}.$$

Die höchstmögliche Phasendifferenz $\varphi = 90^\circ$ ergibt $N = 0$ (wattlosen Strom).

Bei Drehstrom setzt sich die Leistung aus den Einzelleistungen der 3 Phasen zusammen:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3$$

Bei gleichmäßiger Belastung sind die Zweigleistungen gleich, also $N = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1$. Die verkettete Spannung zwischen 2 Pha-

sen ist $U_v = U \sqrt{3}$, also $U = \frac{U_v}{\sqrt{3}}$. Für die Gesamtleistung ergibt

sich dann $N = U_v I \sqrt{3} \cos \varphi$ (vgl. S. 215).

4. Elektromagnetische Schwingungen

a) Der geschlossene Schwingungskreis

Ein Leiterkreis, der eine Spule als Selbstinduktion und einen Kondensator als Kapazität enthält, bildet einen geschlossenen Schwingungskreis (Bild 355). Lädt man den Kondensator einmalig auf,

so entlädt er sich über die Spule. Hier baut sich ein Magnetfeld auf, das beim Zusammenbrechen in den Kondensatorplatten eine Spannung induziert, die umgekehrte Richtung hat. Dies führt

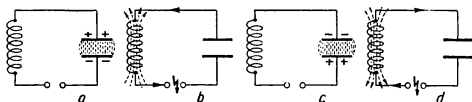


Bild 355. Geschlossener Schwingungskreis

wiederum zu einer Entladung durch die Spule, jetzt in entgegengesetzter Richtung. Der Wechsel von Aufladung des Kondensators und Entladung durch die Spule geht fort, bis die ursprüngliche elektrische Energie in Wärme umgesetzt ist. Es entsteht eine gedämpfte Schwingung. Die Schwingungsdauer hängt von den Größenverhältnissen der Spule und des Kondensators ab.

Thomsonsche Schwingungsformel: $T = 1/\nu = 2\pi\sqrt{LC}$

Begründung: Aus der Formel für den Wechselstromwiderstand

$$R_{\text{ges}} = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

folgt die Resonanzbedingung $L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0$ (S. 221).

$$LC = \frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{(2\pi\nu)^2}; \quad \frac{1}{\nu} = T = 2\pi\sqrt{LC}$$

ν heißt die Eigenfrequenz des Schwingungskreises.

Um eine ungedämpfte Schwingung herzustellen, muß man die Dämpfungsverluste durch Energiezufuhr von außen ersetzen (Vergleich mit der Schaukel).

Zur Erzeugung elektrischer Schwingungen hat man anfangs einen Funkeninduktor benutzt, in dessen äußeren Stromkreis ein Kondensator (Leidener Flasche) und eine Funkenstrecke geschaltet worden sind. Der Charakter der Funkenentladung als gedämpfte Schwingung läßt sich im Drehspiegel zeigen (*Feddersen* 1858). Als Wellenanzeiger kann auch ein Drahting mit wenigen Windungen

dienen, dessen Enden durch ein Glühlämpchen geschlossen sind. Die magnetischen Wechselfelder induzieren in der Spule einen Wechselstrom, das Lämpchen leuchtet auf.

Die Wirkung des geschlossenen Schwingungskreises reicht nur so weit, wie das Kraftfeld zwischen den Kondensatorplatten wirksam ist.

b) Der offene Schwingungskreis

Den Übergang vom geschlossenen Schwingungskreis zum offenen zeigt das Bild 356. Der geschlossene Schwingungskreis wird um-

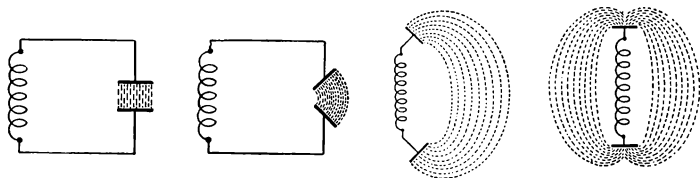


Bild 356. Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingungskreis

geformt zum elektrischen *Dipol*. Diesen Übergang hat *Hertz* in den Jahren 1887 bis 1889 erforscht und damit die Ausstrahlung elektrischer Wellen in den Raum nachgewiesen. *Hertz* hat bei seinen Versuchen Wellen von 40 bis 60 cm Wellenlänge erhalten und für diese die Gültigkeit des Reflexions- und des Brechungsgesetzes sowie die Polarisierung der elektrischen Wellen nachgewiesen. Dabei hat ein mit parallelen Drähten bespannter Rahmen die analysierende Turmalinplatte im entsprechenden Versuch der Optik vertreten.

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen (Bild 357)

Bei jedem Funkenüberschlag und dem damit verbundenen Stromstoß in der Spule bildet sich in der zum Dipol senkrechten Ebene ein magnetisches Feld. Die Spannungsmaxima in den Enden des Dipols rufen ein elektrisches Feld hervor, das auf der Ebene des magnetischen Feldes senkrecht steht. Bei regelmäßigem Funkenüberschlag entstehen abwechselnd magnetische und elektrische Felder, die ineinander verschlungen sind und sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreiten.

Die gedämpften Schwingungen starker Funkenentladungen sind von dem russischen Physiker *Popow* (1859 bis 1905) und später

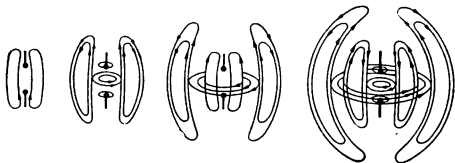


Bild 357. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

von dem italienischen Ingenieur *Marconi* (1874 bis 1937) zur drahtlosen Übermittlung telegrafischer Zeichen verwendet worden (Funkentelegrafie).

c) Die Schwingungserregung in der Elektronenröhre

Zur Erregung ungedämpfter elektrischer Schwingungen dient die Elektronenröhre (vgl. S. 176). Der Anodenstrom wird durch einen regelbaren geschlossenen Schwingungskreis geleitet, dessen Spule mit einer zweiten gekoppelt ist. Die Rückkopplungsspule (*A. Meißner* 1913) überträgt die Schwingung auf das Gitter der Röhre und verstärkt dadurch den Anodenstrom im Rhythmus des Schwingungskreises. Mit der Spule des geschlossenen Schwingungskreises ist noch eine weitere Spule gekoppelt, die die Schwingung der Antenne (Dipol) zuleitet (Bild 358).

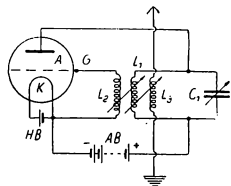


Bild 358
Rückkopplungsschaltung

Im Anodenkreis fließt ein Gleichstrom, der im Rhythmus der Schwingung pulsiert (Wellenstrom). In der Spule des Antennenkreises wirken nur die Schwankungen des Anodenstromes induzierend. Im Antennenkreis schwingt ein Wechselstrom.

Modulation ungedämpfter Schwingungen. Die von der Antenne in den Raum gestrahlten Schwingungen sind hochfrequent, liegen also weit über der Hörbarkeitsgrenze. Durch eine Morsetaste lassen sich die Wellen in lange oder kurze Wellenpakete zerteilen, die nach allen Seiten in den Raum ausstrahlen: Telegrafie (Bild 359).

Durch Einschalten eines Mikrophonkreises in den Gitterkreis oder in den Antennenkreis läßt sich der Hochfrequenz (Trägerfrequenz) die niederfrequente Schwingung des Mikrophonkreises (Sprachfrequenz) aufprägen (Modulation) (Bild 360). Beim Emp-

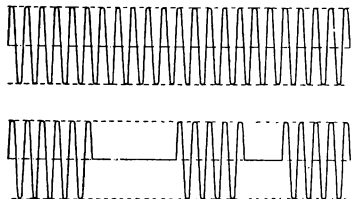


Bild 359. Telegraphie mit ungedämpften Schwingungen

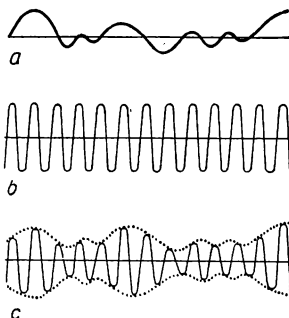


Bild 360. Modulation ungedämpfter Schwingungen

fang kommt es darauf an, die Trägerfrequenz von der Sprachfrequenz zu trennen und letztere hörbar zu machen.

d) Empfang modulierter Wellen

Ein vertikal ausgespannter Draht oder eine Stabantenne stellt die obere Hälfte eines Dipols dar, die untere wird durch die leitende Erde ersetzt. Die über die Erdoberfläche wandernden elektromagnetischen Felder induzieren in der Antenne Wechselspannungen gleicher Frequenz. Auf eine *Stabantenne* wirken nur die elektrischen Felder, die magnetischen bleiben wirkungslos, weil sie zur Antenne senkrecht verlaufen. Anders bei der Rahmenantenne. Hier durchsetzen die Magnetfelder die Rahmenebene und induzieren im Rahmen einen Wechselstrom gleicher Frequenz. Die Rahmenantenne zeigt eine Richtwirkung, der induzierte Wechselstrom hat seine größte Stärke, wenn die Rahmenebene auf den Sender zeigt, die magnetischen Kraftlinien also senkrecht zum Rahmen verlaufen. In beiden Fällen fließt in der Antenne ein Wechselstrom. Sind die Schwingungen stark genug, so kann man sie durch Kopplung mit einem auf Resonanz abgestimmten geschlossenen Schwingungskreis übertragen und hier durch Einschalten eines Detektors und Kopfhörers oder Lautsprechers hörbar machen. Der

Detektor besteht aus einem Kristall, der den Strom nur in einer Richtung hindurchläßt und damit als Gleichrichter dient. Die Telefonmembran ist zu träge, um auf die hochfrequenten Schwingungen zu reagieren, sie schwingt nur im Rhythmus der aufgeprägten niederfrequenten Schwingungen, besorgt also die Trennung der Trägerfrequenz von der Sprachfrequenz (Bild 361).

Für den Empfang weiter entfernt liegender Sender reicht der Detektorkreis nicht aus. An seine Stelle tritt die Elektronenröhre in Audionschaltung.

Die *Audionschaltung* (Bild 362) hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Sie dient einmal zur *Gleichrichtung* der ankommenden Schwingung und gleichzeitig zu deren *Verstärkung*. Durch die aus der Kathode austretenden Elektronen ist das Gitter von vornherein negativ geladen. Wird vom Antennenkreis die positive Halbwelle zugeführt, so kompensiert sie die negative Ladung des Gitters und ist auf den Anodenstrom ohne Einfluß. Die negative Halbwelle addiert sich mit der negativen Gitterladung und schwächt den Anodenstrom. Die obere Hälfte der Schwingung wird ausgelöscht, die untere verstärkt. Durch Kopplung und Einschaltung mehrerer selbständiger Verstärkerkreise gleicher Frequenz kann die Schwingung so verstärkt werden, daß sie für den Betrieb des Lautsprechers ausreicht (*Mehrkreisempfänger*).

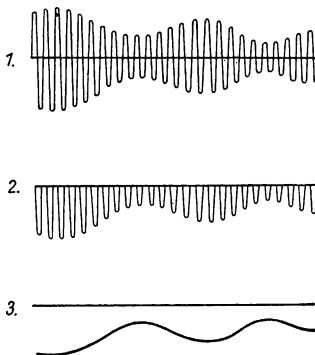


Bild 361. Trennung von Träger- und Sprachfrequenz

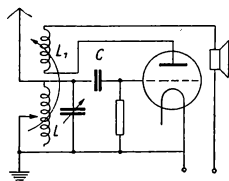


Bild 362. Audionschaltung

Beim *Überlagerungsempfang* (Bild 363) wird ein Hilfssender benutzt, der Oszillator. Die im Empfänger erzeugte Hilfsschwingung ergibt mit der ankommenden Schwingung eine Zwischenfrequenz (Schwebung), die weiter verstärkt und dann gleichgerichtet wird.

Einteilung der Funkwellen

Langwellen: 50 kHz bis 500 kHz; 6 km bis 600 m

Mittelwellen: 500 kHz bis 1,5 MHz; 600 m bis 200 m

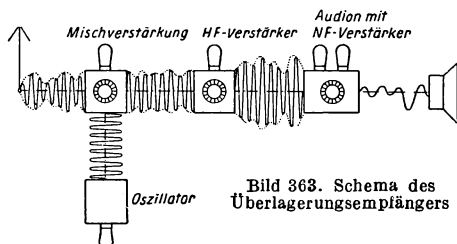
Grenzwellen: 1,5 MHz bis 5 MHz; 200 m bis 60 m

Kurzwellen: 5 MHz bis 30 MHz; 60 m bis 10 m

Ultrakurzwellen: 30 MHz bis 300 MHz; 10 m bis 1 m

Dezimeterwellen: 300 MHz und darüber; 1 m und darunter

Langwellen und Mittelwellen breiten sich überwiegend an der leitenden Erdoberfläche aus (Bodenwelle), nur ein Teil von ihnen geht



in den Raum, wird an der *Heaviside-Schicht*¹ reflektiert und führt zur Erscheinung des Fadings² (Interferenz von Raum- und Bodenwelle).

Kurz- und Ultrakurzwellen nähern sich mit abnehmender Wellenlänge immer mehr der geradlinigen Ausbreitung. Die primäre Reichweite fällt mit der optischen Sicht zusammen. Infolge Reflexion an der Heaviside-Schicht tritt gerade bei Kurzwellen in großer Entfernung erneuter Empfang ein.

¹ spr. Hewiseid, benannt nach dem Entdecker. Diese in 100 bis 400 km Höhe liegenden Schichten reflektieren die elektromagnetischen Wellen.

² spr. Feding, aus dem Englischen übernommen = Schwund.

VI. Strahlung und Atombau

A. Gesetze der Strahlung

1. Die Wellenskala

a) Die Ausdehnung des Spektrums

Das sichtbare, vom Auge wahrnehmbare Spektrum ist nur ein kleiner Teil des Gesamtspektrums. Nach den größeren Wellenlängen hin schließt sich das infrarote Spektrum an. Glas absorbiert diese Strahlung sehr stark, deshalb werden zur Gewinnung des infraroten Teils des Spektrums Linsen und Prismen aus Steinsalz oder Flußspat verwendet. Das erforschte Gebiet der infraroten Strahlen umfaßt die Wellenlängen von $400\ \mu = 0,04\text{ cm}$ bis zur Grenze des sichtbaren Spektrums $0,8\ \mu$, das sind fast 10 Oktaven, während das sichtbare Spektrum nur 1 Oktave umschließt.

Die *infrarote Strahlung* macht sich überwiegend als *Wärmestrahlung* bemerkbar. Sie wird mit Strahlungsmeßgeräten gemessen, deren Widerstandsänderung mit der Temperatur ein Maß für die zugestrahlte Energie ergibt. Hierbei sind Temperaturänderungen von 10^{-6}°C noch nachweisbar. Auch das infrarote Spektrum enthält Absorptionslinien (Fraunhofersche Linien). Infrarote Strahlen durchdringen Nebel und Dunst (Infrarotfotografie).

Jenseits des sichtbaren Spektrums folgt nach den kürzeren Wellenlängen hin das *Ultraviolett*. Zur Gewinnung des ultravioletten Spektrums werden Quarzlinsen und Quarzprismen oder Linsen und Prismen aus Uviolglas verwendet. Je heißer eine Lichtquelle ist, um so mehr ultraviolette Strahlen sendet sie aus. Diese Strahlen haben vorwiegend chemische Wirkung, sie schwärzen Brom- und Jodsilber (Grundlage der Fotografie). Ultraviolettstrahlen wirken keimtötend und bräunen die Haut (Sonnenbrand). Die unteren Luftschichten saugen die Ultraviolettstrahlung zum größten Teil auf. Die Strahlen wirken ionisierend und führen zur

Ausbildung der Heavyside-Schicht, an der die Funkwellen reflektiert werden.

Die Strahlen können mit Hilfe eines Platinzyanürschirms oder durch Uranglas sichtbar gemacht werden. Beide Stoffe haben die Eigenschaft, kurzwelliges Licht zu absorbieren und als längerwelliges wieder auszustrahlen (Fluoreszenz). Dadurch rückt ein Teil des ultravioletten Spektrums in das sichtbare Gebiet. Die Ultraviolettstrahlung umfaßt 7 Oktaven bis etwa zur Wellenlänge $4 \cdot 10^{-7}$ cm.

b) Die Röntgenstrahlen

Läßt man in einer hochevakuierten Entladungsröhre die Kathodenstrahlen gegen eine Metallplatte (Antikathode) prallen, die mit der Anode leitend verbunden ist, so geht von der Antikathode eine Strahlung aus, die die Glaswand der Röhre zu grünlichem Fluoreszenzleuchten erregt und sich jenseits der Röhrenwand als unsichtbare Strahlung fortsetzt (Bild 364). Diese 1895 entdeckten Strahlen werden nach ihrem Entdecker *Röntgen* (1845 bis 1923) benannt. Sie sind fotografisch wirksam und haben ein starkes Durchdringungsvermögen (Durchleuchtung). Die Röntgenstrahlung ist eine Wellenstrahlung, also nicht durch magnetische und elektrische Felder ablenkbar. Durch die Atomgitter von Kristallen lassen sich Beugungsbilder von Röntgenstrahlen herstellen (*Laue* 1912), und damit läßt sich die Wellenlänge bestimmen.

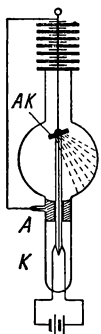


Bild 364
Röntgenröhre

Es gibt 2 Arten von Röntgenstrahlen: Die direkte Strahlung, die von der Antikathode ausgeht, liefert ein kontinuierliches Spektrum (das Bremsspektrum).

Je nach der an die Röhre gelegten Spannung bricht das Spektrum bei einer bestimmten Wellenlänge ab. Die *charakteristische Strahlung*, auch als Eigenstrahlung bezeichnet, liefert ein Linienspektrum und ist auf Vorgänge im Innern der Atome zurückzuführen. Die Lage der Linien hängt von dem Material der Antikathode ab.

Moseleys Gesetz. Der englische Physiker *Moseley* (1888 bis 1915) hat das Eigenspektrum näher untersucht und das Gesetz aufgestellt:

$$\nu = C (Z - a)^2$$

ν ist die Schwingungszahl, C und a sind Konstanten, Z die Nummer des Elementes im periodischen System. Dieses Gesetz erbringt den Beweis, daß das ordnende Prinzip im Aufbau der Elemente nicht das Atomgewicht, sondern die Kernladungszahl ist (vgl. 3b).

c) Die radioaktive Strahlung

1896 entdeckte der französische Physiker *Becquerel* (1852 bis 1908) eine Strahlung, die von Uranverbindungen ausgeht, Luft ionisiert, fotografische Wirkungen auslöst und auf einem Platinzyanürschirm Lichtblitze entstehen läßt. Die Zählung der Lichtblitze im *Spinthariskop* gibt ein Maß für die Aktivität des Präparates.

Frau *Curie* (1857 bis 1934) gelang die Reindarstellung der Elemente Polonium und Radium. Heute sind etwa 40 natürliche radioaktive Stoffe bekannt. Die Untersuchung der Strahlung nach dem Ablenkverfahren im elektrischen und magnetischen Feld hat ergeben:

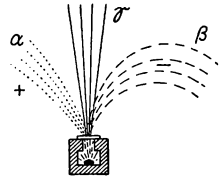


Bild 365
Radioaktive Strahlung

Radioaktive Stoffe senden 3 Strahlenarten aus (Bild 365).

Die Ladungsträger der α -Strahlen sind zweifach positiv geladene Heliumatome mit einer Geschwindigkeit bis zu 25 000 km/s.

Die Ladungsträger der β -Strahlen sind *Elektronen* (Geschwindigkeit bis 280 000 km/s).

Die γ -Strahlung ist eine nicht ablenkbare *Wellenstrahlung*, deren Geschwindigkeit 300 000 km/s beträgt.

Die Wellenlänge der γ -Strahlen liegt zwischen 10^{-9} und 10^{-11} cm.

d) Die kosmische Strahlung

Eine Strahlung von noch kleinerer Wellenlänge glaubte man in der von *Heß* entdeckten und von *Kolhörster* u. a. näher untersuchten Höhenstrahlung gefunden zu haben. Diese Strahlung stammt aus dem Weltraum und wird von der Luft zum Teil absorbiert. Einzelne besonders durchdringende Strahlen sind am Grunde des Bodensees nachgewiesen worden. Ein Bleiblock von 1,50 m Dicke

schwächt diese Strahlen, die als die bisher härtesten gelten können, erst auf die Hälfte. Die Höhenstrahlung löst in den obersten Luftschichten sekundäre Prozesse aus, die für die Atomforschung besondere Bedeutung gewonnen haben. Heute kann als erwiesen gelten, daß die Höhenstrahlung eine Korpuskularstrahlung ist, die in der Hauptsache aus Protonen und Heliumkernen besteht (vgl. 3).

e) Die Lebedewsche Wellenskala

Weite Teile der Physik lassen sich einheitlich als Wellenbewegung beschreiben. Der russische Physiker *Lebedew* (1866 bis 1911) hat diese Gebiete, nach der Wellenlänge geordnet, grafisch dargestellt. Er benutzt dabei eine Skala, die nach Potenzen fort-

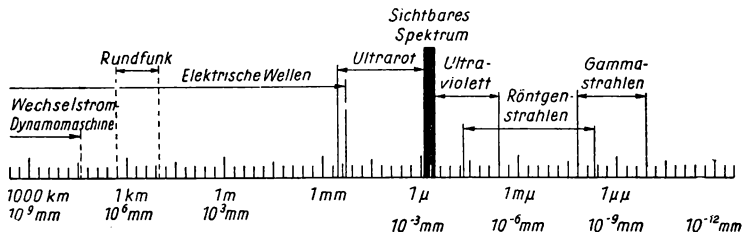


Bild 366. Die Wellenskala

schreitet, jedes folgende Teilstück bedeutet die Oktave des vorhergehenden. Grundzahl sei 1 mm, 10 Teilpunkte von hier nach links liegt der Wert $2^{10} = 1024 \text{ mm} \approx 1 \text{ m}$, 10 Teilpunkte nach rechts $\frac{1}{1024} \text{ mm} \approx 1 \mu$ usw. (Bild 366).

2. Die Gesetze der Temperaturstrahlung

a) Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz

Jede Strahlung ist eine Übertragung von Energie. Um eine Strahlung auszulösen, ist meist eine vorherige Zufuhr von Energie notwendig. Erwärmte Körper senden unsichtbare, infrarote Strahlen aus, bei 540°C beginnt die Rotglut, die Strahlung rückt bis in den sichtbaren Teil des Spektrums. Bei 750°C ist die Rotglut voll entwickelt, bei 1200°C beginnt die Weißglut. Die Strahlung umfaßt

jetzt das gesamte sichtbare Spektrum. In der Wärmelehre ist bereits gezeigt worden, daß von den angestrahlten Körpern ein Teil der Energie wieder zurückgestrahlt, also reflektiert wird.

Ein Körper, der alle Strahlen absorbiert, heißt ein *absolut schwarzer Körper*. Ein solcher Körper läßt sich annähernd durch eine innen geschwärzte Hohlkugel mit kleiner Öffnung realisieren (Bild 367).

Kirchhoff (1824 bis 1887) nennt den absorbierten Teil der Strahlungsenergie A , den ausgesandten Teil E .

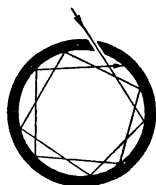


Bild 367
Strahlenverlauf in
der Hohlkugel

$$\text{Kirchhoffs Strahlungsgesetz: } E = k A$$

Das Emissionsvermögen eines Körpers für eine bestimmte Wellenlänge ist dem Absorptionsvermögen proportional.

Für den absolut schwarzen Körper ist $A = 1$, $k = E$.

b) Die Gesetze von Wien und Stefan-Boltzmann

Über die Verteilung der ausgestrahlten Energie über das Spektrum gibt das Wiensche Verschiebungsgesetz Aufschluß,

$$\text{Wiensches Verschiebungsgesetz: } \lambda_{\max} = \frac{C}{T}$$

$$C = 0,2898 \text{ cm} \cdot \text{Grad}$$

Die Wellenlänge des *Strahlungsmaximums* ist der absoluten Temperatur umgekehrt proportional (Bild 368).

Kennt man für eine strahlende Fläche die Lage des Maximums $\lambda_{\max}$, so kann man die Temperatur berechnen. Diese Rechnung ergibt für die Oberflächentemperatur der Sonne etwa 5600°C . Aufschluß über die *Strahlungsenergie* gibt ein Gesetz, das *Stefan* (1835 bis 1893) experimentell und *Boltzmann* (1844 bis 1906) theoretisch gefunden hat.

Gesetz von Stefan und Boltzmann:

$$E = c T^4; \quad c = 1,36 \cdot 10^{-12} \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Grad}^4}$$

Mit steigender Temperatur wächst die gestrahlte Energie gewaltig an, bei 546°C z. B. beträgt die Energie das 81fache der bei 0°C

gestrahlt, denn 546°C sind 819°K , gleich $3 \cdot 273^{\circ}\text{K}$. In der Glühlampentechnik bringt jede kleine Temperatursteigerung im Glühfaden eine Vervielfachung der Energieausbeute.

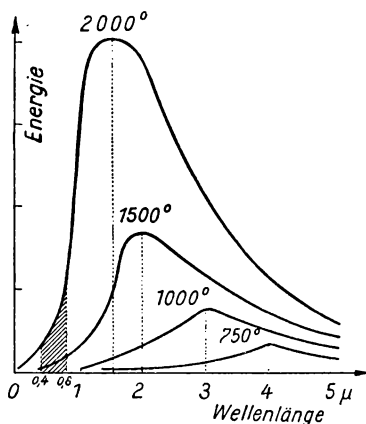


Bild 368. Abhängigkeit des Strahlungsmaximums von der absoluten Temperatur

c) Die Plancksche Formel

Die regelmäßige Form der Energieverteilungskurven legte den Gedanken nahe, daß diese Kurven eine allgemeine Gesetzmäßigkeit enthalten, die sich formelmäßig ausdrücken läßt. Die Auffindung dieser Formel gelang *Max Planck* (1900) durch die völlig neue, grundlegende Annahme, daß auch die Energie atomartige Struktur hat und nur in ganzzahligen Vielfachen eines Elementarquantums ausgestrahlt werden kann. Aber diese Energiequanten sind nicht gleich, sondern abhängig von der Schwingungszahl ν der Strahlung.

Energiequantum $\varepsilon = h\nu$; $h = 6,623 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$

ε ist die elementare Energiemenge, h das *Plancksche Wirkungsquantum*, ν die Schwingungszahl der Strahlung.

Die große Bedeutung der Planckschen Formel besteht in der völligen Wandlung der Grundanschauungen, in der Feststellung, daß

auch die Energie in kleinsten Teilchen übertragen wird. Energie ist Arbeit. Die klassische Mechanik hat die Energie als stetig angenommen. Zu einer beliebig kleinen Änderung von Kraft und Weg gehört nach der klassischen Mechanik auch eine entsprechend kleine Änderung der Energie. Die Quantentheorie kennt keine stetigen Übergänge, nach *Planck* ist auch die Energie aus kleinsten Wirkungsquanten aufgebaut. Nur die große Zahl und die Winzigkeit der Einzelbeträge täuscht im großen eine Stetigkeit der Übergänge vor. Die Plancksche Annahme hat sich vor allem in der Atomforschung glänzend bewährt und zu völlig neuen Ergebnissen geführt, so daß an ihrer Richtigkeit heute kein Zweifel mehr besteht.

Aus der Planckschen *Quantentheorie* folgt, daß auch das Licht in kleinsten Quanten zugestrahlt wird. Man hat diese Lichtquanten *Photonen* genannt. Die Photonen unterscheiden sich von den Atomen und Elektronen dadurch, daß sie nicht gleichartig sind. Photonen violetten Lichts sind energiereicher als Photonen roten Lichts. Damit wird zugleich die Wellennatur des Lichts erneut in Frage gestellt, die Photonen ähneln den Lichtkorpuskeln *Newtons*. Interferenz und Beugung sind aber mit der Annahme einer korpuskularen Strahlung zunächst unvereinbar.

Die Energiequantelung des Lichtes zeigt der *Compton-Effekt*. Er besteht im folgenden physikalischen Vorgang: Ein Röntgenlichtquant, das wegen der höheren Schwingungszahl eine 10 000mal so große Energie hat als ein Quant des sichtbaren Lichtes, stößt gegen ein Elektron. Das Elektron wird nach den Gesetzen des elastischen Stoßes abgelenkt, ebenso das auftreffende Röntgenlichtquant. Dabei geht ein Teil der Energie vom Lichtquant auf das Elektron über. Der Energieverlust des Lichtquants äußert sich in einer größeren Wellenlänge oder, was dasselbe ist, in einer geringeren Frequenz der Streustrahlung.

B. Bau der Molekeln und Atome

1. Die kinetische Gastheorie

a) Grundgedanke der kinetischen Gastheorie

Zur Erklärung der Gesetze ruhender und strömender Flüssigkeiten und Gase genügt es, die Molekeln sich als elastische Körper vorzustellen. Unter dieser Grundannahme haben *Clausius* (1822 bis

1888) und Boltzmann (1844 bis 1906) die kinetische Gastheorie ausgebaut.

Nach dieser Theorie entsteht der Druck der Gase durch die Summe der Einzelstöße bewegter Molekeln gegen die Gefäßwand. Mit steigender Temperatur nimmt die Geschwindigkeit der Molekeln zu; die Zusammenstöße untereinander und die Stöße gegen die Wände werden häufiger. Die Grundgesetze, wie das Boyle-Mariottesche Gesetz, ergeben sich als statistische Gesetze.

b) Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

Die völlig unregelmäßige Bewegung der Molekeln läßt sich als Bewegung parallel zu den 3 Kanten eines Würfels von der Kantenlänge a beschreiben. v sei die Geschwindigkeit, V das Volumen.

Jede Wand erhält in der Sekunde $\frac{v}{2a}$ Stöße, da die Molekel zwischen je zwei Stößen auf die gleiche Wand den Weg $2a$ zurücklegt und der Weg in 1 s v cm beträgt. Die Geschwindigkeit der stoßenden Molekeln nimmt an der Wand von v auf Null ab. Der Stoß ist aber elastisch, also erhält jede Molekel den Impuls durch die Wand zurück. Die Bewegungsgröße ändert sich beim elastischen Stoß (vgl. S. 37) um $2mv$, bei $\frac{v}{2a}$ Stößen um $2mv \cdot \frac{v}{2a} = \frac{mv^2}{a}$.

n sei die Anzahl der Molekeln. In jeder Kantenrichtung bewegen sich $\frac{n}{3}$ Molekeln. Nimmt man die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ an, dann ist die Kraft auf eine Wandfläche $\frac{n}{3} \cdot \frac{mv^2}{a} = P$, wobei P die Kraft auf die Fläche a^2 bedeutet.

Der Druck auf die Flächeneinheit ist $p = \frac{P}{a^2} = \frac{nmv^2}{3a^3}$ und $V = a^3$.

Grundgleichung der Gastheorie: $pV = \frac{nmv^2}{3}$

Der Gesamtimpuls auf eine Fläche ist die Summe der Einzelimpulse.

$$P = \frac{1}{3} \left(\frac{mv_1^2}{a} + \frac{mv_2^2}{a} + \frac{mv_3^2}{a} + \dots \right) = \frac{m}{3a} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots)$$

Dieser Impuls ist nach den obigen Annahmen auch $\frac{nmv^2}{3a}$.

$$v^2 = \frac{1}{n} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots)$$

v^2 nennt man *das mittlere Geschwindigkeitsquadrat*, daraus folgt für die *mittlere quadratische Geschwindigkeit*:

$$v = \sqrt{\frac{1}{n} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots)}$$

Die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v} = \frac{1}{n} (v_1 + v_2 + v_3 + \dots)$ ist nach *Maxwell* 0,921mal der mittleren quadratischen Geschwindigkeit

$$\bar{v} = 0,921 v$$

n Molekeln von der Masse m ergeben die Gesamtmasse M im Volumen V .

$$\text{Aus } pV = \frac{nmv^2}{3} \quad \text{folgt} \quad v = \sqrt{\frac{3pV}{M}}$$

Aus dieser Formel ergibt sich für

die mittlere Geschwindigkeit der Luftmolekeln bei 0° C 447 m/s,

die mittlere Geschwindigkeit der Wasserstoff-
molekeln

bei 0° C 1492 m/s,

die mittlere Geschwindigkeit der Sauerstoff-
molekeln

bei 0° C 461 m/s.

$\frac{M}{V} = \rho$ ist die Gasdichte, also ist bei gleichem Druck und gleicher Temperatur $v_1 : v_2 = \bar{v}_1 : \bar{v}_2 = \sqrt{\rho_2} : \sqrt{\rho_1}$.

Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur verhalten sich die mittleren Geschwindigkeiten zweier Gase umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Gasdichten.

e) Folgerungen aus der Grundgleichung

Aus der Grundgleichung folgt für die Gasdrücke bei 0° C und bei $t^\circ \text{C}$:

$$p_0 = \frac{M v_0^2}{3V}, \quad p_t = \frac{M v_t^2}{3V}$$

Durch Einsetzen in die Gleichung

$$p_t = p_0 (1 + \gamma t)$$

$$\frac{M v_t^2}{3V} = \frac{M v_0^2}{3V} (1 + \gamma t); \quad v^2 = v_0^2 (1 + \gamma t)$$

Der absolute Nullpunkt ($-273,2^\circ \text{C}$) ist die Temperatur, bei der die mittlere quadratische Molekulargeschwindigkeit Null wird. Die absoluten Temperaturen des gleichen Gases sind den mittleren Geschwindigkeitsquadraten proportional:

$$T : T_0 = v_t^2 : v_0^2$$

Für konstantes v^2 , also für konstante Temperatur, folgt aus der Grundgleichung das Mariottesche Gesetz: pV ist konstant (S. 100).

Durch Einsetzen von $v_t^2 = \frac{T}{T_0} v_0^2$ in die Gleichung $p_t = \frac{M v_t^2}{3V}$ ergibt sich $\frac{pV}{T} = \frac{1}{3} \frac{M v_0^2}{T_0} = R$, die Zustandsgleichung der idealen Gase.

$R = \frac{p_0 V_0}{T_0}$ heißt die *universelle Gaskonstante*, wenn V_0 das Molvolumen bedeutet.

$$R = 0,848 \frac{\text{kpm}}{\text{Grad} \cdot \text{Mol}}$$

In der Nähe des Kondensationspunktes zeigen die Gase Abweichungen von der Zustandsgleichung. Je dichter das Gas und je häufiger die Zusammenstöße werden, um so mehr macht sich bemerkbar, daß nicht das Volumen V , sondern nur der um das Molekelvolumen b verminderte Raum für die Bewegung der Molekeln zur Verfügung steht.

Diese Korrektur enthält die von *van der Waals* aufgestellte

$$\text{Zustandsgleichung der realen Gase: } \left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = R T$$

a und b sind für jedes Gas besondere Konstanten.

1 cm^3 eines Gases enthält im Normalzustand

$$N = 27 \cdot 10^{18} \text{ Molekeln};$$

1 Mol eines Gases enthält $6,02 \cdot 10^{23}$ Molekeln. *Loschmidtsche Zahl*. Der Durchmesser einer Wasserstoffmolekel beträgt nach der Gastheorie $\approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$.

Die zwischen zwei Zusammenstößen zurückgelegte Strecke, die *freie Weglänge*, ist $0,000\,02\text{ cm}$; das entspricht der Wellenlänge der ultravioletten Strahlung.

Als Masse des Wasserstoffatoms ergibt sich $1,67 \cdot 10^{-24}\text{ g}$.

2. Energie und Masse auf Grund des Relativitätsprinzips

a) Das Dopplersche Prinzip

Das Dopplersche Prinzip gilt für jede Wellenbewegung, also auch für das Licht. So wie der Ton bei Annäherung der Schallquelle höher wird, muß sich bei Annäherung einer Lichtquelle eine Verschiebung der Spektrallinien nach dem violetten Ende des Spektrums zeigen, bei Entfernung nach dem Rot zu. Bei irdischen Lichtquellen hat man diese Verschiebung nur für sehr schnell bewegte Ionen bei Kanalstrahlen nachweisen können. In der Astrophysik gibt die Verschiebung der Spektrallinien die Möglichkeit, die Relativgeschwindigkeit zwischen Erde und Gestirn zu bestimmen.

b) Das Relativitätsprinzip

Nach dem Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik müßte die Lichtgeschwindigkeit höhere Werte ergeben, wenn sie in der Richtung der Erdbahn ($v = 30\text{ km/s} = 0,1\text{‰}$ der Lichtgeschwindigkeit) gemessen wird im Vergleich zu dem Meßergebnis in einer

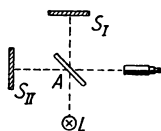


Bild 369. Schematische Darstellung des Michelson-Versuchs

Richtung, die senkrecht dazu steht. *Michelson* (1853 bis 1931) und *Morley* haben diesen Unterschied durch äußerst exakte Messungen zu bestimmen versucht, indem sie einen Lichtstrahl durch eine unter 45° geneigte Glasplatte hindurch zum Teil in der Richtung der Erdbahn, durch Reflexion an der Glasplatte zum Teil in der Richtung senkrecht dazu hin und her haben gehen lassen. Eine Schwenkung des Apparates

um 90° hätte eine Verschiebung des Interferenzbildes ergeben müssen. Trotz größter Exaktheit ist das Ergebnis der Versuche stets negativ gewesen (Bild 369).

Der *Michelson*-Versuch steht im Widerspruch zum Dopplerschen Prinzip, zur Aberration des Lichts (vgl. S. 124) und zu anderen astronomischen Messungen.

*Einstein*¹ suchte den Widerspruch durch das Prinzip der *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* zu lösen. Nach *Einstein* ist die Lichtgeschwindigkeit die größte überhaupt mögliche Geschwindigkeit, sie kann durch Hinzufügen einer kleineren Geschwindigkeit infolge einer Relativbewegung nicht verändert werden. Daraus ergeben sich Folgerungen, die an die Grundlagen unserer bisherigen Meßtechnik rühren.

Aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit folgert *Einstein*: Raum und Zeit sind nichts Absolutes, sondern hängen von der Relativbewegung des Beobachters zum Objekt ab. Ein in Richtung der Erdbewegung liegender Maßstab verkürzt sich im Verhältnis

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (\text{Lorentz-Kontraktion}).$$

Eine von einem bewegten Beobachter ausgeführte Zeitmessung muß anders ausfallen als die Messung des gleichen Vorgangs durch einen ruhenden Beobachter. Für irdische Geschwindigkeiten sind diese Unterschiede im Meßergebnis so gering, daß sie nicht ins Gewicht fallen. Der Erddurchmesser würde sich z. B. in der Bewegungsrichtung nur um 6,3 cm verkürzen.

Die Gesetze der klassischen Mechanik und der Technik behalten alle ihre volle Gültigkeit, solange nicht Geschwindigkeiten auftreten, die mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar sind. Dieser Fall tritt bei astronomischen Messungen und bei Messungen in der Atomforschung auf. In diesen beiden Gebieten hat sich die Relativitätstheorie so bewährt, daß sie zur Grundlage aller Rechnungen gemacht wird.

c) Folgerungen aus dem Relativitätsprinzip: Masse und Energie

Aus der Einsteinschen Theorie folgt, daß die Masse von der Geschwindigkeit abhängt, sie nimmt mit wachsender Geschwindigkeit zu und wird bei Lichtgeschwindigkeit unmeßbar groß.

$$\text{Masse } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m_0 heißt die *Ruhmasse*.

¹ *Albert Einstein*, geb. 1879, Professor der Physik in Zürich, dann in Berlin, gest. 1955 in USA.

Jede Masse ist mit einem bestimmten Energiebetrag verknüpft, der gegeben ist durch die Beziehung

$$E = mc^2$$

Ein mit der Geschwindigkeit v bewegter Körper hat demnach die

$$\text{Energie } E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ und den Impuls } mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Die Lichtenergie der Photonen ist $\epsilon = h\nu$, also muß auch den Photonen eine Masse zugestanden werden, $mc^2 = h\nu$ und $m = \frac{h\nu}{c^2}$, und jedem Massenteilchen eine Schwingungszahl, $\nu = \frac{mc^2}{h}$, sowie ein Impuls $P = mv = \frac{h\nu}{c}$, da für Photonen $v = c$ ist.

Aus der Grundgleichung der Wellenlehre folgt weiter:

$$c = \nu \lambda \quad \text{und} \quad \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}, \quad \text{also} \quad P = \frac{h}{\lambda}$$

Licht übt einen *Strahlungsdruck* aus, dessen Betrag von der Wellenlänge abhängt.

3. Der Atombau

a) Balmer's Serienformel

Aus den Untersuchungen *Balmers* (1825 bis 1898) über die Anordnung der Spektrallinien des Wasserstoffs ergibt sich zunächst rein empirisch die erweiterte

$$\text{Serienformel: } \nu = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

ν ist die Schwingungszahl, R die *Rydberg-Konstante*, benannt nach dem schwedischen Physiker *Rydberg*, Z die Ordnungszahl des Elements. Die Größen n und m sind ganze Zahlen, durch deren Wahl sich die einzelnen Linien ergeben. In dieser Formel hat die Konstante R den Wert $3,29 \cdot 10^{15}$.

b) Das Atommodell von Rutherford

Der englische Physiker *Rutherford* (1872 bis 1937) ist auf Grund seiner Forschungen über die radioaktive Strahlung und die damit verbundenen Beschießungen von Atomen mit α - und β -Strahlen zu folgender Vorstellung über den Aufbau des Atoms gelangt: Jedes Atom stellt ein Planetensystem im kleinen vor. Fast die gesamte Masse des Atoms ist in dem winzigen Kern gebunden. Um diesen Kern kreisen als Planeten die Elektronen. Der positiv geladene Wasserstoffkern hat den Namen *Proton*, um ihn kreist ein Elektron. Die Masse eines Elektrons beträgt etwa $\frac{1}{1850}$ der Protonenmasse und ist deshalb für das Atomgewicht nicht ausschlaggebend.

Die Kernladungszahl bestimmt die Stellung des Elements
im periodischen System

Das Atommodell *Rutherfords* löst das Atom in ein System von Planeten auf, die durch elektrische Kräfte zusammengehalten werden. Der *Radius der Elektronenbahn* des Wasserstoffatoms wird zu $5,3 \cdot 10^{-9}$ cm berechnet, der Kerndurchmesser hat die Größenordnung 10^{-12} cm, der Durchmesser des Elektrons beträgt $3 \cdot 10^{-12}$ cm. Denkt man sich diese Zahlen im Maßstab 1 Billion zu 1 vergrößert, so ergibt sich ein Kernhalbmesser von 0,5 cm. Um diesen Kern kreist in 53 m Entfernung eine Kugel mit einem Radius von 1,5 cm. Im Verhältnis zu den winzigen Massen ist der stofffreie Raum sehr groß.

Masse des Protons $1,67 \cdot 10^{-24}$ g
 Masse des Elektrons $\approx \frac{1}{1850}$ des Protons $= 9,11 \cdot 10^{-28}$ g
 Ladung des Elektrons = elektrisches Elementarquantum
 $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

c) Das Atommodell von Bohr

Das Atommodell von *Rutherford* gestattet keine Erklärung der Lichtaussendung. Die kreisende Bewegung des Elektrons um den Kern (Schwingung) kann nicht Ursache der Lichtaussendung sein, sonst müßte bei der Lichtemission, also einer Energieabgabe, das Elektron allmählich in den Kern hineingezogen werden. Das Atom ist aber nach der Lichtaussendung unverändert.

Um auch die Lichtemission erklären zu können, hat *Niels Bohr*¹ folgende Hypothesen aufgestellt, die später dadurch bestätigt worden sind, daß die aus diesen Annahmen errechneten Ergebnisse mit dem experimentellen Befund gut übereinstimmen.

Das Elektron umkreist den Kern nur auf bestimmten Bahnen (Quantenbahnen), Energiezufuhr treibt das Elektron auf eine entferntere Bahn, Energieabgabe ist verbunden mit dem Zurückfallen auf eine kernnähere Bahn. Auch hierbei finden keine stetigen Übergänge statt, anders als bei der Planetenbewegung. Die Licht-

aussendung geschieht in bestimmten Quanten, $\nu = \frac{\varepsilon}{h}$.

Bohr nahm für die Elektronen zunächst Kreisbahnen an. Der Münchner Physiker *A. Sommerfeld* (1868 bis 1951) vervollkommnete die Theorie durch folgende Annahme:

Die Elektronenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt der Kern als Zentralkörper steht. Die Bahnen wechseln in ihrer Lage und können auch Kreisform annehmen.

Die *Bohrsche Theorie* liefert im Gegensatz zu der *Rutherfords* auch für andere Atome als Wasserstoff und Helium vollkommen zutreffende Bilder, sie gibt aber keine Hinweise für die Wahrscheinlichkeit, mit der der Übergang des Elektrons von einer Bahn zu einer bestimmten anderen vor sich geht.

d) Atomkern und Hülle

Der sowjetische Forscher *D. D. Iwanenko*² hat als erster ausgesprochen, daß die Atomkerne aus Protonen und Neutronen bestehen. Das *Neutron* hat nahezu die gleiche Masse wie das Proton, ist aber elektrisch neutral. Beide Kernbestandteile hat man unter dem

¹ Professor der Physik in Kopenhagen, geb. 1885.

² Professor der Physik in Moskau, geb. 1904.

e) Weitere Elementarbausteine

Bei der Untersuchung der kosmischen Strahlung ist man auf ein weiteres Elementarteilchen gestoßen. 1932 wurde von *Anderson*¹ das *Positron* entdeckt. Es ist ein positiv geladenes Teilchen mit der gleichen Masse wie das Elektron. Das Positron ist nur von kurzer Lebensdauer, weil es sofort eine neue Bindung eingeht. In der kosmischen Strahlung treten Elektronen und Positronen paarweise auf und verschwinden ebenso wieder durch Umwandlung in Quanten der γ -Strahlung. Es kann sich also Stoff in elektromagnetische Strahlen verwandeln.

In der kosmischen Strahlung sind noch weitere Elementarbausteine gefunden worden, die *Mesonen*². Die Mesonen haben meist die 200- bis 500fache Masse des Elektrons. Man hat positive und negative Mesonen beobachtet. Auch die Lebensdauer des Mesons ist gering. Die Mesonen entstehen erst in der Erdatmosphäre durch Zusammenstoß der primären kosmischen Strahlen mit Atomen der obersten Luftschichten. Die primäre Strahlung besteht vermutlich aus Protonen und Heliumkernen, die infolge ihrer hohen Energie Atomzertrümmerungen in den obersten Schichten der Atmosphäre herbeiführen (kosmische Schauer).

Beim Zerfall der Mesonen tritt noch ein weiteres Teilchen auf, das *Neutrino*, das elektrisch neutral und deshalb direkt nicht nachweisbar ist. Man schließt auf Grund der Energiebilanz bei diesen Umwandlungsvorgängen auf seine Existenz. Die Neutrinos sind Energiestrahlen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen und wie die Photonen keine Ruhmasse haben.

4. Hilfsmittel zur Untersuchung von Atomkernen

Wir haben zwei Gruppen von Apparaturen zu trennen; die erste dient zur Beschleunigung geladener Teilchen, die dann als Geschosse bei Kernreaktionen Verwendung finden. Die zweite Gruppe wird zum Nachweis für das Vorhandensein geladener Teilchen verwendet. Die natürlichen radioaktiven Stoffe liefern α -Teilchen von verhältnismäßig geringer Energie. Die Wahrscheinlichkeit, daß diese

¹ Ch. D. Anderson, geb. 1905, Nobelpreis 1936.

² méson, griech., das Mittlere.

eine Kernreaktion auslösen, ist gering. Man arbeitet deshalb mit künstlich beschleunigten Teilchen.

1. Die *Greinacher-Schaltung* dient zur Gewinnung hoher Gleichspannung (Bild 370). Zwei Gruppen hintereinandergeschalteter Kondensatoren sind durch Ventiltröhen miteinander verbunden, die negative Ladung nur in der Pfeilrichtung durchlassen. Die Kondensatoren laden sich dadurch so auf, daß die oberen Platten positiv werden. Wenn die Eingangsspannung V_0^* beträgt, kann zwischen den Punkten A und E die 6fache Spannung abgenommen werden.

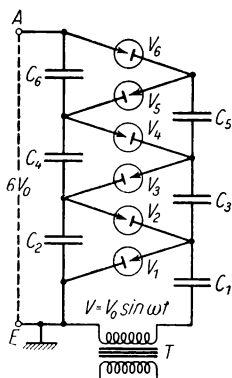


Bild 370. Kaskadenschaltung

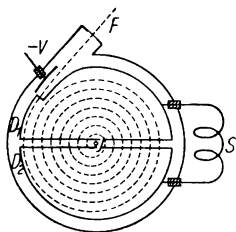


Bild 371. Prinzip des Zyklotrons

2. Der *Hochspannungsgenerator* von *van de Graaff* liefert in großtechnischer Ausführung bis zu 10 Millionen Volt (vgl. V. B 4).

3. Das *Zyklotron* dient zur Vielfachbeschleunigung von Ionen. Es besteht aus einem großen Elektromagnet, der zwischen den Polschuhen eine flache, zylindrische Vakuumkammer enthält. In ihr liegt eine Kapsel, die diametral in zwei gegeneinander isolierte Teile, die Duanten, geteilt ist. In der Mitte befindet sich die Ionenquelle (Bild 371). An den Duanten liegt eine Wechselspannung von 50 000 bis 100 000 Volt. Der Duant D_2 zieht das bei J entstehende Ion an, und das Magnetfeld zwingt es in eine Kreisbahn.

Die Frequenz ist so geregelt, daß das Ion in dem Augenblick, in dem es den Spalt erreicht, den anderen Duanten in der gleichen Aufladung vorfindet. Dort wird es beschleunigt. Der Radius der Kreisbahnen nimmt stetig zu, die Bahn wird zur Spirale. Am Ende der

Bahn wird das Ion durch die Ablenkplatte (V) gegen das Fenster (F) gelenkt, durch das es an das Versuchsobjekt gelangt.

4. Das *Betatron* beruht auf der Wirkung magnetischer Wirbelfelder, es dient in erster Linie zur Beschleunigung von Elektronen. Das Prinzip entspricht dem des Transformators. An die Stelle der Sekundärspule tritt ein kreisförmiges, evakuiertes Rohr, das in einem Spalt des Transformator-kernes gelagert ist. Während das Feld anwächst, wird ein im Rohr befindliches Elektron in eine Kreisbahn gezwungen. Der Beschleunigungsprozeß ist in 1 Viertelperiode des Wechselstromes beendet ($\frac{1}{2000}$ Sekunde). Das Gerät arbeitet stoßweise. Die Elektronen erhalten im Gerät Geschwindigkeiten, die der Lichtgeschwindigkeit nur wenig nachstehen.

Zur Gruppe der Geräte zum Nachweis geladener Teilchen gehören 1. die *Wilsonkammer* (Bild 372). Der Beobachtungsraum (B), dessen Wände aus Glas bestehen, enthält mit Wasserdampf gesättigte Luft. Er ist unten durch einen Kolben (K) verschlossen. Wenn dieser

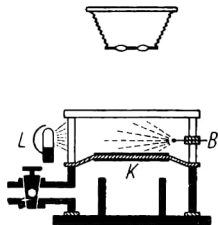


Bild 372
Prinzip der Wilsonkammer

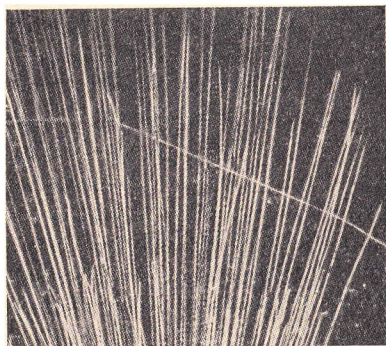


Bild 373. Nebelkammeraufnahme; Zusammenstoß eines α -Teilchens mit einem Stickstoffatom

sich abwärts bewegt, kühlt sich die Luft bei dieser adiabatischen Expansion ab, und es entstehen Nebeltröpfchen, die sich an den durch den Raum fliegenden Ionen, die als Kondensationskerne wirken, niederschlagen. Die so entstehende Nebelspur wird mit der Stereokamera aufgenommen. Auf dem Stereobild kann man Lage, Krümmung und Reichweite ausmessen. Bild 373 zeigt den Zu-

sammenstoß eines α -Teilchens mit einem Stickstoffatom nach einer Nebelkammeraufnahme;

2. das Zählrohr nach Geiger und Müller.

Es besteht aus einem Glasrohr mit Metallbelag und der Zählelektrode in Form eines dünnen, axial verlaufenden Drahtes (Bild 374). Zwischen Rohrwand und Draht liegt eine Spannung. Das Rohr ist mit Gas gefüllt. Dringt ein geladenes Teilchen in das Rohr ein, so wird das Gas ionisiert. Es entsteht ein Ionenstoß, der durch ein Elektrometer oder ein Zählwerk registriert wird.

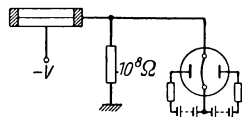


Bild 374
Zählrohr mit Elektrometer

5. Kernreaktionen und künstliche Radioaktivität

Die Energie schneller geladener Teilchen mißt man in *Elektronenvolt* (eV).

1 Elektronenvolt ist die Energie, die ein mit der Elementarladung geladenes Teilchen erhält, wenn es die Spannung 1 Volt durchläuft.

1 Megaelektronenvolt (MeV) = 10^6 eV

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

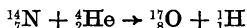
$$1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-6} \text{ erg}$$

Im Bild 373 zeigt der Knick in der Spur des α -Teilchens, daß hier ein Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen (mit einem Stickstoffatom) stattgefunden hat. Dabei bestehen zwei Möglichkeiten: 1. Der Stoß ist vollkommen elastisch. Dann entsteht eine Nebelspur, die in einer Verzweigung endet. Die Auswertung des Stereobildes zeigt die Gültigkeit der Erhaltungssätze.

2. Andere gegabelte Bahnen erfüllen die Gesetze des elastischen Stoßes nicht. Die nähere Untersuchung und Berechnung ergibt z. B. folgenden Vorgang: Die gegabelte Bahn zeigt ein Proton mit der Ladung 1 und einen Sauerstoffkern mit der Ladung 8. Vor dem Stoß hatte das α -Teilchen die Ladung 1, der Stickstoffkern die Ladung 7. Es hat eine Kernumwandlung stattgefunden.

In der Reaktionsgleichung schreibt man an das chemische Symbol oben die Massenzahl, unten die Zahl der Ladungen (Ordnungszahl).

Unsere Reaktion läßt sich dann durch folgende Beziehung darstellen:

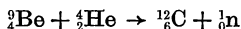


Der normale Sauerstoff hat das Symbol ${}^{16}_8\text{O}$. Hier tritt ein Sauerstoffatom auf, dessen Massenzahl um 1 höher ist als normal.

Man bezeichnet Elemente, die die gleiche Ordnungszahl und damit das gleiche chemische Verhalten haben, aber verschiedene Massenzahlen, als *Isotope*.

Im normalen Sauerstoff ist das seltene Isotop ${}^{17}_8\text{O}$ nur mit 0,04 % vertreten.

*Chadwick*¹ hat 1932 bei der Beschießung von Beryllium mit α -Strahlen freie Neutronen erhalten. Die Reaktionsgleichung lautet:



Das Neutron mit der Masse 1 und der Ladung 0 hat das Symbol ${}^1_0\text{n}$. Bei diesen Umwandlungen treten oft instabile Kerne auf, die wie ein radioaktiver Kern weiter zerfallen. Derartige instabile Kerne hat das Ehepaar *Joliot-Curie*² 1939 zuerst beobachtet. Man bezeichnet diese Kerne als künstlich radioaktiv. Ein *künstlich radioaktives Atom* verwandelt sich immer in ein stabiles Atom mit der gleichen Ordnungszahl. Die radioaktiven Isotope spielen heute in der Forschung und Technik bereits eine große Rolle.

Von der *Kernumwandlung*, die meist auf Nachbarelemente führt, ist die *Kernspaltung* zu trennen, die 1939 den deutschen Forschern *Hahn*³ und *Straßmann* gelungen ist. Sie fanden, daß ein Urankern, der von einem Neutron getroffen wird, u. U. in zwei nahezu gleiche Teile zerfällt und dabei noch einige Neutronen aussendet.

Diese Neutronen können unter günstigen Umständen weitere gleichartige Reaktionen auslösen, die dann lawinenartig anwachsen und große Energiebeträge freistellen.

Schon bei den Kernumwandlungsversuchen war man auf instabile Elemente gestoßen, deren Ordnungszahl höher als 92 war, die *Transurane*. *Hahn*, *Straßmann* und *Meitner* entdeckten 1936 ein

¹ *J. Chadwick* (spr. Schädwick) geb. 1891, Nobelpreis 1935.

² *F. Joliot*, geb. 1900, und *J. Joliot-Curie*, 1897 bis 1956, frz. Forscherehepaar. *F. Joliot* ist der bekannte französische Friedenskämpfer.

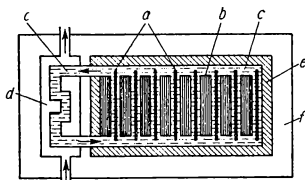
³ *O. Hahn*, geb. 1879, Professor in Göttingen, Nobelpreis 1944. *L. Meitner* und *F. Straßmann* seine Mitarbeiter.

Element mit der Massenzahl 239 und der Ordnungszahl 93, das *Neptunium* (Np). Ein weiteres Transuran ist das *Plutonium* $^{239}_{94}\text{Pu}$. Das Uranisotop $^{235}_{92}\text{U}$ und das Plutonium $^{239}_{94}\text{Pu}$ lassen sich von langsamen Neutronen spalten. Sie stellen einen Explosivstoff dar, der alle bisher bekannten Sprengstoffe übertrifft. Im 2. Weltkrieg wurden in den USA diese beiden Spaltstoffe in großtechnischen Anlagen hergestellt und zur Atombombenkonstruktion mißbraucht. Gewöhnliches Uran besteht aus den Isotopen $^{238}_{92}\text{U}$ und $^{235}_{92}\text{U}$ im Mischungsverhältnis 140 : 1. Hier tritt keine Kettenreaktion auf, weil die langsamen Neutronen von den $^{238}_{92}\text{U}$ -Kernen absorbiert werden und so für den Spaltprozeß verlorengehen.

6. Anwendung der Atomenergie

a) Atomreaktoren

Um die bei der Uranspaltung frei werdende Energie für friedliche Zwecke verwenden zu können, ist es nötig, die Kettenreaktion in regulierbaren Grenzen zu halten. In den Atomreaktoren (Uranbrennern) lagert man Stangen aus reinem Uranmetall in einem Graphitblock. Der Kohlenstoff des Graphits verlangsamt die Neutronen und macht sie für die Spaltung der im Uran enthaltenen Atome U 235 geeignet. Der Spaltprozeß kommt dann auch im natürlichen Uran nicht zum Erliegen. Zur feineren Regulierung des Spaltprozesses dienen Kadmiumstäbe, die verschieden tief in den Uranbrenner eingeschoben werden können. Die Kadmiumstäbe absorbieren Neutronen und sorgen dafür, daß der Spaltprozeß ein gewünschtes Maß nicht überschreitet und jederzeit wieder zum Stillstand gebracht werden kann. Statt des Graphits wird auch schweres Wasser (D_2O) als Bremssubstanz verwendet. Im Bild 375 ist die Wirkungsweise eines *Dreistoff-Uranbrenners* schematisch dargestellt. Die Uranstangen liegen in Bohrungen eines Graphitblocks und werden von Wasser umspült, das die bei der Uranspaltung entstehende Wärme aufnimmt und an



- a Uranstangen als fester Brennstoff
- b Graphit als Bremsstoff
- c Wasser als Wärmeträger
- d Wärmeaustauscher
- e Reflektor
- f Betonschutzmantel gegen Strahlung

Bild 375. Dreistoff-Uranbrenner

den Wärmeaustauscher weiterleitet. Das im Reaktor radioaktiv verseuchte Wasser darf nicht unmittelbar für den Betrieb einer Turbine oder einer Dampfmaschine verwendet werden. Der Reaktor ist bis zum Wärmeaustauscher von einem dicken Betonmantel umgeben, damit die radioaktiven Strahlen nicht nach außen dringen und das Bedienungspersonal und die übrigen Teile des Kraftwerkes gefährden. Der in der Abbildung mit *e* bezeichnete Metallmantel dient dazu, Neutronen, die hier auftreten, zu reflektieren und so dem

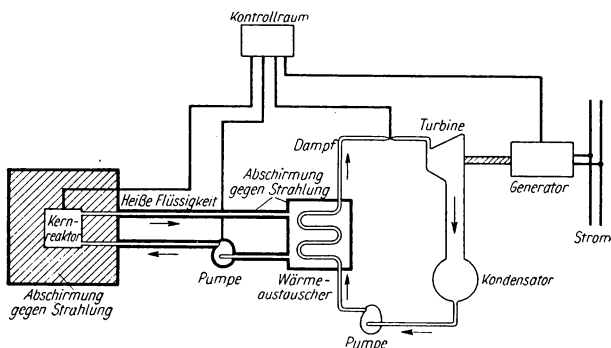


Bild 376. Prinzipaufbau eines Atomkraftwerkes

Spaltprozeß zu erhalten. Die besondere Schwierigkeit bei der Anlage eines Atomkraftwerkes besteht darin, daß der eigentliche Reaktor wegen der gefährlichen Strahlung äußeren Zugriffen unzugänglich ist. Alle Schaltungen zur Steuerung des Spaltprozesses, ebenso notwendige Reparaturen müssen ferngesteuert werden. Bild 376 zeigt schematisch den Aufbau eines Atomkraftwerkes mit Reaktor, Dampfturbine und Generator zur Erzeugung elektrischer Energie. Der im Reaktor zunächst unerwünschte Einfang von Neutronen durch U 238 führt über das instabile Transuran $^{239}_{93}\text{Np}$ unter β -Strahlung zur Bildung des Plutoniums $^{239}_{94}\text{Pu}$. Durch eine vollautomatisch arbeitende Aufbereitung wird das Plutonium vom Uran getrennt. Man hat in ähnlicher Weise wie die Uranreaktoren *Plutoniumreaktoren* konstruiert. Sie haben den Vorzug, einen wesentlich kleineren Raum zu beanspruchen und die Verwendung von

Atomenergie auch in Fahrzeugen möglich zu machen. Die Sowjetunion hat 1957 einen mit Atomenergie betriebenen Eisbrecher in Dienst gestellt.

b) Verwendung künstlich radioaktiver Stoffe

Die bei den Kernumwandlungen entstehenden künstlich radioaktiven Stoffe finden in der medizinischen und in der biologischen Forschung vielfach Anwendung. Die *Indikatormethode* besteht in der Beimischung radioaktiver Isotope zur Tier- und Pflanzennahrung. Mit Zählrohren kann man dann feststellen, welchen Weg die Stoffe im Organismus nehmen, und daraus wichtige Schlüsse ziehen. In der Medizin werden vor allem Radiophosphor ^{32}P und Radiokohlenstoff ^{14}C als Indikatoren angewendet.

In der Chemie hat die Entdeckung der radioaktiven Isotope dazu geführt, die Lücken im periodischen System zu schließen. Das bisher fehlende Element 43 hat nur radioaktive Isotope. Man hat dem Element den Namen *Technetium* gegeben, weil es nur künstlich hergestellt werden kann. Auch das Element 61 ist nicht stabil, es hat den Namen *Promethium* erhalten. Das Element 85, *Astatin* oder *Ekajod*, tritt in mehr als 10 radioaktiven Isotopen auf. Vom Element 87, *Francium*, sind bisher nur Spuren gefunden worden. In der *Materialprüfung* verspricht die Verwendung radioaktiver Stoffe weitere Fortschritte. Dort, wo die Materialprüfung mit Ultraschall oder Röntgenstrahlen wegen der Größe der Werkstücke versagt, setzt man γ -Strahlen radioaktiver Elemente mit Erfolg ein.

7. De Broglie-Wellen

Der französische Physiker *de Broglie* (geb. 1892, theoretischer Physiker in Paris) hat eine neue Erklärung der von *Bohr* gemachten einschränkenden Bedingungen für die möglichen Elektronenbahnen aufgestellt. Er nimmt an (1924), daß die Elektronen sich nur auf den Bahnen bewegen können, deren Umfang ein ganzes Vielfaches der gestrahlten Wellenlänge beträgt, und kommt mit dieser Annahme zu dem gleichen Ergebnis wie *Bohr*. Bei *Bohr* erscheint das Elektron als Stoff-

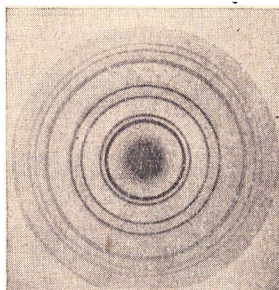


Bild 377. Beugungsringe bei Elektronenstrahlen

teilchen, dem in jedem Augenblick eine bestimmte Stellung auf seiner Bahn zugeschrieben werden muß. *De Broglie* faßt das kreisende Elektron nicht mehr als umlaufendes Teilchen, sondern als stehende Welle auf. Für diese Wellen sind nur die Bahnen möglich, auf denen der Umfang ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge ergibt. Die Existenz des Elektrons als konkretes Teilchen ist durch diese Erklärung in Frage gestellt. An die Stelle des Teilchens, das sich auf einer bestimmten Bahn bewegt, tritt das Störungsfeld einer Welle, die die ganze Bahn erfüllt. Danach müßte jedes rasch bewegte Massenteilchen sich wie eine Welle verhalten. 1927 haben daraufhin die amerikanischen Forscher *Davisson* und *Germer* mit Hilfe von Kathodenstrahlen, also Korpuskeln, Beugungserscheinungen nachweisen können (Bild 369).

Bewegte kleine Massenteilchen verhalten sich wie Wellen

So wie das Licht (die Photonen) Masse und Impuls hat, sind umgekehrt rasch bewegte Stoffteilchen von einer Wellenerscheinung begleitet. Diese Wellen haben eine

$$\text{Wellengeschwindigkeit } u = v \lambda = \frac{\text{Energie}}{\text{Impuls}} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v}$$

Daraus ergibt sich für die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c^2}{v v} = \frac{mc^2}{v m v} = \frac{\varepsilon}{v m v} = \frac{h}{m v}, \text{ da } \varepsilon = v h \text{ ist}$$

Da v stets kleiner als c ist, wird die Wellengeschwindigkeit u größer als die Lichtgeschwindigkeit. Das ist deshalb kein Widerspruch zu *Einsteins* Satz, daß die Lichtgeschwindigkeit die größte überhaupt mögliche Geschwindigkeit ist, weil es sich bei *Einstein* um die Ausbreitung der Lichtenergie handelt, die unserem v entspricht. Der Nachweis, daß rasch bewegte Korpuskeln sich wie Wellen verhalten, hat den Gegensatz, der bis dahin überall in der Physik zutage trat, beseitigt. Auf der einen Seite standen die physikalischen Erscheinungen, die sich nach den *Newtonschen* Bewegungsgesetzen erklären ließen. Diese Erklärungsweise beherrscht die Mechanik, Akustik, Wärmelehre, Teile der Elektrizitätslehre und der Optik.

Die geometrische Optik fußt auf der *Newtonschen* Korpuskulartheorie, die Wellenoptik auf den *Huygensschen* Vorstellungen vom Wesen des Lichtes. Die Grenze beider Deutungsweisen lag dort, wo die Ausdehnung des Bildes in die Größenordnung der zur Abbildung benutzten Wellenlängen rückte.

Jetzt zeigt sich, daß Welle und Koruskel nur zwei verschiedene Beschreibungsformen des gleichen Vorganges sind. Bei makroskopischer Beobachtung gelten die *Newtonschen* Bewegungsgesetze mit den durch die Relativitätstheorie gegebenen Einschränkungen. Die Darstellung als Welle bekommt erst Bedeutung bei Stoffteilchen, die so schnell bewegt sind, daß ihre Geschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar wird.

Der *Dualismus* zwischen Welle und Koruskel ist also nur in unseren Denkformen begründet, er besteht nicht objektiv. Das Licht ist weder eine Welle noch ein rasch bewegtes Photon; vielmehr kann die Erscheinung, die wir Licht nennen, sowohl in der einen wie in der anderen Form beschrieben werden.

Sachverzeichnis

- Absolute Temperatur 99
Achromatische Prismen 135
Adhäsion 23
Adiabate 116
Aerodynamisches Paradoxon 70
Aggregatzustand 1
Akkumulator 172
 α -Strahlen 231, 245
Ampère 157
Ampere (Maßeinheit) 158
Ampèresche Schwimmregel 197
Amperesekunde 158
Amperewindungszahl 200
Amplitude 72
Aneroidbarometer 64
Ängström 2
Ankerformen 212
Anode 168
Anodenstrom 176
Anomalie des Wassers 98
Antrieb 36
Antriebsmoment 212
Aphel 43
Äquivalent, elektrochemisches 170
Aräometer 55
Arbeit 32
Archimedisches Prinzip 54
Astatin 253
Astigmatismus 139
Asynchronmotor 216
Atmosphäre, technische, physikalische 64
Atom 22
Atomkern 243 f.
Atommodell von Bohr 243
— von Rutherford 242
Atomspaltung 250
Atomumwandlung 250
Audionschaltung 227
Auftrieb 54
— in Luft 68
Augenfehler 139
Ausbreitung elektromagnetischer Wellen 224
Ausdehnung durch Wärme 95, 96, 97
Ausflußgesetz (Torricelli) 56
Außenpolmaschine 214
Avogadro, Gesetz von 63
Bahngeschwindigkeit 38
Balmer 241
Barometer 64
Bequerel 231
Beleuchtungsstärke 126
Benetzende Flüssigkeit 61
Bernoulli, Gesetz von 69
 β -Strahlen 231
Betatron 248
Beugung des Lichtes 147 ff.
— von Wellen 82
Beugungsgitter 149
Bewegung, fortschreitende und drehende 42
—, Drehbewegung 38
—, gleichförmige 24
—, gleichmäßig beschleunigte 26
—, ungleichförmige 27
Bewegungen, Zusammensetzung von 28
Bewegungsgröße 36
Bifilar 37
Bildfeldwölbung 139
Bildkonstruktion, Hohlspiegel 131
—, Linsen 137, 138
Biot und Savart, Gesetz von 199
Blätterkondensator 164
Bleiakkumulator 172
Blindwiderstand 221
Bodendruck 51
Bogenmaß 38
Boltzmann, Gesetz von Stefan und Boltzmann 233
Bourdonsche Röhre 64
Boyle-Mariotte, Gesetz von 100
Bradley, Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 124
Braunsche Röhre 176
Brechung durch das Prisma 133, 134
— nach Huygens 81, 82
Brechungsgesetz von Snellius 132
Breemsspektrum 230
Brennweite von Linsen 138
— von Spiegeln 130
de Broglie-Wellen 253
Brückenschaltung 162
Bunsen, Gesetz von Kirchhoff und Bunsen 136
Candela 126
Charakteristik 178
Charakteristische Strahlung 230
Chladnische Klangfiguren 87
Chromatische Abweichung 139

- Compton-Effekt 235
 Clausius 117, 235
 Coulombmeter 171
 Coulombsches Gesetz der Elektrostatik 179
 — — für Magnete 191
 Curie 231
 Dalton, Gesetz von 70, 109
 Dampf, gesättigter und ungesättigter 109
 Dampfdruckkurve 109
 Dampfmaschine 117, 118
 Dampfturbine 119, 120
 Daniell-Element 171
 Dasymeter 66
 Dauermagnete 190
 Deduktive Methode 1
 Dehnungszahl 23
 Deklination 196
 Demodulation 227
 Detektor 227
 Dezimalwaage 20
 Diamagnetische Stoffe 194
 Diaskop 140
 Dichte 34
 —, Änderung mit der Temperatur 102
 Dichtezahlen von Gasen 63
 Dielektrizitätskonstante, absolute 188
 —, relative 189
 Dieselmotor 122
 Diffusion 62
 — von Gasen 70
 Dioptrie 139
 Dipol 224
 Dispersion 134, 135
 Doppelbrechung 153, 154
 Doppel-T-Anker 212
 Dopplersches Prinzip 91
 Dopplers Prinzip der Optik 239
 Drehbewegung 38
 Drehfeld 216
 Drehkondensator 186
 Drehmasse 41
 Drehmoment 14, 40
 Drehspulinstrument 205
 Drehstrom 215
 Dreieckschaltung 216
 Dreiphasenstrom 215
 Dreipolröhre 177
 Druck 50
 Druckdose von Hartl 53
 Druckfestigkeit 23
 Druckhöhe 57
 Druckpumpe 67
 Duanten 247
 Dyn 31
 Dynamometer 7, 191
 Echo 90
 Effekt 33
 Effektivwerte 218
 Ehrenhaft 185
 Eigenspektrum 230
 Einfache Maschinen 16 ff.
 Einstein 240
 Ekajod 253
 Elastische Körper 23
 Elastizitätsmodul 23
 Elektrisches Feld 180, 181
 Elektrolyse 168 ff.
 Elektrolyt 168
 Elektromagnete 201
 Elektromotor 210
 Elektrometer 179
 Elektron, Masse und Ladung 242
 Elektronenröhre 176
 Elektronenvolt 249
 Elektroskop 179
 Elementarmagnete 191
 Elementarquantum, elektrisches 185
 Elemente, galvanische 171 f.
 Elliptische Welle 80
 Elongation 72
 Emissionstheorie des Lichtes 143
 Empfang elektrischer Wellen 226 ff.
 Energie 35
 — (relativistisch) 241
 —, Satz von der Erhaltung 36
 Energieübertragung 216 ff.
 Entropie 117
 Episkop 140
 Erddichte 44
 Erdmasse 44
 Erg 32
 Erregung, dielektrische 187
 Ersatzwiderstand 161
 Erstarrungspunkt 104, 105
 Expansionsmaschine 119
 Explosionsmotor 120
 Fading 228
 Fallmaschine, Atwoodsche 29
 Fallbeschleunigung, geographische Abhängigkeit 44

- Farad 185
 Faradayscher Versuch (Drehung der
 Polarisationsebene) 154
 Faradays Gesetz 169 f.
 Farben dünner Blättchen 145
 Faustregel 197
 Federmanometer 65
 Federwaage 7
 Feldstärke, elektrische 180
 —, magnetische 194
 Fernrohre 141, 142
 Ferromagnetische Stoffe 194
 Fesselscher Apparat 45
 Fettfleckphotometer 128
 Feuchtigkeit 110
 Fizeau, Bestimmung der Lichtgeschwin-
 digkeit 125
 Flächendichte, elektrische 187
 Flächenmaße 5
 Flächensatz 42
 Flaschenzug 17, 18
 Fliehkraft 39
 Fluoreszenz 230
 Fortpflanzungsgeschwindigkeit elasti-
 scher Wellen 83
 — des Lichtes 123 ff.
 — des Schalls 84
 Foucault, Bestimmung der Lichtge-
 schwindigkeit 125
 Francis-Turbine 59
 Francium 253
 Fraunhofersche Linien 136
 Freie Achse 45
 Freier Fall 27
 Freistrahlturbine 58
 Frequenz 38, 72
 — von Schallschwingungen 85, 86, 87
 Fresnel 143
 Funkeninduktor 208
 Funkwellen 228

 Gaede-Pumpe 66
 Galilei 1
 Galvanoplastik 185
 Galvanotechnik 185
 γ -Strahlen 231
 Gasentladung 174
 Gasgewicht 102
 Gaskonstante, universelle 235
 Gastheorie, Grundgleichung 238
 Gastheorie, kinetische 235 ff
 Gauß (Maßeinheit) 184

 Gay-Lussac, Gesetz von 100
 Generatoren 210 ff.
 Geschwindigkeit 24, 25
 — der de Broglie-Wellen 254
 —, mittlere, der Molekeln 237
 —, mittlere quadratische 237
 Geschwindigkeitshöhe 57
 Gewicht 9, 30
 Gitterspektren 150
 Gleichgewicht, Arten des 15, 16
 — eines drehbaren Körpers 14
 Gleichrichter 177
 Gleichstrom 156 ff.
 Gleichstromgenerator 212
 Glühdrahtöhre 84
 Glüh elektrischer Effekt 176
 Glühkathoden-Gleichrichter 177
 Goldstein 175
 Grammatom 170
 Gravitationsgesetz 43
 Greinacher-Schaltung 247
 Grenzwinkel der totalen Reflexion 133
 Grundgesetz der Mechanik 30
 Grundgleichung der Wellenlehre 74

 Halbschatten 123
 Handregel für die motorische Wirkung
 204
 — für die Induktion 206
 Harmonische Schwingung 72
 Härte 23
 Hauptsatz der Wärmelehre 1. H. 115
 — 2. H. 117
 Hauptschlußgenerator 213
 Heaviside 228
 Hebel 16
 Hebelgesetz 14
 Hefnerkerze 126
 Heizwert 108
 Henry (Maßeinheit) 210
 Heronsball 68
 Hertz 72, 224
 Heß 231
 Hintereinanderschaltung 163
 Hitzdrahtinstrument 166
 Hochspannungsgenerator 184, 247
 Höhenmessung, barometrische 65
 Hohlspiegel 130
 Hohlspiegelbilder 131
 Hookesches Gesetz 23
 Horizontalintensität, magnetische 196
 Huygens, Prinzip von 81

- Hydraulische Presse 51
 Hydrostatischer Druck 51
 Hydrostatisches Paradoxon 52
 Hydrostatische Waage 54
 Hysteresis 195
 Impuls 36
 Induktion, elektromagnetische 205 ff.
 Induktionsgesetz 207
 Induktionskonstante 207
 Induktionsschmelzofen 217
 Induktive Methode 1
 Induktiver Widerstand 219
 Induktivität 210
 Induzierte Spannung 210
 Influenz, elektrische 183
 —, magnetische 192
 Infrarote Strahlung 229
 Inklination 196
 Innenpolmaschine 214
 Interferenz des Lichtes 143
 — von Schallwellen 90
 Interferenz von Wellen 76
 Intervall in der Musik 86
 Isogonen 196
 Isoklinen 196
 Isotherme 116
 Isotope 175, 250, 252
 Joliot-Curie 250
 Joule (Maßeinheit) 32
 Kadmium-Normalelement 172
 Kalorie 102
 Kältemaschinen 111, 112
 Kältemischung 106
 Kanalstrahlen 175
 Kapazität 185
 Kapazitiver Widerstand 220
 Kapillarattraktion 61
 Kapillardepression 51
 Kapselluftpumpe 66
 Kathode 168
 Kathodenstrahlen 175
 Kegelpendel 46
 Keil 21
 Kelvin-Skala 99
 Keplersche Gesetze 43
 Kernfeld 244
 Kernladungszahl 242
 Kernreaktionen 249
 Kernschatten 123
 Kernspaltung 250
 Kerr-Effekt 154
 Kilopond 8
 Kilopondmeter 33
 Kilowattstunde 167
 Kirchhoff, Gesetz von Kirchhoff und
 Bunsen 136
 Kirchhoffsche Gesetze 161
 Kirchhoffs Strahlungsgesetz 233
 Klangfarbe 87
 Klemmenspannung 214
 Klingeltransformator 217
 Kohäsion 22
 Kohäsionskräfte 60
 Kolbenluftpumpe 66
 Kolhörster 231
 Kommunizierende Gefäße 53
 Komplementärfarben 135
 Komponenten 11
 Kompressionszahl 50
 Kondensationswärme 107
 Kondensator, 186
 Kondensieren 106
 Konkavspiegel 130
 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 240
 Konvektion s. Wärmeströmung 114
 Konvexspiegel 131, 132
 Kopfernhörer 203
 Kosmische Schauer 246
 Kosmische Strahlen 231
 Kraft 29
 Kräfte, parallele 12, 13
 Kräftepaar 13
 Kräfteparallelogramm 11, 12
 Kräftepolygon 11
 Kraftfluß, magnetischer 207
 Kraftlinien, elektrische 181
 — magnetische 194
 Kraftmessung 7, 30
 Kraftstoß 36
 Kreisbewegung 38
 Kreiselbewegung 44
 Kreiselkompaß 45, 46
 Kreiselpumpe 68
 Kreisprozeß 116
 Kritische Temperatur 111
 Kritischer Druck 111
 Kundtsche Staubfiguren 84
 Kurbelwiderstand 160
 Kurzwellen 228

- Ladungseinheit, elektrische 180
 Lambert, Gesetz von 127
 Längenausdehnung durch Wärme 96
 Längenmaße 2
 Längswelle 74
 Langwellen 228
 Laue-Diagramm 253
 Lautsprecher, elektrodynamischer 209
 —, elektromagnetischer 203
 Lautstärke 89
 Lebedew 232
 Leclanché-Element 172
 Leidener Flasche 186
 Leistung 33
 Leistung des Wechselstroms 222
 Leistungsfaktor 222
 Lenzsche Regel 206
 Leuchtdichte 127
 Lichtelektrischer Effekt 173
 Lichtgeschwindigkeit 123, 124
 Lichtquellen 123
 Lichtstärke 126
 Lichtstrom 126
 Lichttheorien 143
 Linde-Verfahren 112
 Linsen, optische 136 ff.
 Linsenfehler 139
 Linsenformel 138
 Lissajoussche Figuren 79
 Longitudinalwelle 74
 Lorentz-Kontraktion 240
 Loschmidtsche Zahl 63, 238
 Lösungsdruck, elektrolytischer 171
 Lösungswärme 105
 Luftdruck, Messung 64
 Luftthermometer von Jolly 101
 Lumen 126
 Lupe 140
 Lux 126

 Machsche Wellenmaschine 74
 Magnetische Induktion 195
 Magnetisches Blatt 197
 Magnetpole der Erde 196
 Manometer 65
 Marconi 225
 Masse 30
 — (relativistisch) 241
 Massenanziehung 43
 Masseneinheit 30
 Masseneinheit, technische 32
 Massenspektroskopie 175
 Massenzahl 244
 Maßsystem 33, 34
 Mayer, Robert 115
 Mehrkreiseempfänger 227
 Meißner 225
 Melde, Stimmgabelversuch 78
 Membranen 93
 Meson 246
 Meßbereich, Erweiterung 181
 Meßfehler 3
 Meßuhr 4
 Metallthermometer 97
 Metazentrum 55
 Meter 2
 Metronom 49
 Michelson 2, 126, 239
 Mikrofarad 103
 Mikrometerschraube 4
 Mikron 2
 Mikrophon und Telefon 208
 Mikroskop 141
 Milliampere 158
 Millikan 185
 Millimikron 2
 Mißweisung 196
 Mittelwellen 228
 Modulation elektrischer Schwingungen 225
 Mol 63
 Molekel 22
 Molekularstrom 201
 Moment 41
 Monochord 88
 Morseschreiber 203
 Moseley, Gesetz von 230

 Nebenschlußgenerator 213
 Neptunium 251
 Neutron 243
 Neutrino 246
 Newcomen 118
 Newton (Kraftmaß) 31
 Newtonsche Ringe 146
 Nichtbenetzende Flüssigkeit 61
 Nickeleisenakkumulator 173
 Nicolsche Prismen 153, 154
 Nonius 3
 Normalsiedepunkte 106
 Normalvolumen eines Mols Gas 63

- Nörrenberg 152
 Nukleon 244
 Nullpunkt, absoluter 99
 Nutation 46
- Oberflächenspannung** 60
 Oersted 194
 —, Versuch von 197
 Ohm (Maßeinheit) 159
 Ohmscher Widerstand 221
 Ohmsches Gesetz 160
 Osmose 62
 Osmotischer Druck 71
- Papierkondensator 186
 Papinscher Topf 106
 Parabolspiegel 132
 Paradoxon, aerodynamisches 70
 —, hydrostatisches 52
 Parallelschaltung von Widerständen 161
 — von Elementen 163
 Paramagnetische Stoffe 194
 Pascalscher Apparat 52
 Peltier-Effekt 168
 Pelton-Freistrahlturbinen 60
 Pendel, mathematisches 47
 —, physisches 48
 Pendelversuch, Foucaults 48
 Perihel 43
 Permeabilität 193
 —, absolute 204
 Pfeifen 88, 89
 Pferdestärke 33
 Phasenspannung 216
 Phasenverschiebung 218
 Phasenwinkel 72
 Phon 89
 Photometrie 126 ff.
 Photonen 235
 Photozelle 173
 Picofarad 185
 Picometer 2
 Piezometer 50
 Pitot-Rohr 69
 Plancksche Formel 234
 Plastische Körper 23
 Plattenkondensator 190
 Plutonium 251
 Poise 57
 Poisson, Gesetz von 116
 Polarisation 80
 Polarisation des Lichtes 150
 — durch Reflexion und Brechung 152
 —, elektrische 171
 Polarisationsapparat 152
 Polarisationsebene, Drehung der 153
 Polarisationsfilter 151
 Polarisator 80
 Polstärke, magnetische 192
 Pond 8
 Popow 225
 Positron 246
 Potential 182
 Präzession 45
 Promethium 253
 Proton 242
- Quantentheorie** 235
 Quecksilberdampf-Gleichrichter 218
 Querwelle 74
 Quincke, Interferenzversuch 90, 91
- Radioaktive Strahlung** 231
 Radioaktivität, künstliche 250
 Raumaufdehnung durch Wärme 96
 Raummaße 5
 Reaktor 251 f.
 Recknagelscher Apparat 51
 Reduktion der Wägung 68
 Reduktionsfaktor der Tangentenbussole 200
 Reflexion am ebenen Spiegel 129
 —, diffuse 130
 Reflexion, regelmäßige 129
 — nach Huygens 81
 —, totale 133
 — von Schallwellen 90
 — von Wellen 76
 Regulation 105
 Regenbogen 150
 Reibung 20, 21
 Reibungselektrieremaschine 184
 Reibungselektrizität 178
 Reibungszahlen 21
 Reihenschaltung von Widerständen 161
 — von Elementen 163
 Relais 202
 Relativitätsgesetz der Mechanik 28
 Relativitätsprinzip 239
 Remanenz 195
 Resonanz, akustische 92
 Resonanzbedingung 221

- Resultierende 11
 Richmannsche Regel 103
 Ritchie 128
 Rolle 17
 Römer, Olaf; Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit 124
 Röntgenstrahlen 230
 Rostpendel 97
 Rückkopplung 225
 Ruhmasse 240
 Rumford 128
 Rutherford 242
 Rydberg-Konstante 242

 Saiten 88
 Sammellinse 137
 Sättigungsdruck 109, 110
 Sättigungsmenge 109
 Saugheber 67
 Saugpumpe 67
 Schallgeschwindigkeiten 85
 Schallquellen 83
 Schallstärke 89
 Schallwellen, Sichtbarmachung 84
 Schaltung von Widerständen 161
 — von Elementen 163
 — von Kapazitäten 187
 — von Meßinstrumenten 165
 Scheinwiderstand 221
 Schiebewiderstand 160
 Schiefe Ebene 20
 Schirmwirkung, magnetische 194
 Schlauchmanometer 101
 Schmelzpunkt 104, 105
 Schmelzwärme 105
 Schraube 21
 Schublehre 3
 Schwarzer Körper 233
 Schwebungen 76
 Schwebungen von Stimmgabelschwingungen 91
 Schwerpunkt 15
 Schwimmen 55
 Schwimmregel von Ampère 197
 Schwingungen, harmonische 46, 47
 Schwingungsdauer 38, 72
 — des math. Pendels 47
 — des phys. Pendels 49
 Schwingungserzeugung 225
 Schwingungskreis geschlossener 222
 —, offener 224

 Seitendruck 52
 Sekundenpendel 48
 Selbständige Entladung 173
 Selbstinduktion 209
 Senkrechter Wurf 27
 Serienformel 241
 Siedepunkte 106
 Siedethermometer 107
 Sinusschwingung 73
 Sitz der Ladung 183
 Snellius 132
 Sonnentag 7
 Spannung, elektrische 157
 —, elektrostatische Einheit 180
 —, praktische Einheit 158
 Spannungsmesser 164
 Spannungsteilerschaltung 162
 Spektralfarben 134
 Spektroskop 135
 Spektrum 135, 136
 Spezifische Wärme 103
 Spezifische Wärme von Gasen 115
 Sphärische Abweichung 139
 Sphärometer 4
 Spiegelteleskop 142
 Spiegelversuch 144
 Spitzenwirkung 184
 Spritzflasche 68
 Spritzkolben 51
 Stabantenne 226
 Standfestigkeit 16
 Staubfiguren, Kundtsche 84
 Staudruck 70
 Stechheber 67
 Stefan, Gesetz von Stefan und Boltzmann 233
 Stehende Wellen 77
 Steiner, Satz von 41
 Sternanker 214
 Sternschaltung 215
 Sterntag 7
 Stillb 127
 Stimmgabel 87
 Stöpselwiderstand 160
 Stoß, schräger 37
 —, zentraler 36, 37
 Strahlenbrechung, atmosphärische 133
 Strahlung 229 ff.
 Strahlungsdruck 241
 Strahlungsmaximum 233

- Stromarbeit 165
 Stromeinheit, elektromagnetische 199
 —, praktische 157
 Stromleistung 166
 Stromlinien, Apparat nach Pohl 56
 Strommesser 198, 200, 205
 Stromstärke 157
 Stromverzweigung 161 f.
 Stromwärme 165
 Sublimieren 107

 Tangentenbussole 200
 Taschengalvanometer 198
 Taucherglocke 63
 Taupunktzeiger 111
 Technetium 253
 Telefon 203, 208
 Telegrafie (tonlos) 226
 Temperatur 94
 Temperaturstrahlung 232 ff.
 Theodolit 6
 Thermoelement 167
 Thermometer 94, 95
 Thermosäule 168
 Thomsonsche Schwingungsformel 223
 Tonleitern 86
 Totale Reflexion 133
 Trägheit, Gesetz der 25
 Trägheitsmoment 41
 —, experimentelle Bestimmung 50
 Tragkraft eines Elektromagneten 201
 Transformator 216
 Transurane 250
 Transversalwelle 74
 Tröpfchenmodell 245
 Trommelanker 212
 Turmalin 151
 Tyndall-Effekt 152

 Überdruckturbine 58
 Überlagerung von Wellen 75
 Überlagerungsempfang 227
 Überlaufgefäß 5
 Übertragungsverhältnis 217
 Uhren 7
 Ultrakurzwellen 228
 Ultraschall 85
 Ultraviolette Strahlung 229
 Umformer 216
 Undulationstheorie des Lichtes 143
 Unselbständige Entladung 173, 176

 Vakuum 63
 Valenzelektronen 244
 van de Graaff 184
 van der Waals 238
 van't Hoff, Gesetz von 71
 Vektor 9
 Venturirohr 69
 Verbrennungsmotor 122
 Verbrennungswärme 108
 Verbundmaschine 213
 Verdampfen 106
 Verdampfungswärme 107, 108
 Verdichtungspumpen 66
 Verflüssigung der Gase 111, 112
 Verkettete Spannung 215
 Verschiebung, dielektrische 188
 Verstärkerzahl, magnetische 193
 Vertikalintensität, magnetische 196
 Viertaktmotor 120
 Viskosität 57
 Volldruckmaschine 118
 Voltameter 187
 Voltmeter 181

 Waagen 18, 19
 Wagnerscher Hammer 202
 Walchenseekraftwerk 58
 Waltenhofensches Pendel 209
 Wärme als Molekularbewegung 104
 Wärme, spezifische 103
 Wärmeäquivalent, mechanisches 115
 Wärmeäquivalent, elektrisches 165
 Wärmeausdehnung von Gasen 98
 Wärmeleitfähigkeit 113
 Wärmeleitung 113
 Wärmemenge 103
 Wärmestrahlung 114, 232 f.
 Wärmeströmung 114
 Wärmezustand 94
 Wasserstoffatom, Masse 63, 242
 Wasserstoffmolekel 237
 Wasserstrahlpumpe 58, 66
 Wasserwellen 75
 Wasserwert 103
 Watt 33, 167
 —, James 118
 Wattsekunde 167
 Weber (Maßeinheit) 199
 Weber-Fechnersches Gesetz 89
 Wechselstrom 218 f.
 Wechselstromgenerator 212

- Wechselstromwiderstand 219
 Wheatstonesche Brückenschaltung 162
 Weicheisengalvanometer 198
 Wellen, stehende 77
 —, fortschreitende 74
 — in senkrechten Ebenen 79
 Wellenlänge 73
 — des Lichtes 145
 — der de Broglie-Wellen 254
 Wellenmaschine 74
 Wellenskala 232
 Wellrad 17
 Wichte (spez. Gewicht) 34
 —, Änderung mit der Temperatur 102
 —, Bestimmung im U-Rohr 53
 — — mit dem Aräometer 54
 — — mit der hydrostatischen Waage 54
 —, Bestimmung mit der Mohrschen Waage 55
 Wichte zahlen 34, 35
 Widerstand, spezifischer 159
 Widerstandsgeräte 160
 Widerstandssaiten 160
 Wiensches Verschiebungsgesetz 233
 Wilsonkammer 248
 Winde 17
 Winkelbeschleunigung 39
 Winkelgeschwindigkeit 38
 Winkelmessung 6
 Winkelspiegel 129
 Wirbelströme 209
 Wirkungsgrad von Dampfmaschinen 117
 — von Motoren 122
 Wirkungsquantum 234
 Wirkwiderstand 221
 Woodsche Legierung 105
 Wurf, schräger 28, 29
 Zähigkeit 51
 Zählrohr 249
 Zeeman-Effekt 155
 Zeitmessung 6
 Zentralbeschleunigung 39
 Zentralbewegung 42
 Zentrifugalkraft 39
 Zentripetalkraft 39
 Zentipoise 57
 Zirkularwelle 80
 Zugfestigkeit 23
 Zustandsgleichung der idealen Gase 101
 — der realen Gase 238
 Zweitaktmotor 121, 122
 Zyklotron 247

Literatur

Für technische Berufe geeignet sind:

H. Lindner, Lehrbuch der Physik für Techniker und Ingenieure, 3 Bände, Fachbuchverlag Leipzig, 1957 und Physik für Metallberufe, 2 Bände, Volk und Wissen Verlag, Berlin 1953

Auf Hochschulebene ausgerichtet sind:

W. Schallreuter, Einführung in die Physik, 2 Bände, Verlag Knapp, Halle 1951 u. 53, Grimsehl, Lehrbuch der Physik, 3 Bände, B. G. Teubner-Verlagsgesellschaft, Leipzig 1951 bis 1954

W. H. Westphal, Physik 16. und 17. Auflage, Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg 1953

W. H. Westphal, Kleines Lehrbuch der Physik ohne Anwendung höherer Mathematik, Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg 1953

Für das Selbststudium:

Physik, Lehrbriefe der Bergakademie Freiberg, Verlag d. Wissenschaften, Berlin 1952 bis 1954

Im gleichen Verlag erscheint:

Physikalisches Grundwissen

Von Johannes Reth und Dr. Alfred Haendel

Band I: Meßkunde · Wärmelehre · Mechanik

295 Seiten mit 222 Bildern und 77 Versuchsanleitungen · 12,5 × 17,6 cm · Hlw. 3,80 DM

Band II: Magnetismus · Elektrizität

Von Studienrat Johannes Reth

280 Seiten mit 321 Bildern und 119 Versuchsanleitungen · 12,5 × 17,6 cm · Hlw. 3,80 DM

Band III: Wellen und Strahlung, Atomphysik

Dieses Werk will dem Leser ein umfassendes Bild von den einzelnen Zweigen der Physik vermitteln. In leichtverständlicher Sprache wird, von der Meßkunde ausgehend, zunächst die Mechanik behandelt. Daran schließt sich in Band II die Behandlung von Magnetismus und Elektrizität an. Wellen und Strahlung, Atomphysik werden in Band III den Abschluß des Gesamtwerkes bilden.

Die Bücher eignen sich in Form und Aufbau vorzüglich zum Selbststudium. Der Leser wird an die Kernprobleme der Physik herangeführt. Besonders zu erwähnen ist die ständige Verbindung mit der Praxis, die durch zahlreiche Beispiele und Hinweise hergestellt wird.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung

FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Im gleichen Verlag erscheint:

Lehrbuch der Physik für Techniker und Ingenieure

Von Helmut Lindner

Als Fachschul-Lehrbuch anerkannt

Band I: Mechanik der festen Körper, Flüssigkeiten und Gase

5., verbesserte Auflage

161 Seiten mit 310 Bildern · 16,2×22,9 cm · Hlw. 5,80 DM

Band II: Wärmelehre · Akustik · Optik

4., erweiterte und verbesserte Auflage

189 Seiten mit 317 Bildern und einer mehrfarbigen Tafel · 16,2×22,9 cm · Hlw. 7,50 DM

Band III: Elektrizitätslehre und Atomphysik

3. Auflage

216 Seiten mit 377 Bildern · 16,2×22,9 cm · Hlw. 9,50 DM

Das dreibändige Werk wendet sich vor allem an unseren Ingenieur-nachwuchs an den Fachschulen, ist aber auch ein zuverlässiges Hilfsmittel beim Selbststudium. Ohne eine höhere Schulbildung vorauszusetzen, behandelt es in gut gegliederter Zusammenstellung alle wesentlichen Fragen der Physik in lebendiger und anschaulicher Form. Es vermittelt dem werdenden Techniker und Ingenieur sowie dem Praktiker die für seinen Beruf erforderlichen physikalischen Grundlagen, so daß er auch schöpferisch an der Entwicklung der Technik teilnehmen kann. Jedes Kapitel endet mit fragenden und erläuternden Beispielen, so daß der Leser zum weiteren Eindringen in den Stoff angeregt wird.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung

FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

